

# Der globale Klimawandel und seine Auswirkungen auf Deutschland

C.-D. Schönwiese

## 1 | Klimabegriff und beobachteter Klimawandel in globaler Perspektive

● Im Gegensatz zum Wetter ist das Klima als die Statistik der Wetterereignisse, bezogen auf eine längere Zeitspanne (nach den Empfehlungen der Weltmeteorologischen Organisation mindestens 30 Jahre) definiert [1]. Es zeigt sich dann beispielsweise in entsprechenden Häufigkeitsverteilungen. In Abb. 1 ist dafür der Einfachheit halber und idealisierend eine (symmetrische) Normalverteilung angenommen, die sich durch den Mittelwert, zugleich häufigster bzw. wahrscheinlichster Wert, und die Streuung beschreiben lässt. Im Fall der Temperatur haben wir es oft mit solchen Verteilungen zu tun, beim Niederschlag und Wind sind sie jedoch komplizierter (insbesondere unsymmetrisch). Ändert sich das Klima, verschiebt sich die Verteilung, wobei die Veränderung des Mittelwerts als Trend bezeichnet wird. Wie wir noch sehen werden, sind solche Trends aber meist von Fluktuationen überlagert. Zudem kann sich auch die Streuung und somit „Breite“ der Verteilung ändern.

Die vielfältigen indirekten und direkten Informationsquellen der Klimatologie (siehe u. A. [1], [2]) zeigen uns nun, dass das Klima der Erde stets variabel in allen Größenordnungen der Zeit und des Raums ist. Obwohl die indirekten Rekonstruktionsmethoden der Paläoklimatologie maximal bis zu 3,8 Milliarden Jahre zurück reichen, sei hier nur erwähnt, dass die Erde nach dem Ende der letzten Eiszeit (vor ca. 10 500 Jahren) ein relativ stabiles Klima erlebt hat, was für die kulturelle und wirtschaftliche Entwicklung sicherlich von Vorteil war. Im Industriezeitalter jedoch, d.h. in den letzten ca. 100-200 Jahren, hat eine rasante Erwärmung stattgefunden, die zudem durch direkt gewonnene Messdaten auch in ihren räumlichen Strukturen gut belegt ist. So

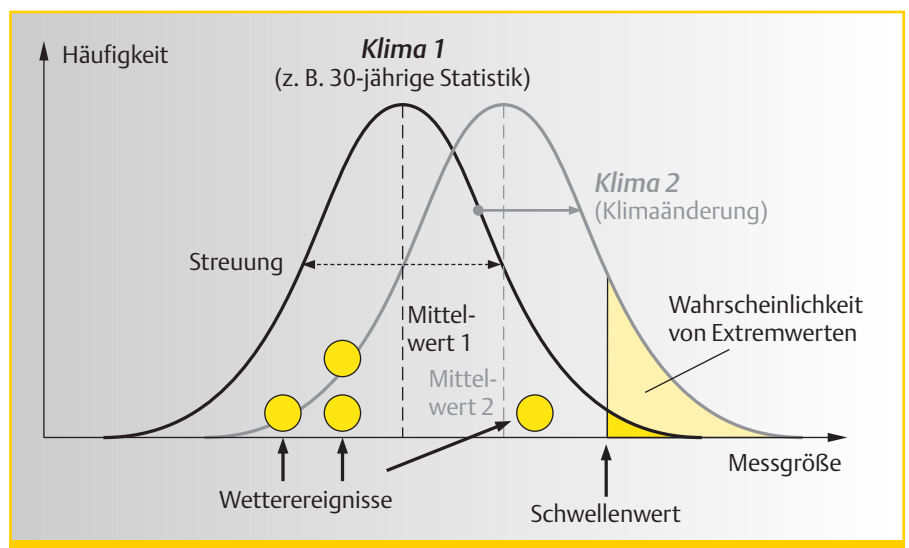


Abb. 1: Zur Unterscheidung von Wetter und Klima sowie Schema einer Klimaänderung anhand der Verschiebung der entsprechenden Häufigkeitsverteilungen (von Klima 1 mit Mittelwert 1 zu Klima 2 mit Mittelwert 2). Auf die Auswirkungen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Extremwerten wird im Abschnitt 3 eingegangen.

lässt sich für die bodennahe Lufttemperatur in globaler Mittelung (Landgebiete und Ozeane), siehe Abb. 2, neben den immer überlagerten Fluktuationen, diese Erwärmung deutlich feststellen und für 1901 bis 2000 mit (linear) rund  $+0,7\text{ °C}$  ( $\pm 0,2\text{ °C}$ ) quantifizieren.

Bei solchen, zunächst gering erscheinenden Trendwerten ist zu beachten, dass es sich hier nicht um Wetter-, sondern Klimaphänomene handelt. Wie wirksam solche langfristigen und somit Klimatrends sein können, zeigt das Beispiel der Gebirgsgletscher. Im Industriezeitalter haben sie sich in den meisten Regionen der Erde enorm zurückgezogen, während 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 % abgeschätzt [3]. Ein weiteres Beispiel ist der Rückgang der arktischen Meereisbedeckung, der vom IPCC [2] im Sommer mit 7,4 % pro Jahrzehnt angegeben wird. Doch

hat dieser Flächenverlust in der Zeit 1980-2008 schon ca. 40 % erreicht. Die im globalen Mittel beobachtete Erwärmung (Abb. 2) ist von einem Meeresspiegelanstieg begleitet, der (ebenfalls global gemittelt, 1901-2005) bei  $17$  ( $\pm 5$ ) cm liegt (IPCC, 2007). Dazu trägt jedoch vor allem die thermische Expansion des oberen Ozeans bei (57 %), gefolgt vom Rückgang der außerpolearen Gebirgsgletscher (29 %) und dem bisher noch moderaten Rückgang der polaren Landeisschilde. Dagegen steht das Meereis im Schwimmgleichgewicht mit dem Ozean und beeinflusst somit die Meeresspiegelhöhe nicht.

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 Temperaturtrends 1901-2000 (ohne überlagerte Fluktuationen), jedoch in räumlicher Differenzierung, so ergibt sich

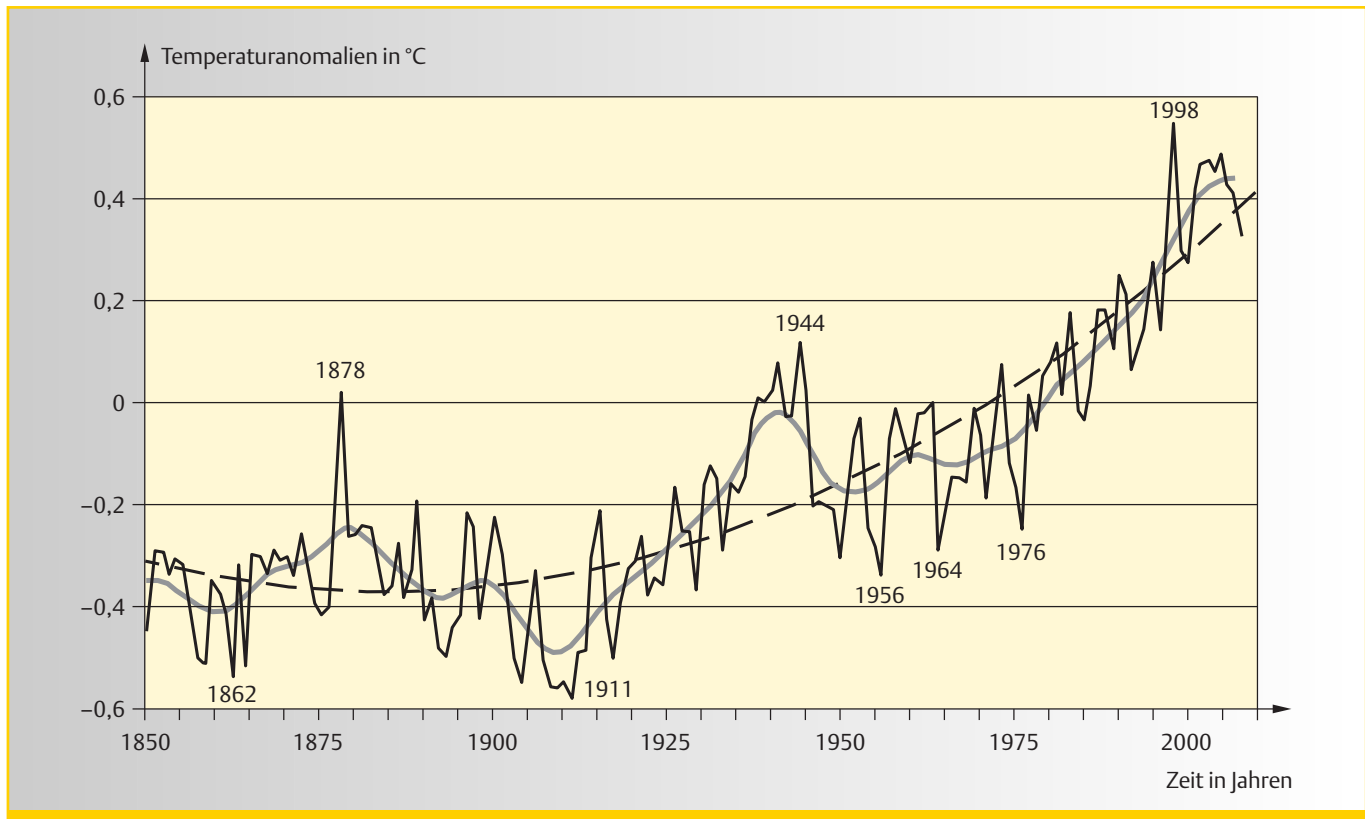


Abb. 2: jährliche Anomalien (d.h. Abweichungen vom Referenzwert 1961-1990) der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1850-2008 (schwarze Kurve), 20-jährige Glättung (graue Kurve) und polynomialer Trend (gestrichelt), Datenquelle: Jones et al. [19]. Der Mittelwert für 1961-1990 liegt bei rund 15 °C, der lineare Trend 1901-2000 bei 0,7 °C.

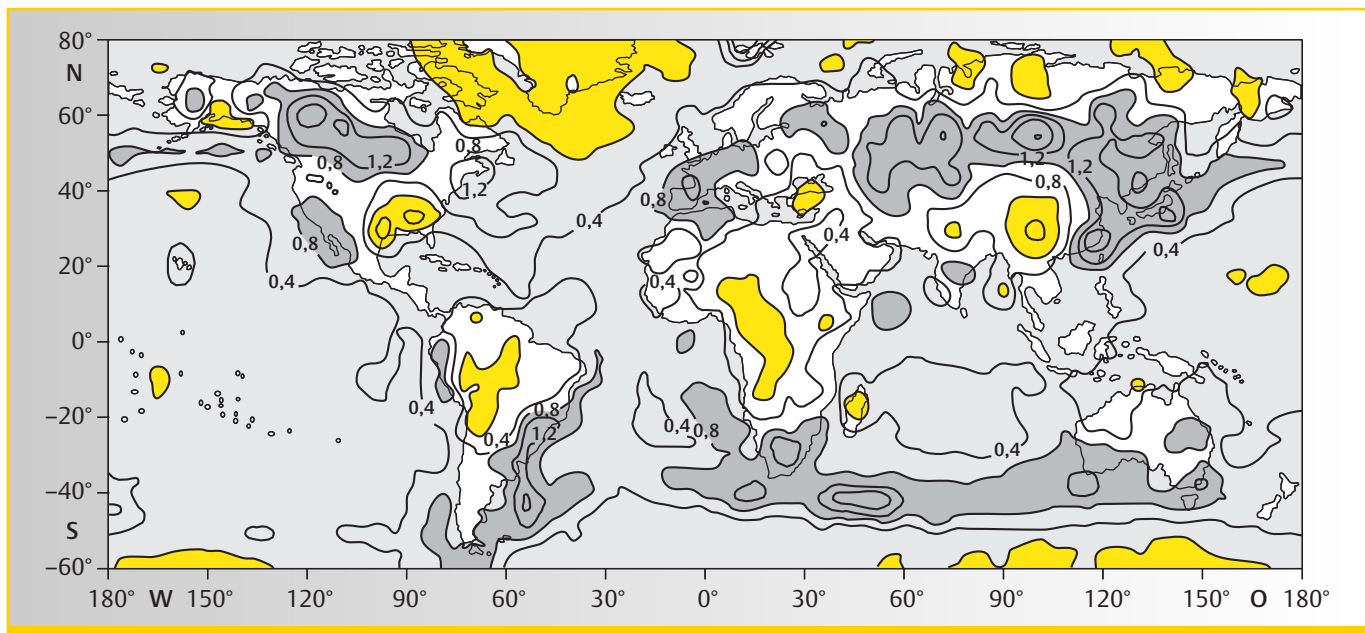


Abb. 3: Lineare Trends 1901 - 2000 der Jahreswerte der bodennahen Lufttemperatur in K (°C), Globalanalyse auf der Grundlage eines 5° x 5° - Gitterpunktdatensatzes (Datenquelle: Jones et al. [19], bearbeitet).

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 %

Tab. 1: Übersicht der beobachteten (bodennahen) Temperatur- und Niederschlagstrends in Deutschland (Quellen: Rapp [4]; Schönwiese [1] ergänzt).

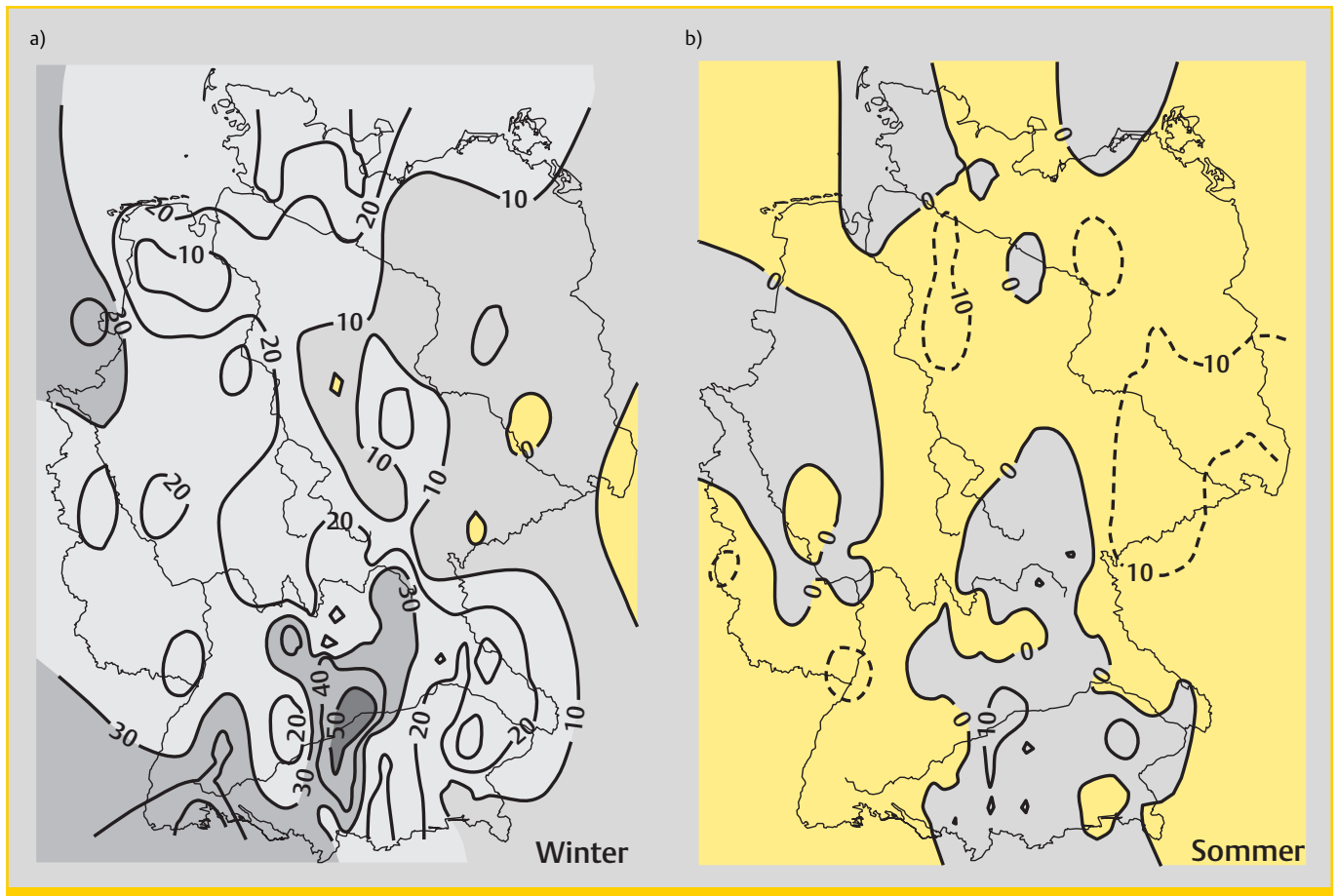


Abb. 4: Vergleich der prozentualen Niederschlagstrends 1901-2000 im Winter (a) und im Sommer (b) in Deutschland (nach [7]); Zunahmen sind grau, Abnahmen gelb markiert.

ein sehr kompliziertes Bild; siehe Abb. 3. Zwar überwiegt offenbar die Erwärmung, zum Teil sogar deutlich stärker 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, siehe [1], [4]. Und beim in vielerlei Hinsicht im Vergleich mit der Temperatur wichtigeren Klimaelement Niederschlag kommen noch die wesentlich größere Messfehlerbelastung und geringere räumliche Repräsentanz hinzu [5], [6].

## 2 | Beobachteter Klimawandel in Deutschland

● Aus Abb. 3 lässt sich bereits 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 über alle Jahreszeiten ungefähr gleich groß, mit einem Anstieg der Jahresmittelwerte um rund 1,0 °C (gegenüber

0,7 °C 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 die stärksten Zunahmen wiederum im Winter, aber auch im Frühling und Herbst mehr Niederschlag, während im Sommer ein sich in den letzten Jahrzehnten deutlich verstärkender Niederschlagsrückgang feststellbar ist.

Dass selbst innerhalb einer so kleinen Region wie Deutschland die Klimatrends sehr unterschiedlich sind, insbesondere beim Niederschlag, zeigt Abb. 4, wo die Niederschlagstrends 1901-2000 für den Winter und Sommer vergleichend zusammengestellt sind. Man erkennt, dass sich die winterlichen Niederschlagszunahmen auf den Westen und Süden konzentriert haben (mit Trendwerten bis über 50 %), dagegen im Osten zum Teil (aber sehr kleinräumig) gar keine Niederschlagstrends in Erscheinung treten. Im Sommer stehen sich – bei insgesamt geringeren Trendwerten (bis ca. 10 %) – leichte Abnahmen (insbesondere im Osten) und leichte Zunahmen (im Süden, zum

Teil auch im Nordwesten und Norden) gegenüber.

Nun darf bei solchen Trends nicht in Vergessenheit geraten, dass sie stets von Fluktuationen und Jahr-zu-Jahr-Variationen (bzw. bei größerer zeitlicher Auflösung noch hochfrequenten Variationen) überlagert sind. Je mehr man von global gemittelten Daten, vgl. Abb. 2, auf die Betrachtung relativ kleiner Regionen wie z.B. Deutschland übergeht, umso mehr treten diese überlagerten Variationen in Erscheinung. Das ist in Abb. 5 zu sehen, wo die jährlichen Flächenmittelwerte der bodennahen Lufttemperatur für Deutschland (in den heutigen Grenzen) seit 1761 dargestellt sind. Obwohl der Langfristtrend eine ähnliche Struktur aufweist wie in Abb. 2 – und die entsprechende Erwärmung seit 1850/1900 sogar größer ist – dominieren die Jahr-zu-Jahr-Variationen doch sehr stark und haben im Übrigen wenig mit den entsprechenden Globalwerten zu tun. So ist in Deutschland in dieser Zeit das bisherige Maximum nicht im Jahr 1998, wie im globalen Mittel (Abb. 2), sondern auf fast gleichem Niveau 2000 und 2007 aufgetreten; das bisher kälteste Jahr war 1829.

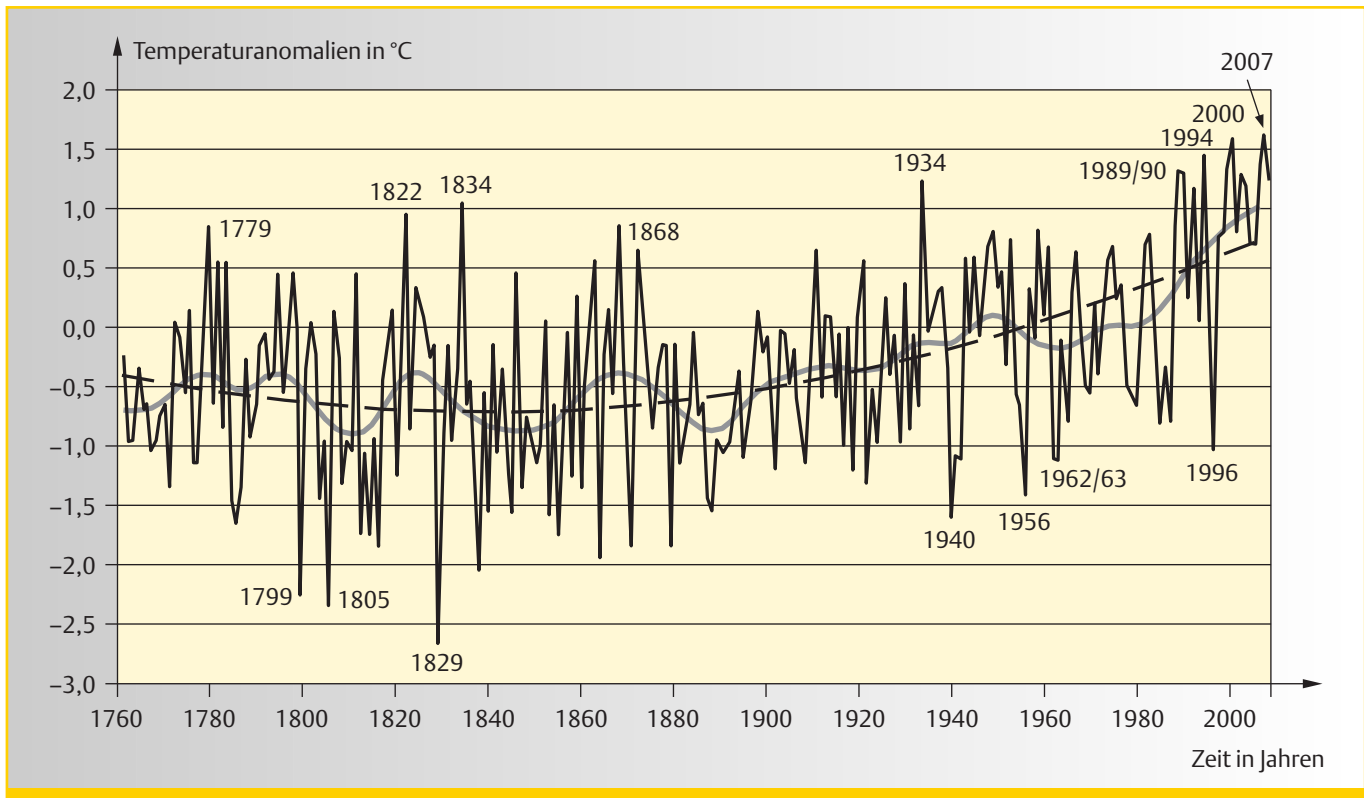


Abb. 5: Jährliche Anomalien (relativ zu 1961-1990) 1761-2008 der Flächenmittelwerte der bodennahen Lufttemperatur in Deutschland, violette Kurve, 30-jährige Glättung, blaue Kurve, und polynomialer Trend, rot gestrichelt (Datenquelle: Rapp [4]; ergänzt nach Deutscher Wetterdienst [20] und bearbeitet). Der Mittelwert für 1961-1990 beträgt 8,3 °C, der lineare Trend 1901-2000 (vgl. Tab. 1) 1,0 °C.

Beim Übergang auf jahreszeitliche Betrachtungen gilt im Prinzip ähnliches: Die Langfristtrends sind ähnlich, die regionalen jährlichen bzw. in diesem Fall jahreszeitlichen Anomalien haben ihr ausgeprägtes „Eigenleben“. So ist in Deutschland seit 1761 der bisher heißeste Sommer im Jahr 2003 aufgetreten, gefolgt von 1947, 1992, 1994 und 1983. Am kältesten war bisher der Sommer 1816, im 20. Jahrhundert 1913 und 1916. Der in dieser Zeit bisher wärmste Winter war 2006/2007, gefolgt von 1974/75 und 1989/90 auf gleichem Niveau, weiterhin 1997/1998 und 1994/1995. Der kälteste Winter war der 1829/30, im 20. Jahrhundert 1962/1963 (zu Frühjahr, Herbst und weiteren Details siehe Schoenwiese [1], [7]).

Beim Niederschlag treten die jährlichen bzw. jahreszeitlichen Besonderheiten sogar derartig hervor, dass Langfristtrends nur noch mühsam erkennbar sind. Hinzu kommen die regionalen Besonderheiten (vgl. Abb. 3). In europäischer Perspektive sind der drastische Rückgang des Winterniederschlags (bei nach wie vor geringen Sommerwerten) in der Mittelmeerregion sowie die markante Zunahme des Jahresniederschlags (mit Schwerpunkten Winter/Frühling) in Skandinavien besonders bemerkenswert [8].

### 3 | Extremereignisse

Die Betrachtung besonders warmer bzw. kalter Jahreszeiten führt uns zu den Extremereignissen, die in der Öffentlichkeit meist viel größere Beachtung finden als die relativ langfristigen Klimatrends. Das hat vor allem zwei Gründe: Sie können mit großen volkswirtschaftlichen Schäden und sogar Todesfällen verbunden sein und sind wegen ihrer Kurzzeitigkeit zeitlich besser überschaubar. Aufgrund dieser Kurzzeitigkeit handelt es sich eigentlich um Wetterereignisse wie z. B. Unwetter, die in Form von Starkniederschlägen, ggf. mit Gewitter und Hagel, auftreten, oder Witterungsereignisse (falls sie in der zeitlichen Größenordnung von Wochen bis Monaten liegen) wie sommerliche Hitzewellen. In Mitteleuropa sind Hitzesommer im Allgemeinen relativ trocken, somit meist auch „Dürresommer“, während milde Winter die Gefahr von Starkniederschlägen und folglich Überschwemmungen mit sich bringen. Erwähnt sei in diesem Zusammenhang die auffällige Häufung von großen Überschwemmungen in der jüngeren Zeit, insbesondere in den Wintern 1993/94 und 1994/95 (Rhein-Region), Juli 1997 (Oder-Region), Mai 1999 (Donau-/Bodensee-Region), August 2002 (Elbe-Region) und August 2005 (Voralpen-Region).

Der europäische Hitze- und Dürresommer 2003 hatte ca. 55 000 zusätzliche (indirekte) Todesfälle und volkswirtschaftliche Schäden in Höhe von ca. 13 Milliarden US \$ zur Folge. Die Schäden der Überschwemmungen in der Elbe-Region im August 2002 waren in der gleichen Größenordnung, bei 37 (direkten) Todesfällen. Die „Naturkatastrophe“ mit den größten volkswirtschaftlichen Schäden der Versicherungsgeschichte seit 1900 (und vermutlich weit darüber hinaus) war freilich der tropische Wirbelsturm „Katrina“ im August 2005: 125 Milliarden US \$ und 1322 (direkte) Todesfälle (jeweils nach Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft [9]). Dabei gibt es Indizien dafür, dass solche Wirbelstürme intensiver werden. Für alle sogenannten großen Naturkatastrophen (Stürme, Überschwemmungen, Dürren usw.) gibt die MüRück von 1960/1969 bis 1998/2007 (somit dekadisch) einen Anstieg der eingetretenen volkswirtschaftlichen Schäden um den Faktor ca. 7 an (von weltweit 67 auf 486 Milliarden US \$; bei den versicherten Schäden ist dieser Faktor sogar noch wesentlich höher). Jedoch spielt dabei auch der Anstieg der Bevölkerung und Wertekonzentrationen eine Rolle. Zudem sind in diesen Statistiken, allerdings nicht mit steigender Tendenz, auch Erdbeben und Vulkanausbrüche

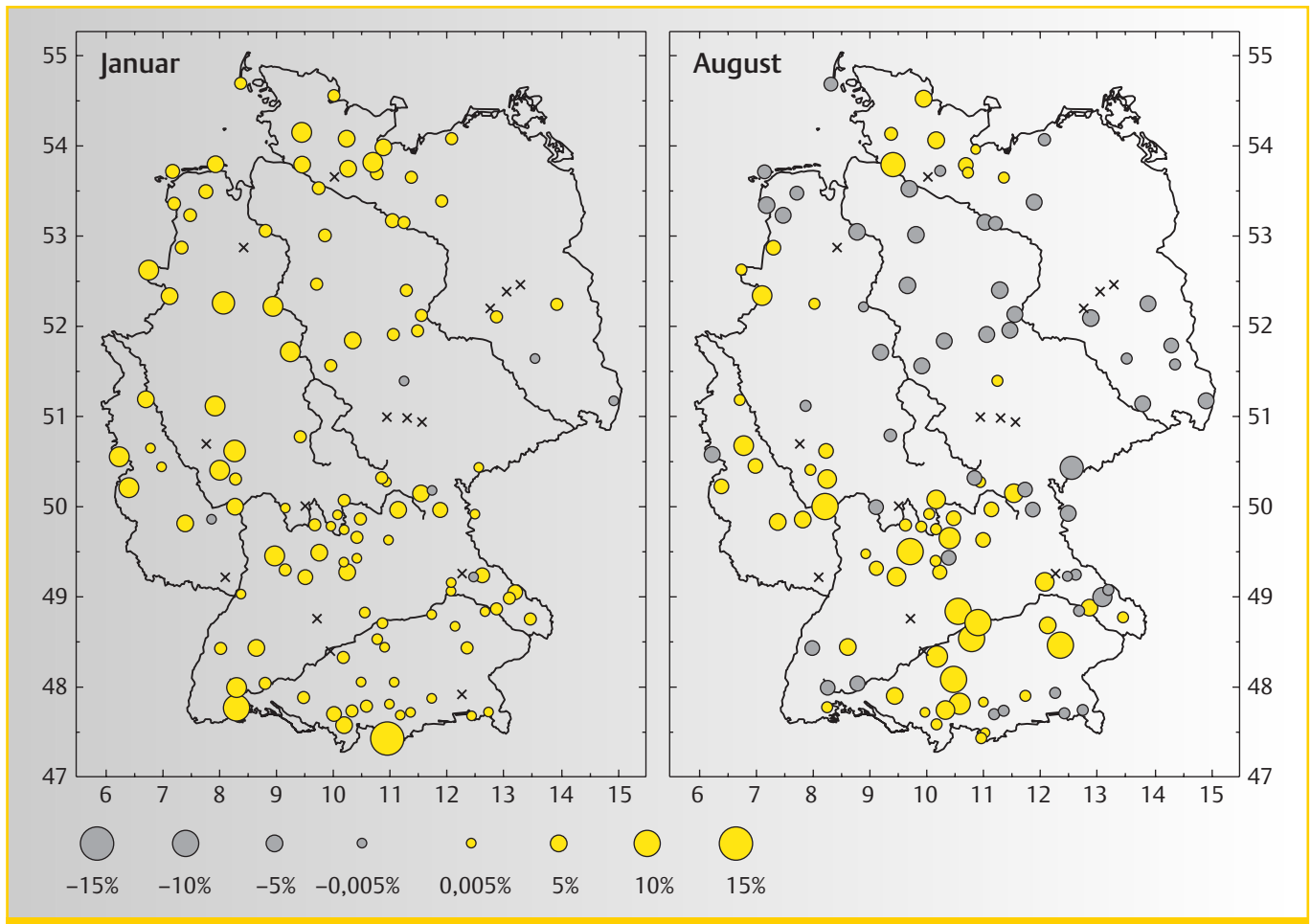


Abb. 6: Trends 1901-2000 der Überschreitungswahrscheinlichkeit extrem hoher Niederschläge (hier definiert als 95%-Perzentile) in Deutschland, wobei rote Kreise Zu- und blaue Kreise Abnahme bedeuten (x keine signifikante Änderung; nach Schönwiese und Trömel [11]).

enthalten. Es ist daher sinnvoll, der Frage, ob sich der Klimawandel auch in den Extremereignissen zeigt, auch ohne Bezug auf die Schadensausmaße nachzugehen. Klimatologisch wird diese Fragestellung dadurch, dass nicht Einzelereignisse analysiert werden, sondern festzustellen ist, ob sie im Laufe der Jahrzehnte und darüber hinaus häufiger bzw. intensiver bzw. beides werden. Das ist eine extremwertstatistische Frage, die am besten anhand der Abb. 1 veranschaulicht werden kann. Fassen wir nämlich den Klimawandel als eine Verschiebung entsprechender Häufigkeitsverteilungen auf und führen wir obere (bzw. untere) Schwellen ein, ab denen aufwärts (bzw. abwärts) auftretende Datenwerte als extrem bezeichnet werden, so ist die Fläche unter der Häufigkeitskurve im entsprechenden Abschnitt ein Maß für die Eintrittswahrscheinlichkeit. Verschiebt sich, wie in Abb. 1 angenommen, z. B. die Verteilung in Richtung höherer Werte, so kommt zu der rot markierten Fläche die mit schwarzen Balken markierte Fläche hinzu. Entsprechend groß ist die Zunahme der Eintrittswahrscheinlichkeit.

Spezielle Analysen für Deutschland haben gezeigt, dass bei der Temperatur zumeist extrem warme bzw. heiße Monate bzw. Jahreszeiten häufiger und relativ kalte seltener werden (siehe [6], [10]). Beim Niederschlag, insbesondere im Winter und im Westen sowie Süden von Deutschland, kommt aber noch der Effekt dazu, dass die Streuung zunimmt. Das führt dazu, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit sowohl für extrem niederschlagsarme als auch extrem niederschlagsintensive Wintermonate zunimmt, letzteres allerdings deutlich ausgeprägter als ersteres (siehe [6], [11]). Die Tendenz des Eintretens von Monaten mit extrem viel Niederschlag ist in Abb. 6 in Form von Deutschland-Karten für die Monate Januar und August gezeigt. Danach nimmt diese Tendenz im Winter weitgehend flächendeckend zu, regional (z. B. in Bayern) aber auch im Sommer.

#### 4 | Ursachendiskussion

● Noch weitaus komplizierter als die hier in nur wenigen Beispielen vorgestellten Indizien für die Klimaänderungen der Vergan-

genheit sind ihre Ursachen. Um sich diesem Problem zu nähern, muss von der historisch-statistischen Betrachtungsweise zur physikalischen übergegangen werden. Dazu dient zunächst das Konzept des Klimasystems [1], [2], [12], siehe Abb. 7. 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). Innerhalb und zwischen diesen Komponenten gibt es eine Vielzahl von Wechselwirkungen. Dazu gehören beispielsweise die Prozesse der Wolken- und Niederschlagsbildung in der Atmosphäre. Der Wind (der Atmosphäre) beeinflusst die Verdunstung an der Meeresoberfläche und somit die Luftfeuchtigkeit und Wolkenbildung, aber auch die Meeresströmungen. Ein besonders prominentes Beispiel atmosphärisch-ozeanischer Wechselwirkungen ist das El Niño-Phänomen (siehe z. B. [1]). Es tritt in episodischen Erwärmungen der tropischen Ozeane, insbesondere des tropischen Ostpazifiks in Erscheinung, bein-

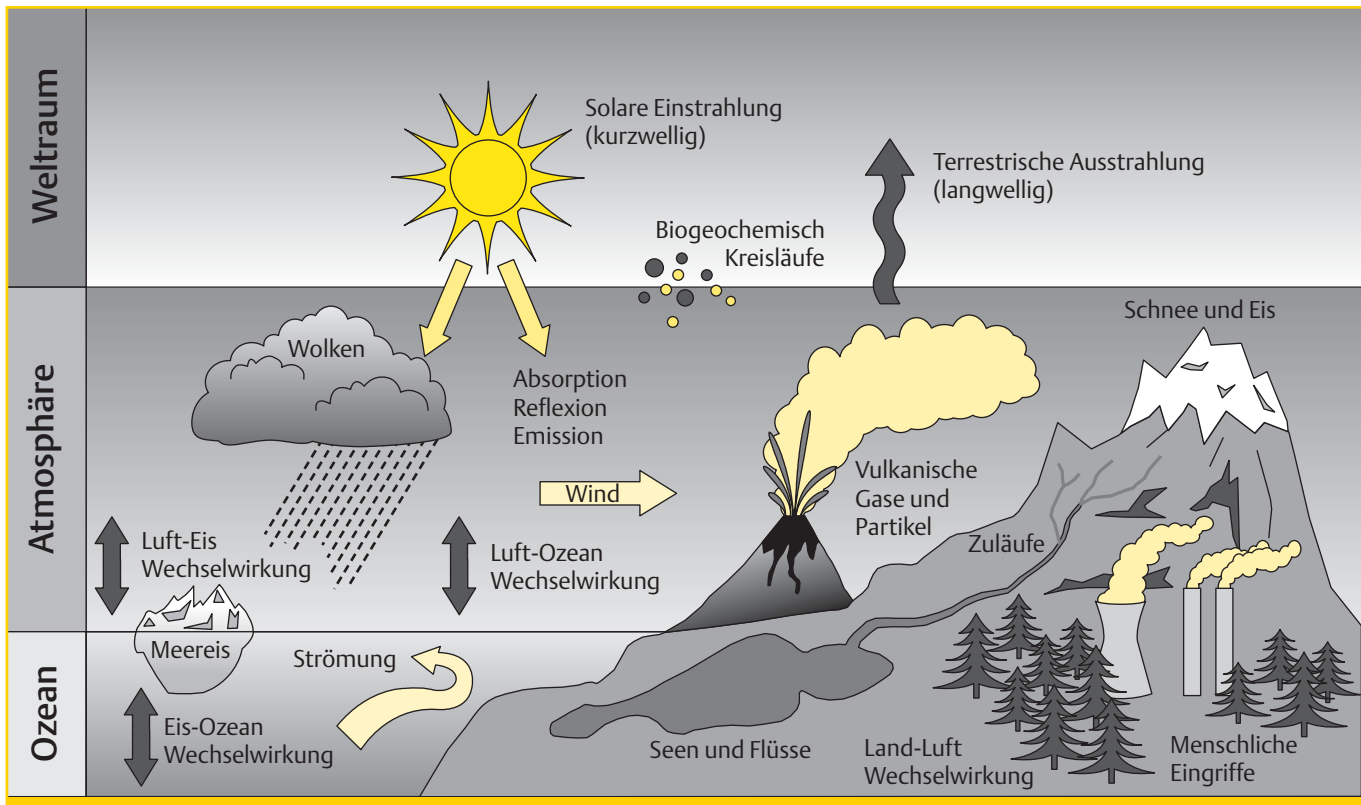


Abb. 7: Schema des Klimasystems (nach Cubasch und Kasang [12]); vgl. Text.

haltet einen Zyklus von ca. 3-7 Jahren und ist u. A. für den hohen Anomaliewert 1998 der Globaltemperatur (vgl. Abb. 2) verantwortlich. Einige der internen Wechselwirkungen des Klimasystems sind mit (positiven) Rückkopplungsprozessen verbunden, die aus kleinen Ursachen große Wirkungen machen können. (Negative Rückkopplungen wirken umgekehrt: Aus großen Ursachen werden kleine Wirkungen.)

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. Beispiele dafür sind Variationen der Sonneneinstrahlung (in der zeitlichen Größenordnung von Jahren bis Jahrhunderten ist dabei vor allem die Sonnenaktivität wichtig), 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 durch verstärkte Partikelabsorption von terrestrischer Strahlung erwärmt und simultan die untere Atmosphäre durch verstärkte Streuung der Sonneneinstrahlung abkühlt) und auch der Mensch. Diese anthropogenen Einflüsse sind ebenfalls vielfältig und zeigen sich beispielsweise im sogenannten Stadtklima, das sich wegen der dortigen Bebauung, Bodenversiegelung und Wärmeabgabe deut-

lich vom Klima des Umlands unterscheidet. Generell ist jede Veränderung der Erdoberfläche klimarelevant, weil sie ihre physikalischen Eigenschaften verändert. Dazu gehören z. B. die Wärmekapazität und Albedo (Anteil der Reflexion gegenüber einfallender Strahlung).

So lassen sich z. B. über die Umwandlung von Natur- und Kulturlandschaften, einschließlich Waldrodungen, die anthropogenen Einflüsse auf das Klima Jahrtausende zurückverfolgen [1]. Doch steht dabei das Industriezeitalter 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 hier von hervorgehobener Bedeutung: Erstens der Ausstoß klimawirksamer Spurengase ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  usw.) als Folge der Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Gas, einschließlich Verkehr), aber auch infolge von Waldrodungen sowie industrieller und landwirtschaftlicher Produktion; zweitens die Bildung von Schwebepartikeln, insbesondere Sulfataerosolen, aufgrund des Ausstoßes besonderer toxischer Spurengase (in diesem Fall vor allem  $\text{SO}_2$ ).

Aus Abb. 8 ist ersichtlich, dass seit 1900 der Anstieg der Weltprimärenergienutzung wesentlich stärker als die Zunahme der

Weltbevölkerung gewesen ist. Sie hat im Jahr 2008 eine Größenordnung von 16 bis 17 Mrd. SKE (Steinkohleeinheiten) erreicht und beruht derzeit zu 88 % auf fossilen Energieträgern. Da dabei Kohlenstoff zu Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) verbrannt und in die Atmosphäre emittiert wird, steigt auch die atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Konzentration an. Einschließlich der indirekten Effekte durch Waldrodungen nähert sich die Emission derzeit dem Wert von 40 Gt  $\text{CO}_2$  pro Jahr. In Kasten 1 sind für  $\text{CO}_2$  und die wichtigsten weiteren klimawirksamen Spurengase die Emissionen des Jahres 2006 und die daraus resultierenden Konzentrationsanstiege aufgelistet. 2009 hat das  $\text{CO}_2$  einen Konzentrationswert (gemessen auf dem Mauna Loa, Hawaii) von ca. 387 ppm erreicht (2008: 385,6 ppm [13]).

Dieser Vorgang führt im globalen Mittel zu einer Erwärmung der unteren Atmosphäre und gleichzeitig Abkühlung der Stratosphäre. Der physikalische Grund dafür ist, dass die klimawirksamen Spurengase Absorptionsbanden im Wellenlängenbereich der terrestrischen (Wärme-) Ausstrahlung besitzen. Erhöht sich deren Konzentration, erhöhen sich auch die Absorption und die dadurch bedingte Erwärmung (die durch Wärmeleitung auch an die zunächst nicht beteiligten atmosphärischen Bestandteile weitergegeben wird). Auf diesem höheren

## Übersicht der wichtigsten Charakteristika klimawirksamer Spurengase

Spurengas, Symbol	Anthropogene Emissionen	Atmosphärische Konzentrationen	Treibh. natürlich	Treibh. anthrop.
Kohlendioxid, CO <sub>2</sub>	37 Gt /Jahr	382 (280) ppm**	26 %	56 %
Methan, CH <sub>4</sub>	400 Mt /Jahr	1,8 (0,7) ppm	2 %	16 %
FCKW*	0,4 Mt /Jahr	F12: 0,5 (0) ppb	–	11 %
Distickstoffoxid, N <sub>2</sub> O	15 Mt /Jahr	0,32 (0,27) ppm	4 %	5 %
Ozon (bodennah), O <sub>3</sub>	0,5 Gt /Jahr (?)	34 (25) ppb***	8 %****	12 %****
Wasserdampf, H <sub>2</sub> O	vernachlässigbar	2,6 (2,6) %***	60 %	(indirekt)

\*) Fluorchlorkohlenwasserstoffe \*\*) 2009: 387 ppm \*\*\*) bodennaher Mittelwert \*\*\*\*\*) mit weiteren Gasen

## Aufschlüsselung der anthropogenen Emissionen:

Spurengas, Symbol	Anthropogene Emissionen aufgeschlüsselt
CO <sub>2</sub>	74 % fossile Energie, 23 % Waldrodungen, 3 % Zementproduktion und Holznutzung
CH <sub>4</sub>	27 % fossile Energie, 23 % Viehhaltung, 17 % Reisanbau, 16 % Abfälle (Müll, Abwasser), 11 % Biomasse-Verbrennung, 6 % Tierexkrememente
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> ; Verkehr, Industrie u.a.)

**Kasten 1:** Treibhausgase mit Emissionen und Konzentrationen (jeweils 2006, vorindustrielle Konzentrationen ca. 1750 in Klammern) sowie Abschätzung der Beiträge zum natürlichen (vorletzte Spalte) bzw. anthropogenen Treibhauseffekt (letzte Spalte, in Relationen der Strahlungsantriebe); Quellen: IPCC [2]; Lozán et al [23]; natürlicher Treibhauseffekt nach Kiehl und Trenberth [24]; Mt = 10<sup>6</sup> t, Gt = 10<sup>9</sup> t; ppm = 10<sup>-6</sup>, ppb = 10<sup>-9</sup> Volumenprozent.

Klimafaktor	Art	Strahlung in Wm <sup>-2</sup>	Signal in °C	Signalstruktur
„Treibhausgase“	a	+3,0 (2,7 – 3,6)	0,9 – 1,5	progressiver Trend
Troposphäre Sulfat	a	-1,2 (0,4 – 2,7)	-0,2 – 0,5	uneinheitlicher Trend
Ruß	a	+0,1 (0,0 – 0,2)	–	Trend
Stratosphäre Ozon	a	-0,1 (0,05 – 0,15)	–	Trend
Stratosphäre Wasserdampf	a	+0,07 (0,02 – 0,12)	–	Trend
Albedo (Landnutzung)	a	-0,2 (0,0 – 0,4)	–	Trend
Flugverkehr (Ci u.a.)	a	+0,01 (0,003 – 0,03)	–	Trend
Vulkaneruptionen	n	max. ≈ -3*	-0,2 – 0,3	episodisch (1 bis 3 Jahre)
Sonnenaktivität	n	+0,1 (0,06 – 0,3)	0,1 – 0,2	fluktuativ
El Niño (ENSO)	n	(intern)	0,1 – 0,2	episodisch (Monate)
2 x CO <sub>2</sub> Gleichgewicht	a	+4,4	2,0 – 4,5	progressiver Trend

**Tab. 2:** Global gemittelte troposphärische (niederatmosphärische) Strahlungsantriebe (nach IPCC, [2]) und zugehörige bodennahe Temperatursignale aufgrund statistischer Abschätzungen (nach Schönwiese et al., 2010). \* Pinatubo 1991: -2,4 Wm<sup>-2</sup>, 1992: -3,2 Wm<sup>-2</sup>, 1993: -0,9 Wm<sup>-2</sup>, Quelle: McCormick [21]

Energieniveau strahlt dann vor allem die untere Atmosphäre (wo die Luftdichte relativ groß ist) allseitig ab, zum Teil auch zurück zur Erdoberfläche, was den dortigen Erwärmungseffekt erklärt und als eine Art Wärmefalle aufgefasst werden kann. Gleichzeitig geht dadurch der Wärmefluss in die Stratosphäre zurück und führt im Verbund mit der dortigen Ausstrahlung zur Abkühlung. Man spricht vom zusätzlichen (!) anthropogenen „Treibhauseffekt“. Der

schon existente natürliche „Treibhauseffekt“, der übrigens nach konventioneller Rechnung die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur um 33 °C erhöht (von theoretisch -18 °C auf beobachtete +15 °C) wird dagegen vor allem vom Wasserdampf (H<sub>2</sub>O) getragen. Er spielt beim anthropogenen Treibhauseffekt direkt kaum eine Rolle, weil der Mensch beispielsweise mit der Weltozeanverdunstung auch nicht annähernd konkurrieren kann, wohl aber in-

direkt, weil wärmere Ozeane durch erhöhte Verdunstung mehr Wasserdampf in die Atmosphäre bringen.

Der oben zweitgenannte anthropogene Effekt, nämlich die – ebenfalls im globalen Mittel – zu einer Abkühlung der unteren Atmosphäre führende Anreicherung mit Sulfataerosolen (siehe u. A. [1], [2]) ist schwieriger zu verstehen. Sie beruht letztlich darauf, dass dadurch vor allem die Sonneneinstrahlung geschwächt wird, auch

wenn im Einzelnen die Vorgänge der Absorption und Streuung hinsichtlich Sonneneinstrahlung und terrestrischer Ausstrahlung zu berücksichtigen sind. Alle externen Einflüsse auf das Klimasystem werden in dieser Art und Weise zunächst in Form von Strahlungsantrieben an der Erdoberfläche bzw. (vom IPCC bevorzugt) in der gesamten Troposphäre (unterste Schicht der Atmosphäre bis im globalen Mittel ca. 10 km Höhe) abgeschätzt, wobei positive Antriebe dort zur Erwärmung und negative zur Abkühlung führen; vgl. Tab. 2. Diese Antriebe, die als erster Anhalt für die quantitative Wirkung der einzelnen anthropogenen bzw. natürlichen Klimafaktoren dienen, enthalten aber noch nicht die immer modifizierend wirkenden Wechselwirkungen im Klimasystem und insbesondere auch keine Rückkopplungen. Dies zu berücksichtigen, ist das Ziel überaus aufwändiger Klimamodellrechnungen. Dabei werden auch die regionalen Strukturen des Klimawandels (hinsichtlich aller relevanten klimatologischen Messgrößen) simuliert. Daneben gibt es auch statistische Modelle, insbesondere Regressionen und neuronale Netze, die jedoch nur bzgl. der großräumig gemittelten Temperaturänderungen belastbare Abschätzungen der Ursache-Wirkung-Mechanismen erlauben.

Aufgabe der – physikalischen wie statistischen – Klimamodelle ist es nun, zunächst für die Vergangenheit das Zusammenspiel der verschiedenen natürlichen und anthropogenen Einflüsse auf das Klimasystem zu simulieren. Abb. 9 zeigt auf physikalischer Basis, 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“; vgl. auch Tab. 2. Das IPCC [2] hält es daher für „extrem unwahrscheinlich“, dass diese rezente globale Erwärmung, die jedoch ähnlich Abb. 3 komplizierte regionale Strukturen aufweist, nicht anthropogen ist. In Tab. 2 sind zudem die statistisch (hier mittel neuronaler Netze) geschätzten Temperatursignale angegeben, wobei ein Klimasignal als Reaktion auf eine bestimmte Ursache (Antrieb) definiert ist. Die Summe der Signale ergibt die gesamte Klimareaktion (in Überlagerung der in unterschiedlichen zeitlichen Größenordnungen wirksamen Strukturen). Die anthropogen interpretierten Temperatursignale sind bei solchen statistischen Abschätzungen den phy-

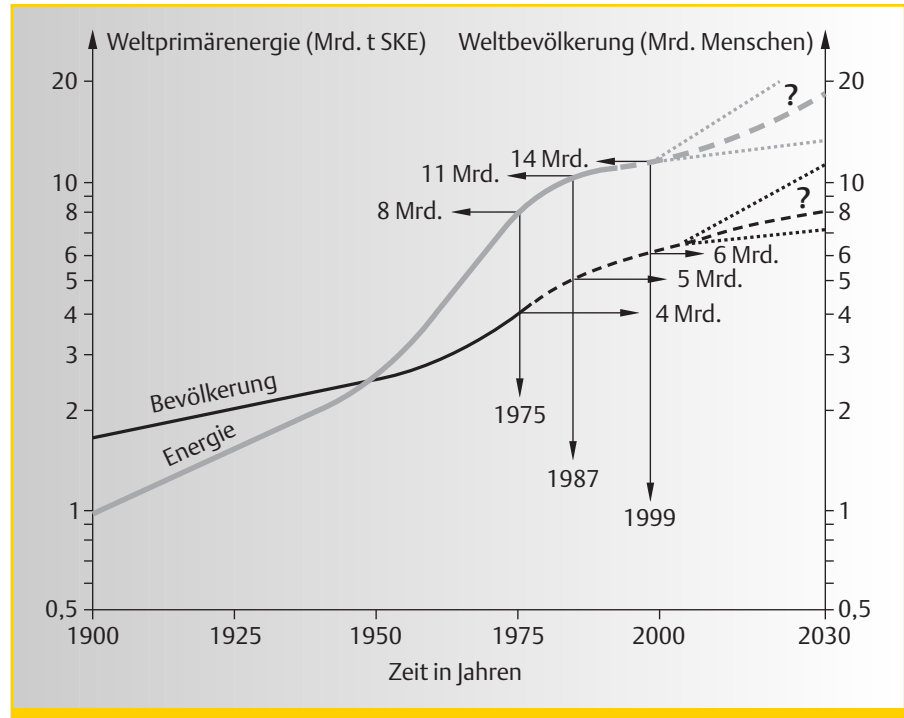


Abb. 8: Anstieg der Weltbevölkerung und Weltprimärenergienutzung seit 1900 (viele Quellen, hier nach Schönwiese [1]). Die Zahlen für 2009 lauten: 6,8 Mrd. Menschen und rund 16-17 Mrd. t SKE.

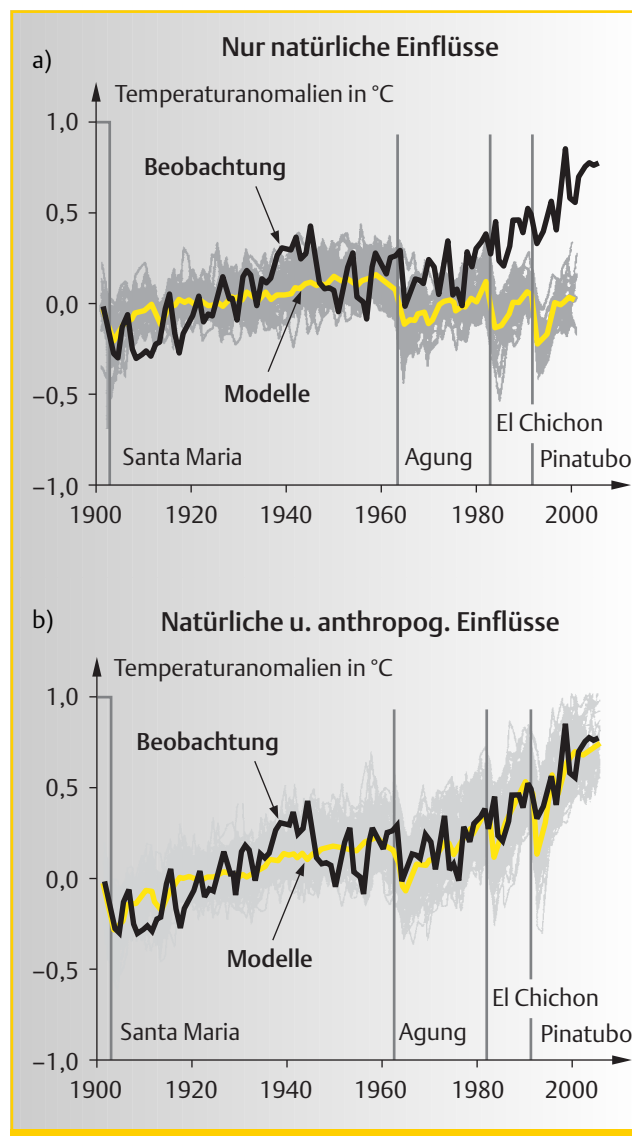
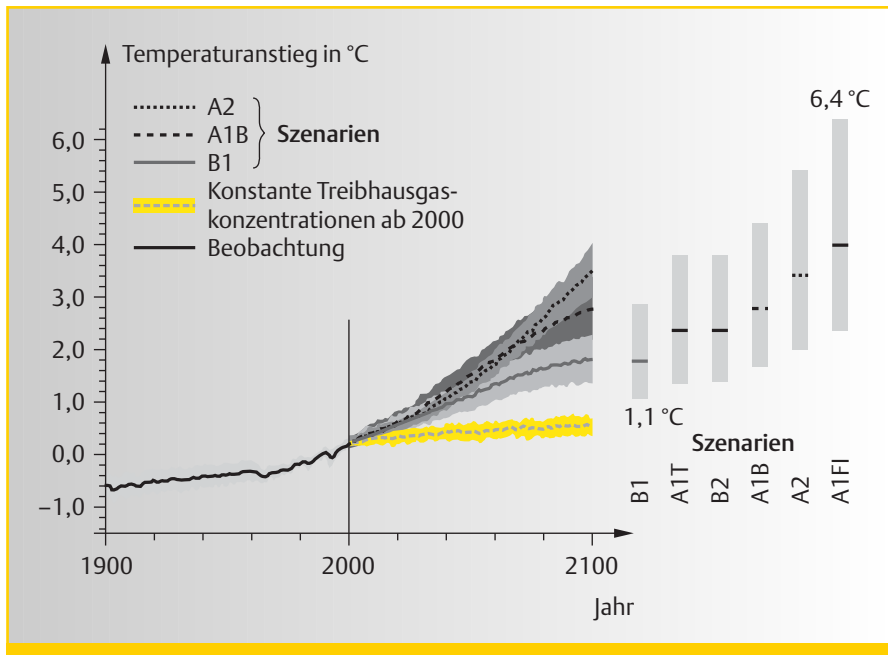


Abb. 9: Beobachtete global gemittelte bodennahe Temperaturanomalien (vgl. Abb. 2, hier aber relativ zu 1901-1950) 1900-2005, jeweils schwarz, und Reproduktion durch eine Vielzahl von (physikalischen) Klimamodellen, die nur natürliche Einflüsse (a)) bzw. auch anthropogene Einflüsse (b) berücksichtigen. Die mittleren Modellsimulationen sind dick blau bzw. rot eingezeichnet (IPCC [2]).





**Abb. 10:** Global gemittelter bodennaher Temperaturanstieg 1900-2000 (vgl. Abb. 2 und 9, hier relativ zu 1980-1999), der hinsichtlich des Langfristtrends als weitgehend anthropogen interpretiert wird, und erwartete weitere Entwicklung bis 2100 aufgrund einer Vielzahl von Klimamodellrechnungen, die von einigen ausgewählten Szenarien (genannt B1 usw.) der anthropogenen Emission klimawirksamer Spurengase ausgehen (IPCC [2]).

sikalisch simulierten sehr ähnlich, so dass von einer gegenseitigen Verifikation (physikalisch über Prozesse, statistisch über Beobachtungen) gesprochen werden kann. 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 die Rolle der Menschheit ist künftig alles andere als sicher. Man behilft sich daher so, dass natürliche Mechanismen, soweit sie nicht mit den anthropogenen Einflüssen wechselwirken, ganz ausgespart bleiben und alter-

native 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 szenariengestützten Klimamodellprojektionen.

Die Abb. 10 zeigt die Ergebnisse solcher Modellrechnungen. Daraus ist nicht nur ersichtlich, dass die verschiedenen Szenarien zu unterschiedlichen Erwartungen des Anstiegs der Globaltemperatur in der Zukunft führen, sondern auch, dass die verschiedenen Modelle wegen ihrer intern unterschiedlichen Prozessbehandlung sogar bei identischen Szenarien in ihren Ergebnissen streuen. Insgesamt ergibt sich bei der hier gezeigten Auswahl von Szenarien eine er-

wartete Erhöhung der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur zwischen 1,1 °C und 6,4 °C bis zum Jahr 2100 (IPCC [2]). Zu diesen Unsicherheiten kommen noch die der regionalen Strukturen des anthropogenen Klimawandels, obwohl sich darin einige Ähnlichkeiten mit den bereits eingetretenen Trends erkennen lassen (IPCC [2]).

Wie wird nun der künftige Klimawandel in Deutschland in Erscheinung treten? Dazu gibt es einige regionale Klimamodellrechnungen, wobei hier nur die Simulationen des Modells „REMO“ des Hamburger Max-Planck-Instituts für Meteorologie [14] ausgewählt sind („eingebettet“ in das dortige globale Klimamodell). Die wichtigsten Projektionen dieses regionalen Modells sind in Kasten 2 zusammengestellt.

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- und Ostsee) auf verstärkten Tourismus hoffen können sowie vielerorts die Vegetationsperiode und somit die Zeit landwirtschaftlicher Nutzung potentiell länger wird. Aber gerade diesem letztgenannten Vorteil kann durch die mit Hitzesommern verbundene Dürre entgegenwirken. 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/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 könnten besonders betroffen sein, erstere durch Dürre und somit Engpässe bei der Wasserversorgung, letztere wenn sich

**Kasten 2:** Summarische Auflistung der Klimamodellprojektionen für das 21. Jahrhundert in Deutschland (annähernd 2100 gegenüber 2000) mit Hilfe des regionalen Klimamodells „REMO“ (nach Jacob [14], ergänzt).

#### Übersicht der wichtigsten Charakteristika klimawirksamer Spurengase

- Weitere Erwärmung in allen Jahreszeiten, im Jahresmittel ca. 2,5 - 3,5 °C, Maxima mit über 4 °C im Süden bzw. Winter.
- Regional unterschiedliche Niederschlagsumverteilungen mit Zunahmen um ca. 10 - 30 % im Winter und Abnahmen ähnlichen Ausmaßes im Sommer; Frühling und Herbst moderate Zunahmen.
- Häufigere und teilweise auch intensivere Extremereignisse wie insbesondere Hitze- und Trockensommer, winterliche (und herbstliche) Starkniederschläge (mit Überschwemmungsgefahr, dies z. T. auch im Sommer); Hagelgefahr schwer abschätzbar, zumindest aber nicht abnehmend.
- Beim Wind keine markanten Trends, Winter- und Herbst-Stürme eventuell seltener (da die Sturmbahnen dazu neigen, sich polwärts zu verlagern).

der 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. Neuerdings werden auch die negativen ökonomischen Folgen des Klimawandels häufiger thematisiert (siehe z. B. [15]), wonach Zuwarten ohne Handeln sehr viel teurer werden kann als Handeln.

Was aber ist zu tun? Da das Klima mit erheblicher Zeitverzögerung auf die anthropogene Beeinflussung reagiert, wird uns zunächst nichts anderes übrig bleiben, als uns an den bereits unvermeidlichen weiteren Klimawandel und seine Auswirkungen anzupassen, auch wenn das nicht immer einfach sein wird. Dabei reichen die Zeitverzögerungen von einigen Jahrzehnten, beispielsweise beim in Mitteleuropa zu erwartenden Klimawandel (Temperatur- und Niederschlagseffekte), bis zu Jahrhunderten beim Meeresspiegelanstieg.

Um aber diesen Klimawandel nicht völlig ausufern zu lassen, sind zugleich baldige und wirkungsvolle Klimaschutzmaßnahmen erforderlich. 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 sogenannte Kyoto-Protokoll (COP3, [16]) 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, werden derzeit im EU-Rahmen Reduktionsziele von 20-30 % bis 2020 anvisiert, in Deutschland um 40 % [17],[18]. Längerfristig, nämlich bis 2050, hält das IPCC [2] allein beim CO<sub>2</sub> eine Minderung von 50-85 % für erforderlich. Leider kommt man bei diesen Zielsetzungen derzeit nicht voran, wie die 15. Konferenz (COP15, Dez. 2009) gezeigt hat.

Im Detail gibt es sicherlich keinen Königsweg. Vielmehr sind umfangreiche Maßnahmenpakete angesagt, um diese ehrgei-

zigen Ziele zu erreichen. Kurz aufgelistet sei folgendes:

- Steigerung der Energieeffizienz (Wirkungsgrade, Dämm- und Regeltechnik, sinnvolle Kraft-Wärme-Kopplung, usw.);
- Substitution (zumindest teilweise) kohlenstoffhaltiger Energieträger (Kohle, Öl, Gas) durch Alternativen, kürzerfristig auch Schwerpunktverlagerung in Richtung Gas.
- Sequestrierung (unterirdische Lagerung) des CO<sub>2</sub> aus der Energienutzung (auch CCS = Carbon Capture and Storage genannt), sobald dies technologisch einsatzreif ist und sich als genügend sicher herausgestellt hat (selbst dann aber nur für wenige Jahrzehnte möglich);
- Maßnahmen im Verkehrsbereich (geringere PKW-/LKW-Nutzung und sparsamere Fahrzeuge).
- Vegetationsschutz (mindestens Erhalt, möglichst aber noch Ausdehnung, insbesondere Wiederaufforstung).
- Ökonomische Maßnahmen (insbesondere Emissionshandel).

Diese Maßnahmen und entsprechenden technologischen Entwicklungen dienen schließlich nicht nur dem Klimaschutz, sondern beinhalten auch positive ökonomische Begleiteffekte (z. B. im Bereich alternativer Energien) in Form von Marktchancen für die Zukunft.

#### Literatur

- [1] Schönwiese, C.-D.: *Klimatologie*. 3. Aufl., Ulmer (UTB), Stuttgart 2008.
- [2] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., et al., eds.): *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Cambridge Univ. Press, Cambridge 2007 (Internet: <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>).
- [3] Häberli, W., Maisch, M.: *Klimawandel im Hochgebirge*, in Endlicher, W., Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.): *Der Klimawandel* (s. oben), S. 98-107. 2007
- [4] Rapp, J.: *Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland*, Bericht Nr. 212, Deut. Wetterdienst, Selbstverlag, Offenbach 2000.
- [5] Schönwiese, C.-D., Rapp, J.: *Climate Trend Atlas of Europe, Based on Observations 1891-1990*, Kluwer, Dordrecht 1997.
- [6] Beck, C. et al.: *Entwicklung einer Beobachtungsdatengrundlage für DEKLIM und statistische Analyse der Klimavariabilität*, Bericht Nr. 6, Inst. Atmosph. Umwelt Univ. Frankfurt/M. 2007
- [7] Schönwiese, C.-D., Janoschitz, R.: *Klima-Trendatlas Deutschland 1901-2000*. Bericht Nr. 4, 2. Aufl., Inst. Atmosph. Umwelt Univ. Frankfurt/M. 2008.
- [8] Schönwiese, C.-D., Janoschitz, R.: *Klima-Trendatlas Europa 1901-2000*. Bericht Nr. 7, Inst. Atmosph. Umwelt Univ. Frankfurt/M. 2008.
- [9] Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft: *Topics, Jahresrückblicke Naturkatastrophen* (jährlich erscheinende Broschüre), Eigenverlag, München 2003, ..., 2009

[10] Jonas, M., Staeger, T., Schönwiese, C.-D.: *Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen* (Schwerpunkt Deutschland), Bericht Nr. 1, Inst. Atmosph. Umwelt Univ. Frankfurt/Main 2005.

[11] Schönwiese, C.-D., Trömel, S.: *Mehr extreme Niederschläge in Deutschland?* Naturwiss. Rdsch., 59, (2007) 194-199.

[12] Cubasch, U., Kasang, D.: *Anthropogener Klimawandel*, Klett-Perthes, Gotha-Stuttgart 2000.

[13] CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) 2009: Internet, <http://cdiac.esd.ornl.gov>

[14] Jacob, D.: *Klimaänderung in Europa: Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit*, in Hiller, B., Lange, M.A. (Hrsg.): *Globale Umweltveränderungen und Wetterextreme – Was kostet der Wandel?* Zentrum für Umweltforschung der Universität Münster, Heft 17 (2007), S. 87-100.

[15] Stern, N.: *The Stern Review: The Economics of Climate Change*, Cambridge Univ. Press, Cambridge 2006.

[16] COP3 (Third Conference of the Parties, Kyoto) 1997: Internet <http://unfccc.int/cop3/>

[17] WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen): *Über Kioto hinaus denken: Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert* (Sondergutachten und Presseerklärung vom 25.11. 2003)

[http://www.wbgu.de/wbgu\\_sn2003\\_presse.html](http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_presse.html).

[18] WBGU: *Welt im Wandel, Sicherheitsrisiko Klimawandel*, Springer, Berlin-Heidelberg 2008.

[18] Jones, P.D., et al.: *Surface air temperature and its changes over the past 150 years*. Rev. Geophys., 37 (1999), 173-199; update Internet 2009:

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

[20] Deutscher Wetterdienst (DWD): *Klimainformationen*, Internet <http://www.dwd.de> → Klima und Umwelt → Klimamonitoring.

[21] McCormick, P.M. et al.: *Atmospheric effect of the Mt. Pinatubo eruption*, Nature 373 (1995) 399-404.

[22] Schönwiese, C.-D., Walter, A., Brinckmann: *Statistical assessments of anthropogenic and global climate forcing. An update*. Meteorol. Z., N.F. (2010), accepted.

[23] Kiehl, J.T., Trenberth, K.E.: *Earth's annual global mean energy budget*, Bull. Am. Meteorol. Soc. 78 (1997), 197-208.

[24] Lozán, J.L., Graßl, H., Hupfer, P. (Hrsg.): *Warnsignal Klima, Wissenschaftliche Fakten, Wissenschaftliche Auswertungen + GEO*, Hamburg 1998; engl. überarbeitete Ausgabe 2001.

#### Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese, Goethe-Universität, Institut für Atmosphäre und Umwelt, Postfach 11 1932, D-60054 Frankfurt a. M., E-Mail: [schoenwiese@meteor.uni-frankfurt.de](mailto:schoenwiese@meteor.uni-frankfurt.de), <http://www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima>