

# **Klimawandel und Energiewirtschaft**

**- Literaturlauswertung -**

**4. neu bearbeitete Auflage  
von Dr. rer. nat. Rüdiger Beising  
Oktober 2010**

Herausgeber: VGB PowerTech e.V.  
**VGB PowerTech Service GmbH**  
Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften  
Postfach 10 39 32, D-45039 Essen  
Tel. +49-(0)201 8128-200  
Fax +49-(0)201 8128-329  
e-mail: mark@vgb.org  
e-mail des Verfassers: ruediger.beising@t-online.de



## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>3</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>8</b>
<b>1 Das Klima der Erde</b>	<b>18</b>
1.1 Atmosphäre	19
1.2 Hydrosphäre	21
1.3 Kryosphäre	21
1.4 Geosphäre ( Litho- u.Pedosphäre)	21
1.5 Biosphäre	22
<b>2 Der Kohlenstoffkreislauf</b>	<b>24</b>
2.1 Geosphäre	25
2.2 Ozean	25
2.3 Atmosphäre	26
2.4 Biosphäre	26
<b>3 Strahlungshaushalt und Treibhauseffekt</b>	<b>28</b>
3.1 Strahlungsbilanz	28
3.2 Strahlungsantrieb	28
3.3 Der Treibhauseffekt	30
<b>4 Natürliche Einflussfaktoren auf das Klima</b>	<b>34</b>
4.1 Sonne	34
4.1.1 Solarstrahlung	35
4.1.2 Kosmische Partikelstrahlung und Erdmagnetfeld	39
4.2 Vulkane	43
4.3 Nordatlantische Oszillation - NAO	45
4.4 Südliche Oszillation El Niño – ENSO	49
4.5 Thermohaline Zirkulation (THC), Meridionale Umwälzbewegung (MOC)	50
4.6 Natürliche Treibhausgase	52
<b>5 Anthropogene Einflussfaktoren auf das Klima</b>	<b>54</b>
5.1 Anthropogene Treibhausgase	54
5.1.1 Wasserdampf (H <sub>2</sub> O)	59
5.1.2 Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	60
5.1.3 Methan (CH <sub>4</sub> )	64
5.1.4 Distickstoffoxid, Lachgas (N <sub>2</sub> O)	67
5.1.5 Ozon	68
5.1.6 F-Gase und Halogenkohlenwasserstoffe (FKW, FCKW, HFKW)	69
5.1.7 Schwefelhexafluorid (SF <sub>6</sub> )	71
5.1.8 Indirekte ozonbildende Treibhausgase	71
5.1.8.1 Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) ohne Distickstoffoxid	71
5.1.8.2 Organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC)	72
5.1.8.3 Kohlenmonoxid (CO)	73
5.2 Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	74
5.3. Aerosole	75
5.4 Landnutzungsänderungen	81
<b>6 Klimabeobachtungen</b>	<b>84</b>
6.1 Temperaturentwicklung in Bodennähe	85
6.1.1 Entwicklung der Temperatur im globalen Mittel	86
6.1.2 Erwärmungstrends der Landoberflächentemperatur aus Satellitendaten	89
6.1.3 Die vergangenen 650 000 Jahre - Klimageschichte	89
6.1.4 Die vergangenen 10 000 Jahre - Klimageschichte	90
6.1.5 Die vergangenen 1000 Jahre - Die Hockeyschläger-Diskussion	91
6.1.6 Urbane Wärmeinseln	94

6.2	Regionale Änderungen des Klimas	95
6.2.1	Klimatrend in Asien	96
6.2.2	Klimatrend in Europa und Deutschland	97
6.3	Troposphäre – Satellitenmessung	101
<b>7</b>	<b>Forschungseinrichtungen und -programme</b>	<b>105</b>
7.1	IPCC	105
7.1.1	Aktuelle öffentliche Debatte über das IPCC (2010)	106
7.1.2	Die Arbeitsgruppen des IPCC	108
7.1.3	Wesentliche Ergebnisse des 4. IPCC Berichtes (AR4)	111
7.2	Forschungsprogramme	112
<b>8</b>	<b>Klimamodelle und Modellergebnisse</b>	<b>114</b>
8.1	Klimamodelle	114
8.1.1	Gekoppelte atmosphärische Zirkulationsmodelle	116
8.1.2	Erdsystemmodelle	118
8.1.3	Unsicherheiten in der Klimamodellrechnung	120
8.2	Ergebnisse der Modellrechnungen	122
8.2.1	Emissionsszenarien	122
8.2.2	Klimaprojektionen für den AR4 (2007) - Modellergebnisse	124
8.2.3	Regionale Modellergebnisse	126
8.2.4	Nachweis des Treibhauseffektes - Einflussfaktoren für die Modellrechnung	128
<b>9</b>	<b>Auswirkungen der Klimaänderung</b>	<b>132</b>
9.1	Temperaturextreme	133
9.2	Niederschlag, Hochwasser	134
9.3	Stürme und Hurrikane	135
9.3.1	Stürme	135
9.3.2	Hurrikane (tropische Wirbelstürme)	138
9.4	Eis	142
9.4.1	Gletscher	142
9.4.2	Antarktis	144
9.4.3	Arktis	147
9.4.4	Grönland	150
9.5	Ozean	153
9.5.1	Erwärmung und Versauerung der Meere	153
9.5.2	Meeresspiegelanstieg	155
9.6	Klimafolgen für Mensch, Natur und Umwelt	156
9.6.1	Schaden – Statistik	158
9.6.2	Gesundheit	161
9.6.3	Ernährung	163
9.6.4	Anpassungsstrategien	164
9.7	„Gefährliche Klimaänderung“	165
9.8	Nutzen	167
9.9	Kosten – Ökonomische Auswirkungen	167
<b>10</b>	<b>Emissionen aus Energieumwandlung und Energietransport</b>	<b>170</b>
10.1	Emissionen von Wasserdampf, Abwärme	171
10.2	Emissionen von Kohlendioxid	172
10.3	Emissionen von Methan	177
10.4	Emissionen von Distickstoffoxid	178
10.5	Emissionen von Ozon	179
10.6	Emissionen von Stickoxid	179
10.7	Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC)	180
10.8	Emissionen von Kohlenmonoxid	181
10.9	Emissionen von Schwefelhexafluorid	181

10.10	Emissionen von Schwefeldioxid	181
10.11	Emissionen von Feinstaub	181
<b>11</b>	<b>Geoengineering, Aufforstung</b>	<b>183</b>
11.1	Eisendüngung zum Algenwachstum	183
11.2	Aufforstung	184
11.3	Bodenbearbeitung	185
11.4	Techniken zur Änderung der Solareinstrahlung	185
<b>12</b>	<b>Kohlendioxidminderung in der Energiewirtschaft</b>	<b>186</b>
12.1	Wirkungsgradverbesserung	187
12.2	Erneuerbare Energien	189
12.2.1	Derzeitiger Stand	189
12.2.2	Zukünftige Entwicklung	192
12.3	Kernenergie	194
12.4	Emissionshandel	195
12.5	Kohlendioxidabscheidung und –speicherung (CCS)	197
12.5.1	Abscheidung von CO <sub>2</sub>	199
12.5.2	Transport des abgeschiedenen CO <sub>2</sub>	200
12.5.3	Speicherung	201
12.5.4	Umwandlung/Nutzung von CO <sub>2</sub>	202
12.5.5	Kostenabschätzung	203
<b>13</b>	<b>Resümee</b>	<b>205</b>
<b>14</b>	<b>Glossar</b>	<b>207</b>
<b>15</b>	<b>Abkürzungen</b>	<b>220</b>
<b>16</b>	<b>Internetadressen</b>	<b>223</b>
<b>17</b>	<b>Anhang – Stellungnahmen zum Klimawandel</b>	<b>225</b>
<b>18</b>	<b>Ausgewählte Literatur</b>	<b>227</b>
18.1	Bücher, Broschüren	227
18.2	Artikel (Auswahl der Literatur v.a. zeitlich nach dem IPCC Bericht 2007)	228

## Vorwort zur 4. Auflage

2007 wurde der 4. Sachstandsbericht des IPCC (AR4) veröffentlicht. Die Ergebnisse der Literaturrecherche von 2006 wurden in weiten Bereichen bestätigt. Die vorliegende 4. Auflage der Literaturrecherche (Update 2010) wurde nach Auswertung des IPCC Berichtes 2007 und der Fachliteratur bis Oktober 2010 erstellt. Da die Zahl der Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Klimawissenschaft sich in den letzten Jahren vervielfacht hat, konnte nur eine Auswahl ausgewertet und in die Literaturrecherche aufgenommen werden. 2009 und 2010 sind jedoch einige wissenschaftliche Updates von angesehenen Fachwissenschaftlern aus verschiedenen Ländern erschienen, deren Aussagen in dieses Update eingeflossen sind. Es handelt sich hierbei um folgende Beiträge, die wiederum eine große Zahl von Fachveröffentlichungen zitieren:

The State of the Climate 2009, (*Arndt 2010*),

The Copenhagen Diagnosis, Nov 2009, (*Copenhagen Diagnosis 2009*)

Synthesis Report from CLIMATE CHANGE, (*Synthesis Report 2009*)  
 AMAP, (2009). Update on Selected Climate Issues of Concern

Physical Climate Science since IPCC AR4, A brief update on new findings between 2007 and April 2010, (*TemmaNord 2010*)

News in Climate Science Since IPCC 2007, (*van Dorland 2009*)

New Climate Science 2006–2009 A brief review of research into the physical science basis of the climate change issue since IPCC AR4/WG I of 2007 (*Rummukainen 2009*).

Die 4. Auflage wurde von Dr. Rüdiger Beising erstellt ([ruediger.beising@t-online.de](mailto:ruediger.beising@t-online.de)).

4.11.2010

## Vorwort zur 3. Auflage

Die Diskussion um den Klimawandel beschäftigt die Energiewirtschaft seit Jahrzehnten, auch wenn sie in Deutschland nur mit etwa 1 % zur weltweiten Kohlendioxidemission beiträgt.

Die Kohlendioxidemission, die zwangsläufig mit der Verbrennung fossiler Brennstoffe einhergeht, trägt ohne Zweifel zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Von wesentlicher Bedeutung sind deswegen, neben der Höhe dieses Beitrags, seine möglichen Auswirkungen.

Bereits Ende der 80'er Jahre des vergangenen Jahrhunderts hat eine Arbeitsgruppe „CO<sub>2</sub> und Klima“ des VDEW eine erste Literaturlauswertung zu diesem Thema durchgeführt. Aufgrund der ständig anwachsenden wissenschaftlichen Erkenntnisse sind 1991 und 1995 Updates zu dieser Literaturlauswertung erstellt worden. Das Thema hat jedoch weiterhin an Bedeutung zugenommen, zum einen aufgrund einer Vielzahl neuer Erkenntnisse und zum anderen aufgrund des 2005 in Kraft getretenen Kyoto-Protokolls. Die Energieerzeuger wurden mit den politischen Entscheidungen der Festlegung von Minderungszielen und dem inzwischen auf EU-Ebene eingeführten Emissionshandel vor neue Aufgaben gestellt. Deswegen war ein erneutes Update dringend geboten.

Die vorliegende Arbeit stellt eine vollständige Neubearbeitung dar, da eine Vielzahl neuer Erkenntnisse dies erforderlich machte. Ziel der Studie ist die grundlegende Darstellung der wissenschaftlichen Zusammenhänge sowie des aktuellen Standes der wissenschaftlichen Diskussion um die Klimaproblematik. Auf die Entwicklung der globalen, nationalen und sektoralen klimarelevanten Emissionen sowie auf die Möglichkeiten zur Minderung der Kohlendioxidemissionen aus der Energiewirtschaft wird ebenfalls ausführlich eingegangen. Für die Literaturrecherche wurden auf Grundlage des 3. Sachstandsberichtes des IPCC 2001 (TAR) zahlreiche Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften und in Institutsberichten bis Oktober 2006 ausgewertet. Nur die für die vorliegende Arbeit wichtigsten sind im Literaturverzeichnis aufgenommen.

In unserer von den Medien geprägten Zeit ist es nicht immer leicht zu erkennen, wie weit die Fortschritte in der Wissenschaft tatsächlich gediehen sind. Immer wieder stiften Meldungen über anscheinend neue wissenschaftliche Erkenntnisse Verwirrung, insbesondere wenn sie den bisher vermuteten Zusammenhängen widersprechen oder kurze Zeit später wieder relativiert werden. Auch die Wissenschaft ist inzwischen vom Medienrummel erfasst, und jede neue Erkenntnis wird mit oft überzeichneten Pressemitteilungen an die Öffentlichkeit gebracht.

Grundsätzlich konnte beobachtet werden, dass in den vergangenen 25 Jahren die Klimawissenschaftler eine größere Variabilität im natürlichen Klimageschehen der vergangenen 1000 Jahre festgestellt haben, aber auch eine Verstärkung der Indizien, die auf einen anthropogenen Beitrag zu den derzeit stattfindenden Klimaänderungen hinweisen.

Die Energiewirtschaft ist von einem Klimawandel in vielfältiger Weise betroffen, nicht nur durch die höheren Kosten einer CO<sub>2</sub>-armen bzw. -freien Energieerzeugung oder durch die Kosten der Emissionszertifikate, sondern auch durch die Auswirkungen des Klimawandels selbst. So verringern höhere Temperaturen zwar im Winter die Zahl der Heizztage, erhöhen jedoch im Sommer den Stromverbrauch durch den stärkeren Betrieb von Klimaanlageanlagen. Eine veränderte Wasserführung der Flüsse – sowohl Niedrigwasser als auch Hochwasser - kann Auswirkungen auf die Stromerzeugung der Wasserkraftwerke haben und auch auf den Brennstofftransport per Schiff zu den Kraftwerken. Auch der Netzbetrieb kann betroffen sein. Zu hohe Temperaturen verursachen an den Leitungen wegen der Längenausdehnung Probleme, Vereisungen wie im Winter 2005/06 führen zu Leitungsbrüchen und Stromausfällen. Eine Häufung von Sturmweatherlagen führt z. B. durch umfallende Bäume und Strommasten ebenfalls zu Stromausfällen.

Das Internet hat sich zu einem hervorragenden Kommunikationsmedium entwickelt, so dass nahezu alle wissenschaftlichen Literaturveröffentlichungen auch im Internet recherchiert werden können. Internationale Fachtagungen können z. T. live bzw. wenige Tage später im Internet gehört und nachgelesen werden. Hochschullehrer stellen ihre Vorlesungen ins Internet ein, und Institute geben ihre neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse unmittelbar dort weiter. Das IPCC – der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen - das bei der wissenschaftlichen Diskussion um den Klimawandel eine herausragende Rolle spielt, veröffentlicht ebenfalls seine Berichte im Internet. Auch die USA, die zwar nicht das Kyoto-Protokoll unterschrieben haben, jedoch mit Hochdruck und großem finanziellen Aufwand an der Erforschung und Klärung der wissenschaftlichen Zusammenhänge arbeiten, stellen die Ergebnisse ihres sehr umfangreichen nationalen Forschungsprogramms zunächst zur Begutachtung und dann nach Aufnahme von Korrekturvorschlägen endgültig ins Internet ein. Die Zahl der Fachveröffentlichungen hat sich aufgrund der intensiven Forschungsarbeit auf dem Sektor Klimawandel in den vergangenen Jahren vervielfacht.

Daten über die Emissionen der Treibhausgase, die atmosphärischen Konzentrationen der Spurengase, die Veränderungen des Klimas, die Schwankungen der Solaraktivität und vieles mehr können direkt im Internet von den entsprechenden internationalen Organisationen abgerufen werden.

Außerdem finden sich im Internet einige aufschlussreiche Diskussionsforen, die sich mit der Klimaproblematik befassen. Auch Klimawissenschaftler haben derartige Fachforen gegründet, die schnell auf neue Erkenntnisse reagieren und diese erläutern und zur Diskussion stellen. Die wichtigsten Internetadressen sind im Kap. 16 zusammengestellt.

Einige der verwendeten Abbildungen sind, da sie oft sehr anschaulich die komplizierten wissenschaftlichen Zusammenhänge darstellen, mit freundlicher Zustimmung des Verfassers, Herrn Dr. Dieter Kasang, den Klimaseiten des Hamburger Bildungsservers ([www.klimawissen.de](http://www.klimawissen.de)) entnommen. Andere stammen aus den im Internet veröffentlichten Originalarbeiten bzw. den Internetseiten der Institute und Organisationen.

Die Literaturrecherche 2006 wurde erstellt von Dr.rer.nat. R. Beising (eh. EnBW) und begleitet von einer Projektgruppe (Dipl.-Met. A. Böhringer, EnBW, Dipl.-Met. Michael Wilhelm, RWE, Dr.rer.nat. Gerd-Rainer Weber, GVSt, Dipl.-Phys. Volker Hamacher, VGB).

## Zusammenfassung

Die Literaturrecherche fasst die wissenschaftlichen Grundlagen für das Verständnis der Klimaänderungen zusammen, beschreibt die natürlichen und anthropogenen Einflussfaktoren, den Stand der Klimabeobachtungen, die Forschungsprogramme und die Klimamodelle mit ihren wichtigsten Ergebnissen. Nach der Beschreibung der eingetretenen bzw. projizierten Auswirkungen der Klimaänderung werden die klimarelevanten Emissionen und deren Beitrag aus der Energieumwandlung aufgeführt. Die allgemeinen Möglichkeiten zur Kohlendioxidminderung wie Aufforstung und die speziellen Aktivitäten der Energiewirtschaft (Wirkungsgradverbesserung, erneuerbare Energien, CO<sub>2</sub>-Abscheidung) werden abschließend behandelt.

**Die Fachliteraturlauswertung 2010 hat das Gesamtbild gegenüber 2006 nur wenig geändert:**

Der **Konsens der Fachwissenschaftler**, dass der Mensch mit seinen Aktivitäten maßgeblich an den Klimaveränderungen der vergangenen 30 Jahre beteiligt ist, wurde eher verstärkt.

**Das IPCC** bleibt als oberstes fachwissenschaftliches Gremium „Weltklimarat“ anerkannt, wenn auch einiger Verbesserungsbedarf erkannt wurde.

Die wenigen 2009 entdeckten Fehler im 2. Teil des IPCC Berichtes wurden korrigiert. Die Strukturen und Kontrollen zur Fehlervermeidung sollen für den 5. Bericht verbessert werden.

Der **Vorwurf der Datenmanipulation** der Climatic Research Unit (CRU) der britischen Universität in East Anglia nach Veröffentlichung von „gehackten“ e-mails wurde von unabhängigen Kommissionen zurückgewiesen.

**Einige Unsicherheiten konnte beseitigt werden:**

- Die Sonne und die kosmische Strahlung sind nicht für die Klimaerwärmung der vergangenen 30 Jahre verantwortlich.
- Die Troposphäre hat sich im gleichen Maße erwärmt, wie die bodennahe Atmosphäre.
- Die Stratosphäre hat sich aufgrund des Treibhauseffektes und des Ozonlochs abgekühlt.
- Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ist angestiegen.
- Die Aussage, dass die vergangenen 30 Jahre die wärmste Periode war seit 1000 Jahren, wurde bestätigt.
- Der urbane Wärmeinseleffekt spielt praktisch keine Rolle.

Die **Konzentration an Treibhausgasen** in der Atmosphäre steigt ständig weiter an.

Die **Emissionen an Treibhausgasen** haben sich in den vergangenen Jahrzehnten stark erhöht. Die Industriestaaten haben ihre Emissionen vermindert. Der hohe Anstieg in den Entwicklungsländern wird bald dazu führen, dass sie die Industriestaaten überholt haben.

Die **globale Temperatur** ist in den vergangenen Jahrzehnten mit ca. 0,15° C/Dekade weiter angestiegen.

Die **Klimamodelle** wurden erheblich verbessert, dennoch verbleiben viele Unsicherheiten. Alle Modellrechnungen ergeben jedoch mit weiter steigenden Treibhausgasemissionen einen Temperaturanstieg zwischen 1 und 6° C bis Ende dieses Jahrhunderts,

Ohne **deutliche Reduzierung der Treibhausgasemissionen** in den Industrie- und Entwicklungsländern in den nächsten Jahrzehnten ist das 2 Grad Ziel zur Vermeidung von großen Schäden für die Volkswirtschaft in vielen Staaten nicht zu erreichen.

Die **Energiewirtschaft** setzt weltweit verstärkt auf die Minderung der Treibhausgase. Erneuerbare Energien hatten 2009 in Deutschland bereits einen Anteil von über 16 %. Ein weiterer Ausbau ist vorgesehen. Die Wirkungsgrade der Kraftwerke werden ständig verbessert. An der Kohlendioxidabscheidung wird intensiv gearbeitet.

## **Wissenschaftliche Grundlagen**

Das **Klima** wird als Mittelwert des Wetters über eine Zeitspanne von 30 Jahren definiert. Neben den statistischen Kenngrößen wie mittlere Jahrestemperatur und -niederschlag werden auch Eintrittswahrscheinlichkeit und Häufigkeit von Ereignissen (mittlere Andauer von Dürren, Sturmhäufigkeit, Häufigkeit von Starkniederschlägen,...) aufgeführt. Das Klima wird bestimmt durch die unterschiedliche Einstrahlung der Sonne, durch Vulkanismus, Winde und Meeresströmungen und deren komplexe Wechselwirkungen mit der Geo- und Biosphäre. Das Klimasystem besteht aus den Untersystemen Atmosphäre, Hydrosphäre (Ozean und Wasserkreislauf), Kryosphäre (Eis und Schnee), Biosphäre (Tiere und Pflanzen), Geosphäre (Boden und Gestein).

Die Verteilung des auf der Erde vorhandenen Kohlenstoffs auf einzelne Teilsysteme (z.B. Erdkruste, Ozeane, Pflanzen, Atmosphäre) sowie der Austausch von Kohlenstoff zwischen diesen Systemen wird als **globaler Kohlenstoffkreislauf** bezeichnet.

Die wichtigste Energiequelle der Erde ist die Sonne. Derzeit erreichen etwa  $1367 \text{ W/m}^2$  kurzwellige Sonnenstrahlung die Troposphäre. Die im thermischen Gleichgewicht aufgenommene Energie wird als Wärmestrahlung wieder an den Weltraum abgegeben. Verschiedene natürliche und anthropogene Faktoren beeinflussen den **Energiehaushalt der Erde**. Der Strahlungsantrieb ist ein Maßstab für den Einfluss eines natürlichen oder anthropogenen Faktors auf die Veränderung des Strahlungshaushaltes der Atmosphäre. Der Begriff „Treibhauseffekt“ beschreibt die Vorgänge in unserer Atmosphäre, die – ähnlich wie in einem Treibhaus – zu einer Erwärmung der Atmosphäre führen. Die Konzentrationserhöhung der so genannten Treibhausgase wie Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Lachgas, Ozon und die synthetischen Fluorchlorkohlenwasserstoffe in der Atmosphäre führt zu einer zusätzlichen Erwärmung.

**Klimaänderungen** können sich durch interne Wechselwirkungen im Klimasystem ergeben, ebenso ändern externe Faktoren wie Solarstrahlungsänderungen, Schwankungen der Erdbahnparameter und explosive Vulkanausbrüche unser Klima. Die anthropogenen Einflüsse durch Änderungen der Treibhausgaskonzentrationen, Aerosole, Ozonschicht und Landnutzung werden zu den externen Faktoren gerechnet. Zu den internen Einflussfaktoren zählen auch die großräumigen Änderungen der Schwingungszustände in der Atmosphäre.

### **Natürliche Einflussfaktoren auf unser Klima**

Die **Sonne** hat einen wesentlichen Einfluss auf das Klima der Erde. Der solare Energiefluss einschließlich seiner Schwankungen kann erst in den letzten ca. 30 Jahren von Satelliten aus direkt gemessen werden. Änderungen in der solaren Einstrahlung sind ein wichtiger Klimantrieb. Die Schwankungen der Sonnenaktivität zeigen sich in der Häufigkeit der Sonnenflecken. Sie sind häufiger, wenn die Sonne aktiv ist. Die Auswertung der Sonnenfleckenanzahl zeigt in den vergangenen 40 Jahren keinen Anstieg. Damit ist der globale Temperaturanstieg seit 1975 hiermit nicht zu erklären. Der **Sonnenwind** beeinflusst die kosmische Strahlung und damit die Bildung von Ionen in der Atmosphäre, die die Bildung von Wolken fördern könnten. Ein Zusammenhang mit Klimaänderungen konnte bisher nicht nachgewiesen werden.

Explosive **Vulkanausbrüche** emittieren große Mengen an Feststoffen und Gasen in die Atmosphäre, zum Teil bis in die Stratosphäre. Die Aerosole führen zu einer Strahlungsbilanzänderung und im Allgemeinen für 1 bis 2 Jahre zu einer Erwärmung der Stratosphäre und einer Abkühlung an der Erdoberfläche.

Die **Nordatlantische Oszillation** (NAO) ist eng verknüpft mit der **Arktischen Oszillation** (AO) und eines der dominierenden atmosphärischen Schwingungsmuster natürlicher Klimavariabilität auf der Nordhalbkugel. Sie beeinflusst insbesondere das Winterwetter in Europa und Nordostamerika erheblich. Stratosphärische und anthropogene Prozesse können die Phasen und Amplituden der NAO beeinflussen. Der mögliche anthropogene Beitrag ist noch nicht eindeutig geklärt.

Die Oberflächenströme des Ozeans sind zusammen mit den Tiefenströmen Teil eines alle drei Ozeane umspannenden Strömungssystems und bilden die so genannte **Meridionale Zirkulation (MOC)** bzw. die **Thermohaline Zirkulation (THC)**. Diskutiert wird die Gefahr des Abreißen dieses für unser Klima wichtigen „marinen Förderbands“. Neuere Modellsimulationen zeigen ein differenziertes Verhalten bei einer weiteren Erwärmung und eine geringe Gefahr des Abreißen des marinen Förderbandes und damit auch eines Ausbleibens des Golfstroms in den kommenden Jahrzehnten.

Die stärkste natürliche Klimaschwankung auf Zeitskalen von einigen Monaten bis Jahren ist das **El Niño/Southern Oscillation-Phänomen (ENSO)**. El Niño ist geprägt durch eine ungewöhnliche Erhöhung der Meeresoberflächentemperaturen entlang des Äquators von der peruanischen Küste bis in den zentralen Pazifik. Inwieweit die globale Erwärmung einen Einfluss auf El Niño hat, oder umgekehrt El Niño sich auf die globale Mitteltemperatur auswirkt, ist in der Wissenschaft trotz umfangreicher Modellrechnungen noch umstritten.

Die wichtigsten **natürlichen Treibhausgase** sind Wasserdampf,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$  und  $\text{N}_2\text{O}$ , die aufgrund ihres Absorptionsverhaltens in der Atmosphäre die bodennahe globale Mitteltemperatur von  $-18\text{ °C}$  auf ca.  $+15\text{ °C}$  anheben.

### **Anthropogene Einflussfaktoren**

Der Mensch ist Teil der Biosphäre und nimmt allein durch seine Existenz zwangsläufig Einfluss auf seine Umwelt und damit auch auf das Klimasystem.

Die wichtigsten anthropogenen Treibhausgase sind Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ), Ozon ( $\text{O}_3$ ), Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Fluorkarbone (FCKW, H-FKW) und  $\text{SF}_6$ . Ihr Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt beträgt zwischen ca. 4% bei  $\text{N}_2\text{O}$  und ca. 61 % bei  $\text{CO}_2$ . Die wichtige Rolle des Wasserdampfes wird in den Modellen über die Rückkoppelungsmechanismen berücksichtigt.

Der **Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ )-Pegel** ist seit Beginn der Industrialisierung um etwa 38 % gestiegen. Die jährliche Konzentrationszunahme in den letzten beiden Dekaden betrug etwa 0,4 %. Die globale mittlere Konzentration in der Atmosphäre erhöhte sich 2009 um ca. 2 ppm auf 386 ppm. Der Kohlendioxidanstieg seit Mitte des 19. Jahrhunderts ist auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen. Im Zeitraum 1960 - 2008 hat sich die  $\text{CO}_2$ -Emission auf 30,2 Mrd. t mehr als verdreifacht. Aufgrund der jährlichen Aufnahme von Kohlendioxid in der Biosphäre und dem Ozean von im Mittel 40 – 60 % wird der Konzentrationsanstieg deutlich abgebrems.

**Methan ( $\text{CH}_4$ )** ist das zweitwichtigste Treibhausgas. Seine Konzentration hat sich in der Atmosphäre seit Mitte des 18. Jahrhunderts um 150 % erhöht. Die Zuwachsraten haben sich in den vergangenen 15 Jahren deutlich abgeschwächt, steigen jedoch seit 2007 wieder an. Weltweit werden etwa 570 Mio. Tonnen jährlich emittiert, der Mensch trägt mit ca. 60 – 70 % hierzu bei. Der anthropogene Hauptanteil ist auf Rinderhaltung (30 %) und Reisanbau (10%), Bergbau, Öl- und Gasförderung (18 %) zurückzuführen. Weitere Anteile liefern Deponien und Biomasseverbrennung. Natürliche Quellen sind Feuchtgebiete, Sümpfe (Tundren) und der tropische Regenwald sowie Termiten, Ozeane und Methanhydrate.

**Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ , Lachgas)** ist ein relativ stabiles und langlebiges Treibhausgas und trägt mit etwa 4 % direkt zum Treibhauseffekt bei. Die Distickstoffoxid-Konzentration ist seit 1750 um etwa 17 % gestiegen und nimmt immer noch zu.  $\text{N}_2\text{O}$  wird von natürlichen (ca. 61 %) und anthropogenen Quellen (ca. 39 %) emittiert. Diese sind vor allem Ozeane, Böden, Verbrennung von fossilen Brennstoffen, Biomasseverbrennung, Düngemittelverwendung und verschiedene Industrieprozesse.

**Ozon ( $\text{O}_3$ )** ist ein äußerst klimawirksames Treibhausgas und wird nicht direkt aus natürlichen oder anthropogenen Quellen in die Atmosphäre abgegeben. Ozon hat in der Troposphäre eine gesundheitsschädliche Wirkung, in der Stratosphäre dagegen absorbiert das Ozon die gesundheitsschädliche UV-B-Strahlung. Die Ozonkonzentration hat in Bodennähe gegenüber dem vorindustriellen Wert um mindestens 25 % zugenommen. In der Stratosphäre war dagegen eine deutliche Abnahme zu verzeichnen. Durch das Verbot der ozonzerstörenden

FCKWs (Montreal Protokoll) wird erwartet, dass langfristig der Ozonabbau in der Stratosphäre gestoppt wird und sich die Ozonschicht bis 2050 erholt.

**F-Gase und Halokarbone** haben trotz ihrer geringen Konzentration im ppt-Bereich unterschiedliche Wirkung: Die F-Gase (FKW, HFKW) sind „nur“ Treibhausgase und Ersatzstoffe für die Halokarbone (v.a. FCKW), die die Ozonschicht in der Stratosphäre zerstören und in der Troposphäre zur Erwärmung beitragen. Damit sind sie nach  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  das dritt wichtigste Treibhausgas. Neben der Erwärmungswirkung haben sie durch die Ozonzerstörung in der Stratosphäre einen indirekten abkühlenden Effekt. Die Ozonzerstörung führt in der Stratosphäre zu einer deutlichen Abkühlung, die auch die Troposphäre beeinflusst. Seit Beginn der vierziger Jahre wurde bis in die neunziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts ein Anstieg der FCKWs in der Atmosphäre gemessen. Danach begann ein Rückgang bzw. eine Verlangsamung des Zuwachses der vollhalogenierten FCKWs, die weniger kritischen Ersatzstoffe – teilhalogenierte FCKWs mit einem geringeren Treibhauspotential - nehmen immer noch zu, wenn auch geringer werdend. In Deutschland haben die HFKW zugenommen. Die FCKW-Emission ging dagegen stark zurück.

**Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ )** ist chemisch außerordentlich stabil, die mittlere atmosphärische Lebensdauer beträgt mehrere 1000 Jahre. Außerdem hat es ein sehr hohes Treibhausgaspotential und kommt praktisch nicht natürlich in der Atmosphäre vor.  $\text{SF}_6$  wird v.a. als Funken-Löschgas in Hochspannungsschaltanlagen, als Autoreifenfüllung, als Isoliergas bei Wärmeschutzfenstern und bei der Aluminium- und Solarzellenproduktion verwendet. Aufgrund von Leckagen gelangen geringe Mengen in die Atmosphäre. Die  $\text{SF}_6$ -Konzentrationen in der Atmosphäre steigen um einige ppt pro Jahr an.

#### **Indirekte, ozonbildende Treibhausgase**

**Stickoxide ( $\text{NO}_x$ , v.a. NO und  $\text{NO}_2$ )** sind keine Treibhausgase, aber sie zerstören das OH-Radikal, das die Konzentration von Methan, Kohlenmonoxid und FCKWs in der Atmosphäre beeinflusst. Außerdem trägt  $\text{NO}_x$  durch photochemische Prozesse zur Ozonbildung in der Troposphäre bei. Quellen für die  $\text{NO}_x$ -Emissionen sind die Verbrennung fossiler Brennstoffe, die Biomasseverbrennung, Blitze und Böden. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe verursacht ca. 55 % der globalen  $\text{NO}_x$ -Emission.

**Flüchtige organische Verbindungen (VOC)** bilden in der Atmosphäre in Gegenwart von Stickoxiden und Sonnenlicht das Treibhausgas Ozon. VOC sind Kohlenstoffverbindungen, die insbesondere bei einer unvollständigen Verbrennung entstehen. Sie stammen aus Kraftfahrzeugverkehr, Industrie, Heizungsanlagen, chemischen Produktionsprozessen (Raffinerien, Chemieanlagen) und werden darüber hinaus auch bei der Verdampfung von Lösemitteln frei. Natürlich werden sie von Laub- und Nadelbäumen in großen Mengen (2/3 der globalen Emission) emittiert.

**Kohlenmonoxid (CO)** ist das bedeutendste indirekte Treibhausgas, da es in der Troposphäre zur Ozonbildung beiträgt. CO hat sowohl natürliche als auch anthropogene Quellen. Global sind die Oxidation von Methan und die Verbrennung von Biomasse wichtige direkte Quellen. Der Einsatz fossiler Brennstoffe (Verkehr, Industrie, Heizung) - insbesondere bei unvollständiger Verbrennung - ist in der Nordhemisphäre eine etwa gleich starke Quelle. Seit den 50'er Jahren wurde bis Mitte der 80'er Jahre eine Zunahme des atmosphärischen CO-Gehaltes von 0,3 bis 1 % pro Jahr beobachtet; danach stagnierte er.

**Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ )** ist als Vorläufersubstanz der Sulfataerosole ein wichtiges troposphärisches Spurengas. Da das Sulfataerosol zu den „streuenden Aerosolen“ gehört, wirkt es dem Treibhauseffekt entgegen und hat deswegen einen erheblichen Einfluss auf die Klimaentwicklung.

Quellen von  $\text{SO}_2$  sind vor allem fossile Brennstoff- und Biomasseverbrennung, Vulkane und die Oxidation von Dimethylsulfid (DMS) aus den Ozeanen. In der Nordhemisphäre sind die Hauptemittenten mit 65 % Kraftwerke, industrielle Feuerungsanlagen, Hausbrand und Verkehr. Die Immissionen sind in den meisten Industriestaaten deutlich zurückgegangen. In den asiatischen Schwellenländern sind aufgrund der zunehmenden Industrialisierung starke Anstiege festzustellen.

**Aerosole** haben in den vergangenen Jahren in der Klimadiskussion eine immer größere Bedeutung gewonnen. Aerosole werden entweder direkt in die Atmosphäre eingetragen (Primäraerosole) oder entstehen durch chemische Prozesse aus Vorläuferstoffen (Sekundäraerosole). Aerosole sind kleine, in der Luft schwebende Teile mit einem Durchmesser von kleiner 10 µm und können durch natürliche Vorgänge wie Wind, Vulkanausbrüche bzw. Verbrennung fossiler Brennstoffe oder Biomasse in die Atmosphäre gelangen. Grundsätzlich wird ein direkter und indirekter Einfluss von Aerosolen auf den Strahlungshaushalt und das Klima unterschieden. Aerosole (vor allem die Sulfatpartikel) reflektieren die Solarstrahlung in den Weltraum und haben damit verbunden eine abkühlende **direkte Wirkung**. Die **indirekte Wirkung** der Aerosole ergibt sich aus ihrem Einfluss auf die Wolkenbildung und den Niederschlag. Hinzu kommt noch eine **semidirekte Wirkung** durch die Wolkenauflösung infolge der Aufheizung der absorbierenden Rußpartikel. Angaben über den indirekten Effekt durch Aerosole schwanken in der Literatur sehr stark. Die globale klimatische Wirkung wird durch Modellrechnungen zu bestimmen versucht. Danach sollen z.B. im Zeitraum 1860 bis 1985 die Aerosole eine mittlere globale Abkühlung von 0,9 °C hervorgerufen haben. Die Rechnungen sind noch mit großen Unsicherheiten verbunden.

### **Landnutzungsänderungen**

Landnutzungsänderungen werden durch Entwaldung, Aufforstung, Bewässerung und Verstädterung verursacht. Knapp ein Drittel der Landoberfläche ist mit Wäldern bedeckt. Die größten Abholzungen finden in Afrika, Asien und Mittel- und Südamerika mit Verlustraten von über 0,5 %/Jahr statt. Die Abholzungsrate hat sich in den vergangenen Jahren etwas abgeschwächt. Die Landnutzung verändert die Struktur der Erdoberfläche; landwirtschaftliche Flächen sind in vielen Fällen heller als Waldflächen und zeigen auch ein anderes Verdunstungsverhalten. Im globalen Mittel ergibt sich wahrscheinlich eine leichte Abkühlung, und zwar vor allem aufgrund der Zunahme der verstärkten Reflexion solarer Strahlung. Modellrechnungen, die Landnutzungsänderungen wie Abholzungen und Ausdehnung der Landwirtschaft mit einbeziehen, ergeben erhebliche regionale Klimaänderungen.

### **Klimabeobachtungen**

Seit etwa 1850 gibt es für große Teile der Erdoberfläche Messungen des Luftdrucks und der Temperatur. Seit Beginn der Industrialisierung – Mitte des 19. Jahrhunderts - ist die mittlere **Temperatur** der Erde um rund 0,8 °C gestiegen. Der Hauptanstieg war 1910 bis etwa 1945 und nach einem leichten Rückgang ab 1975 wieder bis heute. 2005 war das zweitwärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen Mitte des 19. Jahrhunderts. Das vergangene Jahrzehnt (2000 – 2009) war das wärmste seit 1850. Der globale mittlere Temperaturanstieg der letzten 50 Jahre wird größtenteils auf menschliche Aktivitäten zurückgeführt. Folgende Indizien sprechen nach Ansicht des IPCC 2007 dafür: kaum Veränderungen der natürlichen Einflüsse wie Sonnenaktivität und Vulkanaktivität in diesem Zeitraum; die räumliche Verteilung der Temperaturänderung entspricht dem für den Treibhauseffekt erwarteten Muster, und die gegenwärtige Erwärmung kann (weitgehend) mit den Klimamodellen nur bei Berücksichtigung des zusätzlichen Treibhauseffektes nachvollzogen werden.

Die Auswertung der Daten aus Eisbohrkernen der letzten 650 000 Jahre zeigt Temperaturschwankungen um 10 °C, die sehr wahrscheinlich durch Änderungen der Erdumlaufbahn ausgelöst wurden. Das Klima seit der letzten **Eiszeit** gilt als relativ stabil mit Temperaturschwankungen von etwa ± 1 °C. Die mittlere Temperatur der Eiszeit lag etwa 5-6 °C unter dem heutigen Wert. Das im IPCC-Bericht 2001 gezeigte - aus historischen Daten rekonstruierte - umstrittene Temperaturdiagramm der vergangenen 1000 Jahre wies die Form eines Hockeyschlägers auf – leichter Rückgang der Temperaturen bis etwa 1900, danach ein steiler Anstieg bis heute. Neuere Auswertungen (*IPCC 2007*) fanden eine größere Klimavariabilität in den vergangenen Jahrhunderten - insbesondere einen deutlicheren Temperaturanstieg im Mittelalter und einen Temperaturrückgang in der kleinen Eiszeit.

Der so genannte „**Urbane Wärmeinsel-Effekt**“ spielt für die globale Temperaturentwicklung praktisch keine Rolle.

**Regionale Änderungen des Klimas:** Bei der regionalen und jahreszeitlichen Betrachtung von Trendanalysen ergibt sich ein kompliziertes Bild. Neben Regionen mit Temperaturzunahme treten auch Gebiete auf, die sich im Lauf der letzten 100 Jahre abkühlten. In **China** hat es - wohl durch wachsende Ruß- und Sulfatmissionen und Abholzungen - seit den 80'er Jahren einen deutlichen Klimawandel gegeben. Der sommerliche Regengürtel hat sich verschoben, und die meisten Sommer waren durch Dürren gekennzeichnet. Insgesamt ergab sich 1900 - 2009 in **Europa** mit 0,95 °C und in **Deutschland** mit 1,0 °C ein statistisch signifikanter Temperaturanstieg. In den letzten beiden Jahrzehnten hat sich mit 2,3 °C im Winter gegenüber 0,7 °C im Sommer vor allem die winterliche Erwärmung verstärkt. Der Niederschlag hat im vergangenen Jahrhundert und vor allem in den drei letzten Jahrzehnten im Winter deutlich zugenommen.

**Satellitenmessungen:** Polarumlaufende Satelliten liefern seit 1979 eine nahezu lückenlose Beobachtung der Erdatmosphäre. Während sich die Troposphäre seit 1979 um 0,16 – 0,18 °C pro Jahrzehnt erwärmte, hat sich im gleichen Zeitraum die Stratosphäre um 0,32 – 0,44 °C pro Dekade abgekühlt.

### ***Forschungseinrichtungen und – programme***

Das **IPCC** ist ein internationales Expertengremium der UN von Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen, die in den Berichten der drei Arbeitsgruppen und Veröffentlichungen den Stand der weltweiten Forschung zum Klimawandel dokumentieren. Die erste Arbeitsgruppe (AG I) beschäftigt sich mit den wissenschaftlichen Erkenntnissen über die klimabestimmenden Faktoren. In der zweiten Arbeitsgruppe (AG II) werden die ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen der globalen Erwärmung auf den Lebensraum Erde untersucht, die dritte Arbeitsgruppe (AG III) analysiert mögliche Strategien zur Bekämpfung des Treibhauseffektes.

Die wichtigsten **Schlussfolgerungen** des **4. Sachstandsberichtes 2007 (AR4)** sind: Es könne heute keinen begründeten Zweifel mehr daran geben, dass der Mensch die Erderwärmung der vergangenen Jahrzehnte verursache. Es gibt immer mehr Belege dafür, dass er "weitere Aspekte des Klimas beeinflusst, darunter die Meereisbedeckung, Hitzewellen und andere Wetterextreme, die Luftzirkulation, Sturmbahnen und den Niederschlag". Es gibt neue und klarere Belege dafür, dass der Großteil der in den letzten 50 Jahren beobachteten Erwärmung menschlichen Aktivitäten zuzuschreiben ist. Für den Zeitraum von 1990 bis 2100 wird je nach zugrunde gelegtem Szenario ein Anstieg der mittleren globalen bodennahen Temperatur um 1,8 °C bis 6,4 °C projiziert.

Seit Beginn der 80'er Jahre wurden weltweit zahlreiche **Klimaforschungsprogramme** ins Leben gerufen. Ziel ist es, festzustellen, in welchem Umfang natürliche Klimaschwankungen sowie der anthropogene Einfluss vorhergesagt werden können. Hierzu sollten die Zustandsbeschreibung des Klimas, die Modellbildung, die entscheidenden Klimaprozesse und die zukünftige Klimaentwicklung erforscht werden.

### ***Klimamodelle***

**Klimamodelle** beschreiben das Klimasystem der Erde in physikalisch-mathematischen Gleichungen, die von einem Computer numerisch gelöst werden können. Gekoppelte Modelle (GCM) verknüpfen die grundlegenden physikalischen Gesetze in Form von Differentialgleichungen und berechnen die wichtigsten atmosphärischen Prozesse und Zustandsvariablen für jeden Gitterpunkt. Hieraus wird dann die Statistik des Wetters – also das Klima – abgeleitet. Ein **vollständiges Klimamodell** enthält die physikalische Beschreibung aller Klimakomponenten und berücksichtigt ebenfalls ihre Kopplung. Inzwischen wird trotz aller noch vorhandenen Unsicherheiten eine recht gute Übereinstimmung der Klimaberechnung aus den Modellsimulationen (Kontrollläufe) mit dem historisch rekonstruierten Klima erreicht.

**Modellergebnisse:** Seit dem letzten Bericht (TAR) 2001 wurden wesentliche Fortschritte bei der Klimamodellierung und der Sammlung und Analyse von Daten erreicht. Nach dem 4. Sachstandsbericht des IPCC (AR4) ist die beste Abschätzung der berechneten globalen durchschnittlichen Oberflächenerwärmung für das niedrige Emissionsszenario (B1) wahr-

scheinlich  $1,8^{\circ}\text{C}$  ( $1,1^{\circ}\text{C} - 2,9^{\circ}\text{C}$ ) und für das hohe Emissionsszenario (A1F1)  $4,0^{\circ}\text{C}$  ( $2,4^{\circ}\text{C} - 6,4^{\circ}\text{C}$ ) Trotz erheblicher Fortschritte in der Entwicklung von Klimamodellen haben es Klimasimulationen weiterhin mit einer Vielzahl von Problemen zu tun, so ist es z.B. schwierig, den Effekt von Wolken in Klimamodellen richtig zu integrieren. Die vielfältigen Wechselwirkungen der Wolken sind keineswegs im Detail verstanden. Wolken können sowohl einen kühlenden als auch einen wärmenden Effekt haben.

### **Auswirkungen einer Klimaänderung**

Aussagen über Änderungen globaler Mittelwerte allein geben über die **Auswirkungen einer Klimaänderung** auf die Natur und die Menschheit noch keinen Hinweis. Klimaänderungen können für Mensch und Natur regional unterschiedlich positive wie negative Folgen haben. Aus rein statistischen Überlegungen muss von einer Zunahme von heißen Tagen bei einer Erhöhung der mittleren Temperatur ausgegangen werden. Da mehr Wasser verdunstet, wird auch mit einer regional sehr unterschiedlichen Zunahme der Intensität von Starkniederschlägen und Hochwasser gerechnet. Die Diskussion um eine mögliche Zunahme von **Stürmen** und Hurrikane ist in Fachkreisen immer noch im Gange und teilweise heftig umstritten. Modellrechnungen ergaben, dass unter künftigen klimatischen Bedingungen Sturmflutextrema an der Nordseeküste zunehmen könnten. Regionale Modelle zeigen für Deutschland kaum Änderungen der Sturmaktivitäten. Änderungen der Hurrikanaktivitäten beruhen primär auf natürlichen Schwankungen, der Anstieg der Oberflächentemperatur der Ozeane in der tropischen Zone könnte jedoch ein "beitragendes Element" zur wachsenden Stärke von Hurrikans sein. Es werden keine Zunahme der Hurrikane erwartet, jedoch eine Verstärkung ihrer Intensität.

In **Gletschern und Eiskappen** sind erhebliche Wassermassen gebunden, die einem Meeresspiegeläquivalent von etwa 70 m entsprechen. Die Mehrzahl der untersuchten **Gletscher** schmelzen seit Jahrzehnten deutlich ab. Der Verlust an mittlerer Massenbilanz hat sich in den vergangenen Jahren beschleunigt. Begonnen hat das Abschmelzen teilweise bereits vor Beginn der Industrialisierung. Die Eisdecke auf der Ostseite der **Antarktis** ist relativ stabil, an der westantarktischen Eisdecke findet ein verstärktes Abschmelzen statt. Bei einem weiteren Anstieg der Erwärmung wird jedoch angenommen, dass das Abschmelzen an den Rändern der Westantarktis und in Grönland zu einem deutlichen Anstieg des Meeresspiegels führen könnte.

Satellitendaten zeigen, dass die Meereisdecke in der **Arktis** in den vergangenen 25 Jahren stark geschrumpft ist und zwar um ca. 9 % mit stärkerer Abnahme im Sommer; gleichzeitig hat sich die Meereisdicke um 15 % verringert. Die Meereis- und Temperaturentwicklung ist aber - wie Auswertungen der letzten 100 Jahre gezeigt haben - durch dekadische Schwankungen gekennzeichnet. Für die Erwärmung in den vergangenen 3 Jahrzehnten dürfte neben natürlichen Ursachen wie die Änderung der Arktischen Oszillation (AO) auch der Treibhauseffekt eine Rolle spielen. Modellrechnungen lassen einen Temperaturanstieg bis 2100 von  $3,5^{\circ}\text{C}$  bis knapp  $6^{\circ}\text{C}$  für die Arktis erwarten. Diese klimatisch bedingten Veränderungen in der Arktis könnten erhebliche Folgen für das Klima der Erde haben.

Die bis zu 3000 m dicke und  $1,7\text{ Mio. km}^2$  große Eiskappe **Grönlands** spielt eine besondere Rolle in der Klimadiskussion. Die Messungen der Veränderungen der grönländischen Eis- und Schneemassen haben inzwischen ein Überwiegen des Abschmelzens ergeben, da sich die Gletscherabflüsse an den Rändern Grönlands verstärkt haben. Die meisten Modelle zeigen ein Abschmelzen des Grönlandeises bei einem fortdauernden Anstieg der Erwärmung. Neuere Modellrechnungen ergeben, dass eine globale Erwärmung von  $3^{\circ}\text{C}$  ausreichen würde, das Grönlandeis rapide abschmelzen zu lassen.

In den vergangenen 40 Jahren haben sich die **Ozeane** der Welt aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes erwärmt. Beobachtungen haben gezeigt, dass 84 % der gesamten Erwärmung der Erde (Ozeane, Atmosphäre, Kontinente, Kryosphäre) der letzten 40 Jahre in die Ozeane gegangen ist. Ein Temperaturanstieg im Ozean führt zwangsläufig über die thermische Expansion zu einem Anstieg der Meeresoberfläche. Nach Satellitenauswertungen hat sich die Geschwindigkeit des Anstiegs des Meeresspiegels (20. Jahrhundert 1,7

mm/Jahr) in den letzten Jahren erhöht und lag 1993 – 2003 bei 3,1 mm pro Jahr. 2004 – 2008 hat sich der Anstieg um ca. 15 % reduziert.

Temperaturanstieg, Niederschlagsveränderung und Meeresspiegelanstieg können auf unterschiedliche Weise **Mensch und Natur** beeinflussen:

- Gesundheit (Kälte- und Hitzetote, Infektiöse, Vektor- und sonstige Krankheiten)
- Landwirtschaft (Dürren, Ernteerträge, Bewässerung)
- Wasserressourcen (Wasservorrat, Wasserqualität, Konkurrenz um Wasser)
- Küstengebiete (Erosion von Stränden, Überflutung von Inseln, Küstenschutz)
- Flora und Fauna (Artenverlust, Lebensraumveränderung, Gletscherschwund)
- Infrastruktur (Zerstörung durch Stürme und Überschwemmungen)
- Tourismus (weniger Wintersport, mehr Sommerurlaub z. B. an Nord- und Ostsee)

Die insbesondere von der Versicherungswirtschaft aufgestellten Statistiken über wetterbedingte **Naturkatastrophen** und deren volkswirtschaftliche Schäden müssen mit Vorsicht betrachtet werden. Die Zunahme der Schadenssumme hat nicht zwangsläufig mit einer Zunahme der Stürme, Hochwässer oder Niederschläge zu tun. Häufig hat der Mensch selbst durch Besiedelung kritischer Bereiche wie Küstenzonen oder Uferbereiche von Flüssen zu einer Erhöhung der Schadenssumme beigetragen. Um die Folgen des Klimawandels zu minimieren, ist eine Diskussion über die Anpassung weltweit und auch in Deutschland im Gange.

**Gesundheit:** Die WHO schätzt, dass der anthropogen verursachte Erwärmungs- und Niederschlagstrend in den vergangenen 30 Jahren bereits jährlich ca. 150 000 Menschenleben gekostet hat. Ein hohes Maß an Unsicherheit für diese Aussage wird jedoch angegeben. Neben den hitzebedingten Todesfällen und Todesfällen infolge Ernährungsmangel sowie Überschwemmungen werden infektiöse Todesfälle betrachtet. **Malaria** und das **Dengue-Fieber** spielen dabei eine herausragende Rolle. Anpassungsmaßnahmen in der Gesundheitsvorsorge, Entwicklung neuer Medikamente oder Verhaltensänderungen des Menschen, die zu einer deutlichen Verringerung z.B. der Malariagefahr beitragen können, müssen berücksichtigt werden. In Mittel- und Nordeuropa sowie in den Vereinigten Staaten spielen als klimaabhängige Vektor-Krankheit vor allem die durch **Zecken** übertragene Meningoenzephalitis und die Lyme-Borreliose eine wichtige Rolle. Mildere Wintertemperaturen könnten zu einer höheren Infektionsrate geführt haben.

**Ernährung:** Der Einfluss des Klimawandels auf die zukünftige Ernährungssituation ist für die Menschheit von entscheidender Bedeutung. Auf die Anpassungsmöglichkeiten wie z.B. der Verwendung hitzeresistenter Pflanzen und dem Einsatz verstärkter künstlicher Bewässerung wird im *IPCC Bericht 2007* ausdrücklich eingegangen. In **niedrigeren Breiten**, insbesondere saisonal trockenen und Tropengebieten, wird für das Ernteertragspotenzial eine Abnahme selbst bei geringem Anstieg der lokalen Temperatur (1-2°C) projiziert, was ein erhöhtes Hungerrisiko zur Folge haben würde.

**Global** gesehen wird bei einem Anstieg der lokalen mittleren Temperatur im Bereich von 1-3°C eine Steigerung des Potenzials für die Nahrungsmittelproduktion, bei einem Anstieg darüber hinaus hingegen eine Verringerung projiziert. Zusätzliche Probleme werden durch **Dürren und Überschwemmungen** erwartet.

**Nutzen:** Die Diskussion um die möglichen Folgen der Klimaerwärmung wird häufig nur über die negativen Auswirkungen geführt. Dabei wird übersehen, dass regional unterschiedlich zahlreiche positive Effekte auftreten können. Eine moderate Temperaturerhöhung dürfte überwiegend positive Folgen haben. Hierzu zählt zum Beispiel das verstärkte Wachstum infolge von CO<sub>2</sub>-Düngung. Höhere Temperaturen fördern auch das Wachstum vieler Pflanzen, und die Vegetationsperiode wird dadurch verlängert. Bestimmte Regionen in Europa, Asien oder Kanada werden davon zunächst profitieren. Bei einem zu starken Temperaturanstieg und/oder bei Wassermangel werden dagegen Ernteverluste auftreten. Auf lange Sicht wird die Mehrzahl der Veränderungen wahrscheinlich negativ sein.

Um eine „**gefährliche Klimaänderung**“ zu vermeiden, müsste nach Ansicht der Wissenschaft die globale Temperaturerhöhung auf max. ca. 2 °C beschränkt werden. Dies ist nur durch eine möglichst rasche globale Begrenzung der Treibhausgasemissionen möglich.

**Kosten:** Über die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels gibt es große Unsicherheiten. *IPCC 2007* hat die Bandbreite der Kosten aus zahlreichen Studien zusammengestellt. Sie reichen von – 10 \$ bis + 350 \$ pro Tonne Kohlenstoff.

### **Energieumwandlung und Transport**

Bei der **Energieumwandlung** und in geringem Umfang beim **Energietransport** entstehen zwangsläufig klimarelevante Gase. Global betrachtet ist der anthropogene Beitrag zur **Wasserdampfemission** und zur **Abwärme** zu vernachlässigen. Die **Kohlendioxidemission** hat sich v.a. aufgrund der Verbrennung fossiler Brennstoffe seit Beginn der Industrialisierung nahezu ständig erhöht. Seit 1751 wurden hierdurch insgesamt etwa 300 Mrd. t Kohlenstoff in die Atmosphäre freigesetzt, die Hälfte davon in den letzten 30 Jahren. Global ist die Verbrennung von festen und flüssigen Brennstoffen für 76,8 % der Emissionen und die von Gas für 18,5 % (2006) verantwortlich. Die Energiewirtschaft (Strom und Wärme) hat weltweit einen Anteil von ca. 41 %. Die Hauptzuwachsrate bei der Kohlendioxidemission liegen heute in Asien. China hat USA 2007 überholt. Die neuen Mitgliedsstaaten der EU-27 haben zu dem deutlichen Rückgang von -5,8 % für den Zeitraum 1990 – 2009 beigetragen. Deutschland hat sein Kyoto Ziel für 2008 – 2012 von – 21 % 2009 mit – 29 % bereits übererfüllt und hat jetzt noch einen Anteil an den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen von 2,6 %. 2009 ist zum ersten Mal in diesem Jahrzehnt die CO<sub>2</sub>-Emission um 1,3 % zurückgegangen.

Die gestiegene Rinderhaltung und der Reisanbau sowie der Kohleabbau, Deponien, Gasversorgung und Biomasseverbrennung haben zu einem Anstieg der **Methanemissionen** in der Vergangenheit beigetragen. Die Energiewirtschaft hat einen Anteil von ca. 20 %. In Deutschland wurden die Methan-Emissionen 1990 - 2008 um über 50 % verringert. Der Kraftwerksanteil ist mit 0,25 % vernachlässigbar. Die globalen **N<sub>2</sub>O-Emissionen** aus stationären Verbrennungsanlagen betragen etwa 7 % der Gesamtemissionen der Industriestaaten. In Deutschland liegt der Kraftwerksanteil bei 8 %. Die **NO<sub>x</sub>-Emissionen** blieben global 1990 – 2007 in etwa konstant. Die deutlichen Reduktionen in den Industriestaaten wurden durch die Zuwächse in Asien wieder ausgeglichen. In Deutschland gingen sie im Zeitraum 1990 – 2008 um 52 % zurück. Der Kraftwerksanteil betrug 2008 noch ca. 23 %. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe hat global einen Anteil von etwa 28 % an der **Emission flüchtiger organischer Verbindungen** (NMVOC). In der EU wurden die NMVOC-Emissionen im Zeitraum 1990 – 2008 um die Hälfte und in Deutschland um 2/3 verringert. Der Kraftwerksanteil ist mit 1,1 % vernachlässigbar. Die **Kohlenmonoxid-Emissionen** gingen in Europa und Deutschland deutlich zurück (EU-27 1990-2008 ca. 50 %, Deutschland 1990 – 2008 ca. 66 %), in Asien erhöhte sie sich dagegen stark. Der Beitrag der Kraftwerke in Deutschland ist mit 4 % gering; den Hauptanteil hat der Verkehr mit ca. 34 %. Die **SF<sub>6</sub>-Emissionen** betragen weltweit im Jahr 2002 ca. 6000 t, sind danach aber angestiegen. In der EU-27 gab es 1995 – 2008 eine Minderung um 46 %, in Deutschland um ca. 25 %. Bei den Schaltanlagen und Wandlern wurde in Deutschland seit 1995 eine deutliche Reduktion der Emissionen um ca. 49 % (2008) erreicht. Bei **SO<sub>2</sub>** gab es weltweit einen Rückgang 1990 – 2008 um 26 % - trotz Zuwachs in Asien. In Europa 1990 – 2008 wurde eine Minderung um 78 % und in Deutschland um über 90 % erreicht. Besonders stark mit **Feinstaub** belastet sind heute die Ballungsräume der bevölkerungsreichsten Staaten der Erde China und Indien durch Verbrennung von Biomasse und Kohle ohne ausreichende Filteranlagen. Die Gesamtstaubemissionen konnten im Zeitraum 1990 – 2008 in der EU-27 um über 20 % und in Deutschland um über 90 % reduziert werden. Die Kraftwerke haben mit ca. 5 % nur einen geringen Anteil an der Feinstaubemission und haben ihre Gesamtemissionen um 99 % reduziert.

### **Geoengineering**

Mit dem Begriff Geoengineering werden Vorschläge zur absichtlichen Veränderung der Natur beschrieben. Auf den anthropogenen Klimawandel bezogen, soll dadurch der Einfluss des anthropogenen Treibhauseffektes verringert oder vermieden werden. Beispiele sind das

künstliche Einbringen von **Sulfataerosolen** in die Stratosphäre oder die Installation von riesigen **Sonnenschirmen** im Weltall sowie das Ausbringen von reflektierenden Folien in Wüstengebieten. Ein weiterer Vorschlag ist das Wachstum von Algen und damit die CO<sub>2</sub>-Aufnahme der Meere durch Düngung von Ozeanen mit **Eisenstaub** zu verstärken. Durch **Aufforstung** können erhebliche Mengen von Kohlenstoff in die Biomasse der Wälder eingebunden werden. Durch spezielle **Bodenbearbeitung** können die Kohlendioxidspeichermenge vergrößert bzw. Freisetzungen durch Bodenbearbeitung verhindert werden.

### ***Kohlendioxidminderung in der Energiewirtschaft***

Neben der Wirkungsgradverbesserung ist der Einsatz CO<sub>2</sub>- armer bzw. -freier Technologien wie Kernenergie und erneuerbarer Energien in der Diskussion. Außerdem wird intensiv an der Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Abscheidung gearbeitet. Der **Wirkungsgrad** von fossil befeuerten Kraftwerken ist in den vergangenen 30 Jahren im Weltdurchschnitt von 31 % auf 36 % gestiegen. Bei einer weltweiten Effizienzsteigerung um etwa 5 % in den Kraftwerken der Welt könnten rund 1 Mrd. t Kohlendioxid eingespart werden.

Weltweit wurden 2009 18 % des Stromes aus **Erneuerbaren Energien** gewonnen, in der EU-27 waren es 2007 16 % (v.a. Wasserkraft). Hohe Zuwachsraten hatte in den letzten Jahren insbesondere in Deutschland und Spanien die Windkraft. Deutschland hatte 2009 einen Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung von 16 %.

**Kernkraftwerke** erzeugen weltweit ca. 14 %, in der EU-27 28 % und in Deutschland 23 % des Strombedarfs aus Kernenergie. Im Rahmen der Umsetzung des Kyoto-Protokolls hat innerhalb der Europäischen Union 2005 der **Emissionshandel** begonnen. In der erweiterten EU-25 sind 11 428 Energie erzeugende und energieintensive Anlagen zur Teilnahme am Emissionshandel verpflichtet.

Die **CO<sub>2</sub>-Abscheidung** wird in verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsprojekten weltweit auf ihre Anwendung vorangetrieben. Die drei wesentlichen Optionen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei Kraftwerken sind: CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach der Verbrennung, Verbrennung mit O<sub>2</sub> statt Luft (Oxyfuel-Verfahren) und CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor der Verbrennung mit IGCC (integrierte Kohlevergasung). Allen Abscheide-Konzepten gemeinsam ist derzeit ein großer zusätzlicher apparativer Aufwand, verbunden mit erheblichen Wirkungsgradverlusten von 8 – 13 %-Punkten für die Stromerzeugung. Verschiedene Versuchs- und Demonstrationsanlagen sind in Planung bzw. in Bau und in Betrieb. Das CO<sub>2</sub> wird nach der Abscheidung zum Transport und zur Speicherung komprimiert und verflüssigt. **Zur Speicherung** des abgetrennten CO<sub>2</sub> wird eine Reihe von Möglichkeiten diskutiert und erprobt: Speicherung in geologischen Formationen (Aquifere, Öl- und Gasfelder, Kohleflöze), Speicherung im Meer oder Speicherung als Karbonat. In geringerem Umfang könnte auch eine industrielle Umwandlung/Nutzung in Frage kommen. **Kostenabschätzungen** für Abscheidung, Transport und Speicherung des CO<sub>2</sub> weisen mit etwa 20 bis 60 €/t vermiedenen Kohlendioxids eine große Bandbreite auf.

## 1 Das Klima der Erde

Das Klima wird von der World Meteorological Organisation (WMO) als Mittelwert des Wetters über eine Zeitspanne von 30 Jahren definiert. Häufig wird der Zeitraum 1961 bis 1990 zugrunde gelegt. Nach der neueren Klimadefinition wird auch das statistische Verhalten der Atmosphäre, das für eine relativ große zeitliche Größenordnung charakteristisch ist, angegeben. Neben den statistischen Kenngrößen wie mittlere Jahrestemperatur und –niederschlag werden auch Eintrittswahrscheinlichkeit und Häufigkeit von Ereignissen (mittlere Andauer von Dürren, Sturmhäufigkeit, Häufigkeit von Starkniederschlägen,...) aufgeführt.

Das Klima wird bestimmt durch die unterschiedliche Einstrahlung der Sonne, durch Vulkanismus, Winde und Meeresströmungen und deren komplexe Wechselwirkungen mit der Geo- und Biosphäre.

Das Klimasystem besteht aus den Untersystemen Atmosphäre, Hydrosphäre (Ozean und Wasserkreislauf), Kryosphäre (Eis und Schnee), Biosphäre (Tiere und Pflanzen), Geosphäre (Boden und Gestein). Diese Klimauntersysteme (Abb. 1.1) wechselwirken miteinander, dabei tauschen sie Energie, Impuls und Stoffe aus und beeinflussen sich gegenseitig in ihrem Bewegungszustand, ihrem Wärmeinhalt und in ihrer Stoffzusammensetzung (Klimarauschen).

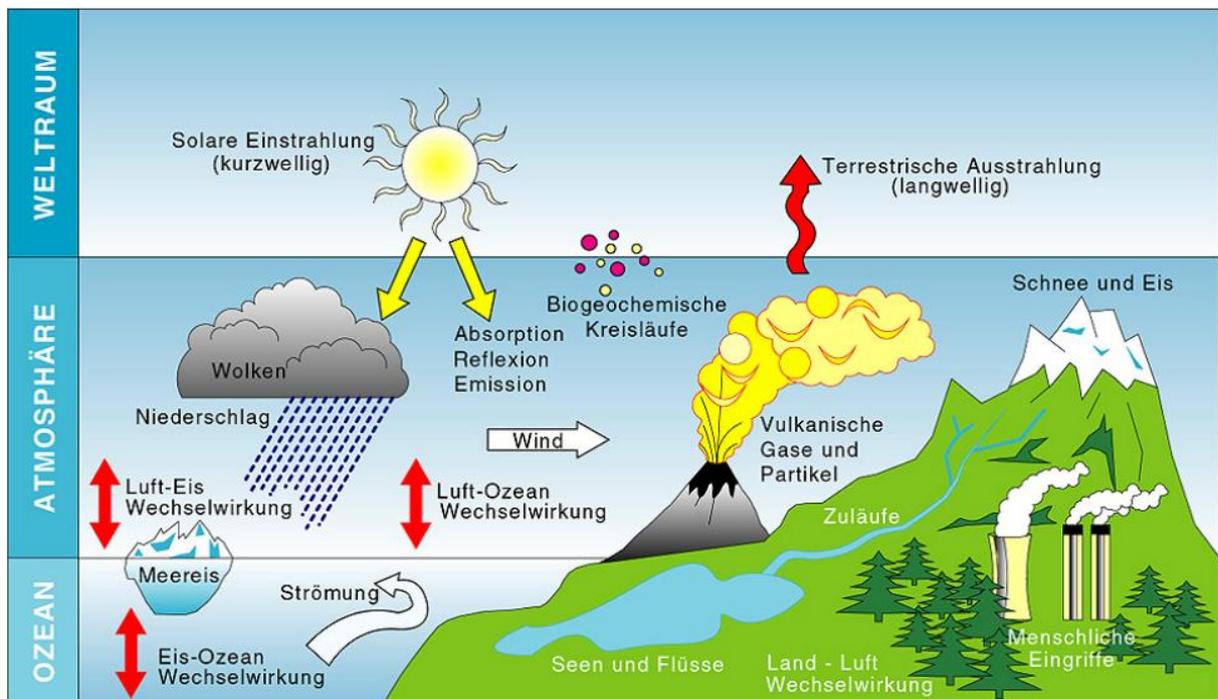


Abb. 1.1: Das Klima wird bestimmt durch die unterschiedliche Einstrahlung der Sonne, durch Winde und Meeresströmungen und deren komplexe Wechselwirkungen mit der Geo- und Biosphäre (Cubasch 2002).

Die nächste Abbildung 1.2 ist – übersetzt – dem *IPCC Bericht 2007, AR4* entnommen und zeigt die vielfältigen Wechselwirkungen (Interaktionen) und Prozesse der einzelnen Klimakomponenten auf. Auf diese Wechselwirkungen wird in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen.

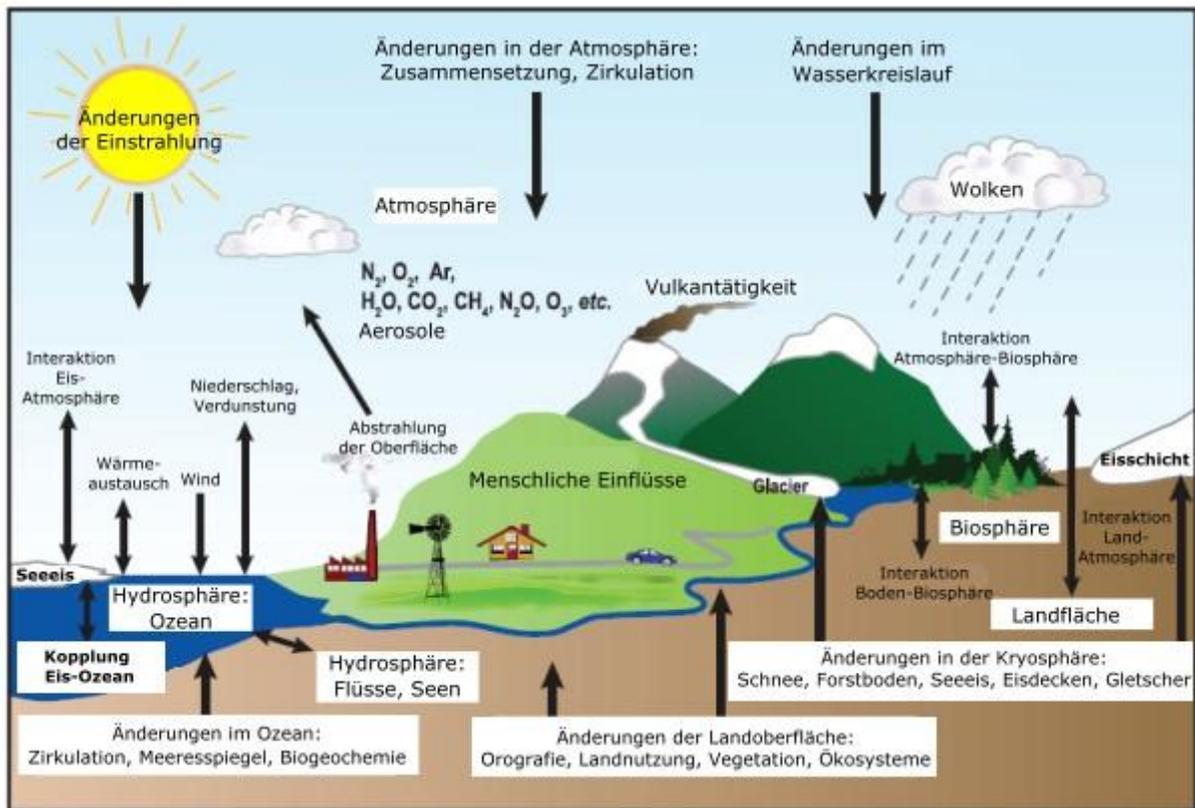


Abb. 1.2: Klimasystem der Erde mit ihren Wechselwirkungen und Prozessen der einzelnen Klimakomponenten (IPCC 2007)

## 1.1 Atmosphäre

Die Erdatmosphäre ist die Lufthülle der Erde. Sie weist eine deutliche Schichtung auf (Abb. 1.3). Die einzelnen Schichten Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre, Thermosphäre und die Exosphäre variieren in Abhängigkeit von der geographischen Lage und von saisonalen Änderungen. Der Temperaturverlauf in der Atmosphäre ist in Abb. 1.5 dargestellt.

Von besonderer Bedeutung und für das Wettergeschehen - Strahlungsbilanz, Wolken, Niederschlag, Strömung von Luftmassen, Transport und Umwandlung von Spurengasen und Aerosolen und Wärme – verantwortlich ist die untere Schicht, die Troposphäre. Sie wird von der Tropopause begrenzt, deren Höhenlage von ca. 8 km in den Polargebieten auf ca. 17 km am Äquator ansteigt.



Abb. 1.3: Atmosphäre der Erde vom Weltraum aus gesehen (NASA)  
(<http://www.kowoma.de/gps/zusatzerklaerungen/atmosphaere.htm>)

Die Troposphäre wird durch die von der Erdoberfläche absorbierte Sonnenstrahlung und der langwelligen Rückstrahlung erwärmt. Die Temperatur ist abhängig vom Wetter, der Oberflächenbeschaffenheit und den Jahreszeiten. Mit zunehmender Höhe sinkt die Temperatur von im globalen Mittel +15 °C am Erdboden bis auf -50 °C in 10 km Höhe.

In der Stratosphäre, die bis etwa 50 km reicht, steigen die Temperaturen wieder an. Hier liegt die Ozonschicht, die die Erde umgibt und die UV-B-Strahlung der Sonne absorbiert. Dabei erwärmt sich die Atmosphäre von oben. Etwa 99 % der Luftmasse der Atmosphäre sind in Troposphäre und Stratosphäre zu finden.

Die Luft (Abb. 1.4) besteht zu 78,08 % aus Stickstoff, 20,95 % aus Sauerstoff, 0,93 % aus Argon und 0,036 % (2009) aus Kohlendioxid (im trockenen Zustand). Umgebungsluft enthält zusätzlich Luftfeuchtigkeit - bis zu 4 % Wasserdampf. Die Werte schwanken grob zwischen 0,1 % an den Polen und 3 % in den Tropen.

Gas, chem. Formel	Volumenanteil	Gas, chem. Formel	Volumenanteil
Stickstoff, N <sub>2</sub>	78,08 %	Lachgas, N <sub>2</sub> O	0,3 ppm
Sauerstoff, O <sub>2</sub>	20,95 %	Xenon, Xe	0,09 ppm (90 ppb)
Argon, Ar	0,93 %	Ozon, O <sub>3</sub>	15 – 50 ppb
Kohlendioxid, CO <sub>2</sub>	0,036 % (386 ppm)	Stickoxide, NO <sub>x</sub>	0,5 – 5 ppb
Neon, He	18,2 ppm	Schwefeldioxid, SO <sub>2</sub>	0,2 – 4 ppb
Helium, He	5,2 ppm	Ammoniak, NH <sub>3</sub>	0,1 – 5 ppb
Methan, CH <sub>4</sub>	1,8 ppm	FCKW-12, CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	~ 0,5 ppb
Krypton, Kr	1,1 ppm	FCKW-11, CFCI <sub>3</sub>	~0,3 ppb
Wasserstoff, H <sub>2</sub>	0,5 ppm	FCKW-22, CHClF <sub>2</sub>	~0,1 ppb

Abb. 1.4: Zusammensetzung trockener (wasserdampffreier) und reiner (aerosolfreier) Luft in Bodennähe (nach Schönwiese 2003, CO<sub>2</sub> aktualisiert vom Verfasser)

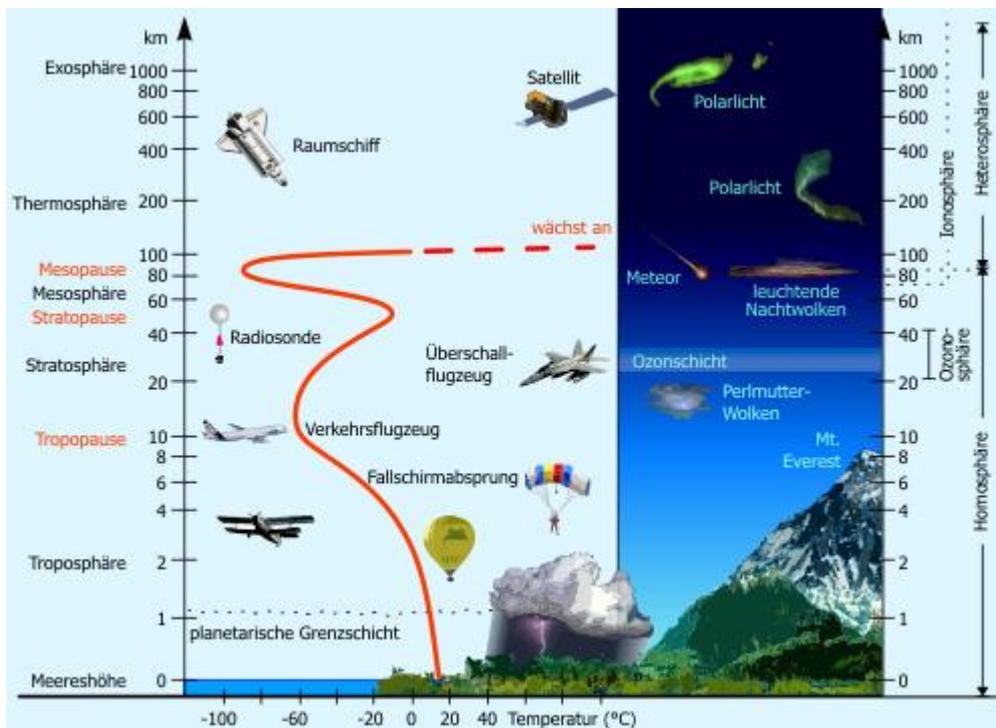


Abb. 1.5: Aufbau der Atmosphäre mit Temperaturverlauf (rote Kurve) (<http://www.kowoma.de/gps/zusatzerklaerungen/atmosphaere.htm>)

Der Antrieb für die Bewegungen in der Atmosphäre ist die regional und zeitlich unterschiedliche Einstrahlung der Sonne. Sie erzeugt Temperatur- und damit Dichteunterschiede. Diese führen zu Luftdruckgefällen, die neben der Gravitation und der Reibungskraft die wichtigsten

Kraft darstellen, die auf die Luftpartikel wirkt und die Luftmassen in Bewegung setzt (*Lemke, 2003*).

## 1.2 Hydrosphäre

Die Hydrosphäre umfasst sämtliche Formen von Wasser auf und unter der Erdoberfläche. Dies schließt den gesamten Ozean und den globalen Wasserkreislauf mit ein, nachdem der Niederschlag die Erde erreicht hat. Sie ist für die Strömung von Wassermassen, Transport von Wärme und Spurenstoffen im Ozean und Austausch von Wasserdampf und Spurenstoffen (auch Kohlendioxid) verantwortlich.

Rund 70 % der Erdoberfläche ist von Ozeanen bedeckt. Die Ozeane weisen im Mittel eine Tiefe von 4000 m auf und enthalten 97 % der gesamten Wassermenge der Erde. Ozean und Atmosphäre spielen in ihrer Wechselwirkung eine wichtige Rolle im Klimasystem. Der Einfluss des warmen Golfstroms auf unsere Temperaturen in Mitteleuropa ist ein Beispiel hierfür.

Der Ozean ist der größte Wärmespeicher der Erde; die oberste 3 m dicke Ozeanschicht enthält aufgrund der viel größeren Wärmekapazität und Dichte genauso so viel Wärme gespeichert wie die gesamte Atmosphäre. Ozeane dämpfen die thermischen Schwankungen, deswegen ist der Jahres- und Tagesgang der Temperatur über dem Meer viel geringer als über dem Land.

Die Beeinflussungen sind wechselseitig: Wind verursacht Wellen und treibt die oberflächennahen Meeresströmungen. Es gibt zahlreiche verschiedene Ozean-Atmosphäre-Interaktionen, die das Klima in vielen Teilen der Welt beeinflussen. Meeresströmungen entstehen durch Einwirkungen des Windes oder durch Änderungen in der Dichte des Oberflächenwassers infolge von Wärme- und Süßwasseraustausch. Der größte Teil der an der Erdoberfläche von der Sonne empfangenen Energie wird durch die Wasserverdunstung wieder verbraucht. Dieser Fluss an „latenter“ Energie stellt die wichtigste Energiequelle der Atmosphäre dar. Nach ihrer Kondensation in der Troposphäre bilden die Wassertröpfchen und Eiskristalle Wolken, die wiederum einen erheblichen Einfluss auf das Klima haben (*Raschke 2002*). Der mittlere Bedeckungsgrad der Erde mit Wolken beträgt etwa 50 %.

Zu den Ozean-Atmosphäre-Wechselwirkungen gehören das regelmäßig wiederkehrende El Niño - Phänomen im tropischen Pazifik mit Wassererwärmungen von bis zu 5 °C vor den Küsten Südamerikas und zeitweisen Klimaschwankungen in Amerika, Asien und Europa. Auch die Monsunniederschläge in Indien und Afrika dürften u. a. mit Änderungen der Temperatur der Meeresoberfläche zusammenhängen. Ebenso wird bei der Nordatlantischen Oszillation (NAO) der Einfluss der Meeresoberflächentemperatur diskutiert.

## 1.3 Kryosphäre

Die Kryosphäre umfasst sämtliche Formen von Eis im Klimasystem, also Landeis Massen, Eisschelfe, Meereis, Gletscher und Permafrost. Sie stellt ein langfristiges Wasserreservoir dar und beeinflusst die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche und den Salzgehalt in kritischen Regionen der Erde.

Eis bedeckt etwa 10 % der Landoberfläche und etwa 7 % der Meere, wobei den Hauptteil davon die Eisbedeckung des antarktischen Kontinentes ausmacht. Gletscher bilden nur einen sehr kleinen Teil der Eisfläche der Erde.

Im Klimasystem spielt das Eis eine erhebliche Rolle:

- Einfluss auf Oberflächen - Energiebilanz (globale Senke)
  - Atmosphärische Zirkulation
  - Ozeanische Zirkulation
  - Verstärkung in Polargebieten (positiver Eis-Albedo-Feedback)
- Einfluss auf Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche
- Einfluss auf Wasserkreislauf und – Versorgung
- Einfluss auf Meeresspiegel (negative Eismassenbilanz)
- Bestimmt Randbedingungen für Ökosystem

Eine Eisdecke isoliert sowohl den Boden als auch das Wasser von der kalten Atmosphäre; sie unterbindet den Wärmeaustausch und vermindert die Verdunstung. Beim Wasser- und Wärmetransport und im Strahlungshaushalt der Erde spielen Eis und Schnee eine wichtige Rolle. Eis und Schnee reflektieren (Albedo) bis zu 90 % der Sonnenstrahlung, Wasser und Boden nur 10-20 %. Eine Schnee- und Eisbedeckung verstärkt also die Abkühlung des Bodens, des Wassers und der unteren Luftschichten. Umgekehrt wird durch die Verringerung des Meereises die Erwärmung des Ozeans verstärkt. Außerdem ist das Meereis am Antrieb der ozeanischen Tiefenzirkulation beteiligt.

Inlandeis entsteht aus verdichtetem Schnee bei niedrigen Dauertemperaturen. Über einen längeren Zeitraum entstehen so Gletscher. Schelfeis schwimmt, wo sich das Inlandeis über die Kanten der Kontinente schiebt, auf dem Meer. Es schiebt sich einige Kilometer ins Meer hinaus. Aus abbrechenden Eisstücken entstehen Eisberge.

Bei niedrigeren Temperaturen gefriert das Oberflächenwasser der Ozeane zu Meereis. Beim Gefrieren bleibt das Salz im nicht gefrierenden Wasser zurück. Meereis schwimmt auf der Wasseroberfläche und zerbricht durch Tide und Seegang in einzelne Schollen. Die Eisschollen sind zwischen 1 und 3 m dick.

#### 1.4 Geosphäre (Pedo- und Lithosphäre)

Der Boden (Pedosphäre) bildet die Grenzfläche zwischen der Atmosphäre und der Biosphäre und ist für den Kohlenstoffkreislauf von besonderer Bedeutung. Im Boden ist im Mittel doppelt so viel Kohlenstoff gespeichert wie in der oberirdischen Pflanzendecke. Die Lage der Kontinente hat einen bestimmenden Einfluss auf die Klimazonen und Meeresströmungen. Die Veränderung des Meeresspiegels, die Eisbildung, die Umwandlung von kurz- zu langwelliger Strahlung, die Reflektivität (Albedo) der Landoberfläche beeinflussen das Klima. Die unter dem Boden liegende Gesteinsschicht (Lithosphäre) spielt für das Klima v.a. für langfristige Zeiträume durch Verwitterung der Gesteine und Neubildung durch Meeresablagerungen eine Rolle, kurzfristig durch vulkanische Aktivitäten.

#### 1.5 Biosphäre

Die Biosphäre bildet ein nahezu ausschließlich von der Sonnenenergie angetriebenes globales Ökosystem, das aus Organismen und dem Teil der unbelebten Materie besteht, der mit den Organismen in Wechselwirkung steht. Sie ist gekennzeichnet durch komplexe, weltumspannende Stoffkreisläufe (Claussen 2003). Die Menschen mit ihren wirtschaftlichen Aktivitäten sind als Lebewesen ebenfalls Bestandteile der Biosphäre. Die Biosphäre ist funktional eng mit der Atmo-, Geo- und Hydrosphäre vernetzt. Die Biosphäre umfasst die organische Bedeckung der Landmassen (Vegetation, Boden) und die marinen Organismen. Die Biosphäre bestimmt den Kohlenstoffaustausch zwischen den verschiedenen Reservoirs und damit auch die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre. Die Bodenbedeckung durch Pflanzen wie Bäume, Gräser und Flechten hat einen weiteren direkten Einfluss auf das Klima, da sie für die Windverhältnisse, die Albedo (s. Abb. 1.6) und die Verdunstung mitverantwortlich ist. Die durchschnittliche Albedo für unseren Planeten ist 0,3 (Abb. 1.6): Dies bedeutet, dass 30% des Sonnenlichtes, das die Erde erreicht, wieder in den Weltraum zurückgeworfen wird. ([http://www.atmosphere.mpg.de/enid/3\\_Sonne\\_und\\_Wolken/\\_Albedo\\_3ao.html](http://www.atmosphere.mpg.de/enid/3_Sonne_und_Wolken/_Albedo_3ao.html), IPCC 2007).

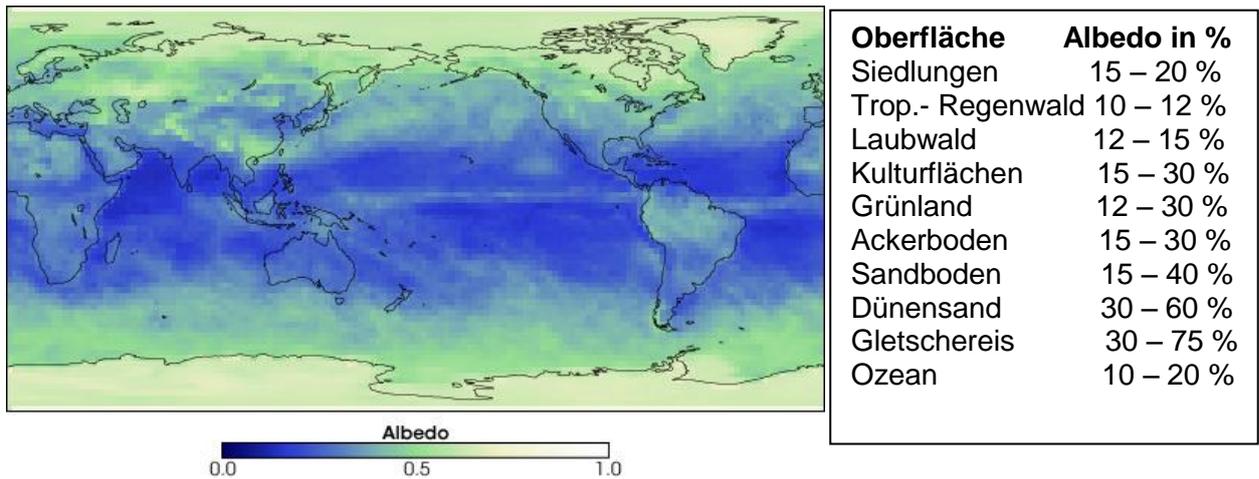


Abb. 1.6: Das Bild links zeigt die durchschnittliche Albedo für den März 2005, gemessen mit dem Terra Satellit der NASA (CERES), die höchsten Bereiche mit kurzwelliger Solarstrahlung sind weiß, in dunkelblauen Bereichen wird am wenigsten Strahlung reflektiert (Meer). (Quelle: <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=5484>). Das rechte Bild gibt typische Albedowerte an für verschiedene Oberflächen (Quelle für Abb. rechts: Höper 2004, [www.bayern.de/lfu/umwberat/data/klima/treibhaus\\_2004.pdf](http://www.bayern.de/lfu/umwberat/data/klima/treibhaus_2004.pdf))

*Ramanathan 2008* hat die Albedo der Erde aufgrund neuerer Satellitenmessungen auf  $29 \pm 2\%$  bestimmt. Bei klarem Himmel beträgt sie etwa  $15 \pm 2\%$ ; das zeigt, dass die Wolken die Albedo um den Faktor 2 verstärkt und einen enormen Einfluss auf unser Klima haben. Wäre die mittlere Albedo bei 27 %, wäre dies gleichbedeutend mit einer siebenfachen  $\text{CO}_2$ -Zunahme.

## 2 Der Kohlenstoffkreislauf

Kohlendioxid wird bei der Atmung von Menschen und Tieren sowie bei der mikrobiellen Zersetzung von Pflanzen und bei der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe (Kohle, Holz, Erdgas, Öl) an die Atmosphäre abgegeben. Das  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre steht in einem Austausch mit dem Wasser der Ozeane und den Pflanzen der Landmassen. Die Verteilung des auf der Erde vorhandenen Kohlenstoffs auf einzelne Teilsysteme (z.B. Erdkruste, Ozeane, Pflanzen, Atmosphäre) sowie der Austausch von Kohlenstoff zwischen diesen Systemen wird als globaler Kohlenstoffkreislauf bezeichnet. In Abb. 2.1 ist dieser globale Kohlenstoffkreislauf dargestellt. Auf die wesentlichen Teile und Wechselwirkungen des globalen Kohlenstoffkreislaufs wird im Folgenden eingegangen.

Kohlenstoff ist auf der Erde in vielen Reservoiren gespeichert: In der Atmosphäre, im Wasser und den Ozeanen, in Gesteinen wie Kalkstein, in fossilen Brennstoffen wie Kohle, Öl und Gas, in lebenden Pflanzen und toter organischer Materie wie Holz, in Pflanzenresten und Humus im Boden.

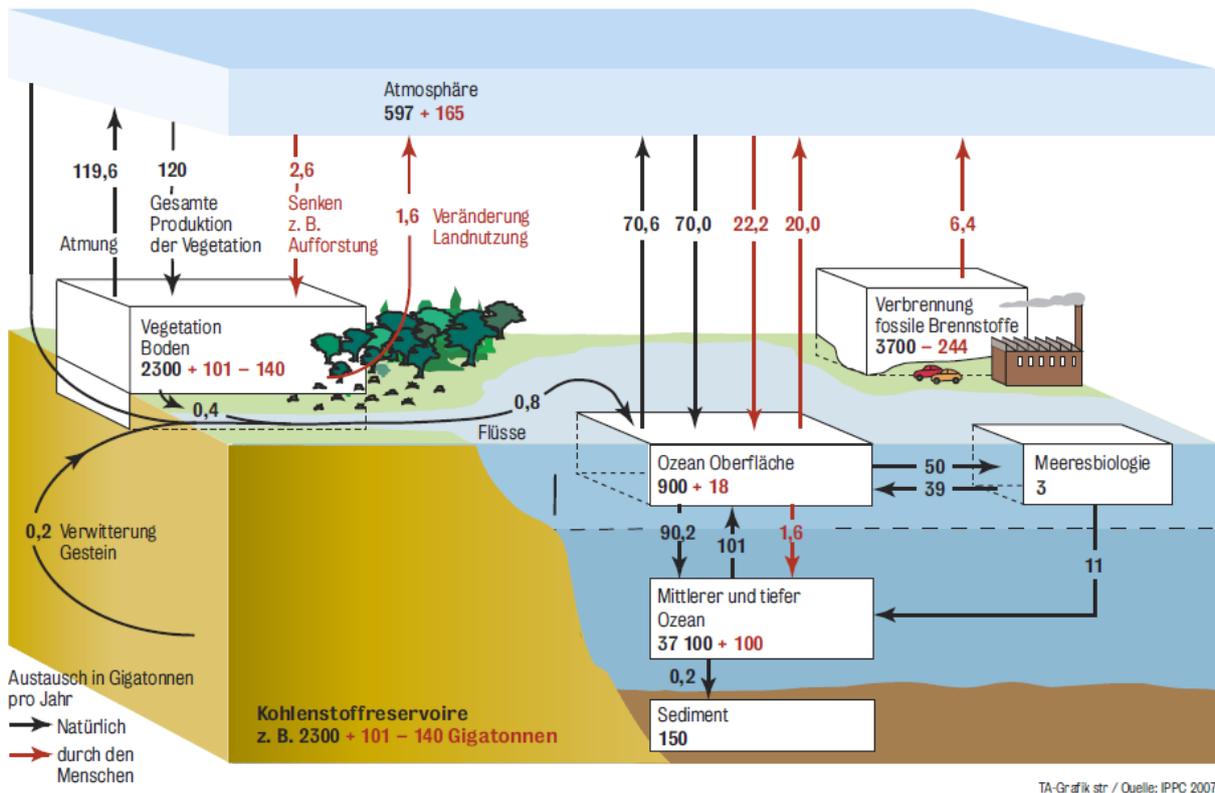


Abb. 2.1: Der globale Kohlenstoffkreislauf für die 1990er Jahre. Die wichtigsten jährlichen Flüsse in Gt Kohlenstoff (C): vorindustrielle, ‚natürliche‘ Flüsse in schwarz und ‚anthropogene‘ Flüsse in rot. Der Fluss von -140 Gt C vom Bereich ‚Vegetation, Böden und Detritus‘ stellt die kumulierte Emission durch Landnutzung dar. Der terrestrische Nettoverlust von -39 Gt C aus der Meeresablagerung erfordert eine terrestrische Biosphärensenke von 101 Gt C (1 Gt = 1 Mrd. t) (IPCC 2007)

Neben der Atmosphäre sind der Ozean und die Landbiosphäre die wichtigsten Kohlenstoffspeicher, die mit der Atmosphäre in einem aktiven Austausch stehen (Abb. 2.1). Beide Reservoire sind z.Zt. eine Netto-Senke von anthropogenem Kohlenstoff aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Landnutzung (Entwaldung). Von den anthropogenen Emissionen in Höhe von 7,2 Mrd. t C pro Jahr (2000 – 2005) verbleiben nach IPCC 2007 ca. 4,1 Mrd. t in der Atmosphäre, während die Netto Ozean-Atmosphäre-Senke auf - 2,2 Mrd. t und die Netto Land-Atmosphäre Senke mit 0,9 Mrd. t abgeschätzt wird.

Das atmosphärische  $\text{CO}_2$  wird relativ schnell mit dem Ozean und dem Land-Ökosystem ausgetauscht. IPCC 2007 schätzt die Nettoaufnahme des Ozeans auf  $2,2 \pm 0,5$  Mrd. t C/Jahr. Die Ozeane verhalten sich jedoch unterschiedlich. Während der tropische Ozean  $\text{CO}_2$  „ausgast“ (mittlerer Fluss 0,7 Mrd. t C/Jahr), ist der extratropische nordhemisphärische Ozean und der Südliche Ozean eine deutliche  $\text{CO}_2$  Senke (2,7 Mrd. t C/Jahr).

Der Nettofluss Land – Atmosphäre beträgt ca.  $-0.9 \pm 0.6$  Mrd. t C/Jahr. Die Landsenke hat von - 1,7 in den 80er auf  $-2.6$  ( $-4.3$  bis  $-0.9$ ) Mrd. t C/Jahr in den 90er Jahren zugenommen. Als Ursache wird eine verstärkte Aufnahme von  $\text{CO}_2$  durch Stimulation der Photosynthese in den Pflanzen und Bäumen durch das erhöhte  $\text{CO}_2$  Angebot ( $\text{CO}_2$  Düngung) angenommen. Der Fluss durch Landnutzungsänderung beträgt in den 90er 1.6 (0.5 - 2.7) Mrd. t C/Jahr. Die Entwaldung war in den 90er um 0,2 bis 0,3 Mrd. t C/Jahr höher als in den 80er Jahren. Die tropische Entwaldung führte zu einer Kohlendioxidzunahme in den 90er von etwa 1.0 (0.5 –1.6) Mrd. t C/Jahr. Die Angaben sind mit großen Unsicherheiten verbunden.

Derzeit nimmt der Ozean von dem anthropogen emittierten Kohlenstoff mehr aus der Atmosphäre auf als das Land. In den 80er Jahren war das Verhältnis noch größer; es kann sich jedoch, z.B. durch den so genannten Düngungseffekt, auch wieder umkehren.

Die Einbeziehung des Kohlenstoffkreislaufs in die Klimamodelle ist für die Modellentwicklung von entscheidender Bedeutung. Mit 11 gekoppelten Klima-Kohlenstoffmodellen wurde die Kopplung zwischen Klima und Kohlenstoffkreislauf untersucht (*IPCC 2007*). Zunächst ergibt sich eine verstärkte Aufnahme des  $\text{CO}_2$  in der Biosphäre durch den Düngungseffekt. Bis Ende des 21. Jahrhunderts zeigen alle Modelle einen steigenden verbleibenden Anteil des Kohlendioxids in der Atmosphäre, d.h. das Land und der Ozean kann dann weniger  $\text{CO}_2$  aufnehmen. Die  $\text{CO}_2$  Zunahme allein wird zu einer fortgesetzten Aufnahme durch das Land und den Ozean führen, obgleich die Wirksamkeit dieser Aufnahme durch den Karbonat-Puffer-Mechanismus im Ozean und durch die Sättigung der Kohlenstoffsенke im Land geringer wird.

## 2.1 Geosphäre (Boden und Gestein)

Die Erdkruste ist mit 99,8 % der bei weitem größte Kohlenstoffspeicher der Erde. Sie nimmt Kohlenstoff vor allem aus der Biosphäre (absterbende Pflanzen) und aus den Ozeanen (durch Sedimentation auf den Meeresböden) auf. Der Kohlenstoff ist insbesondere in karbonathaltigen Kalkgesteinen und kohlenwasserstoffhaltigen Sedimenten (Kerogene, Öl, Bitumen, Kohle) gespeichert. Der Zunahme durch abgestorbene Biomasse steht eine um eine Größenordnung höhere Abnahme an Kohlenstoff durch die Gewinnung fossiler Brennstoffe durch den Menschen gegenüber. Permafrostboden in höheren Breitengraden enthält über 455 Mrd. t C. Bei einer globalen Temperaturerhöhung könnten langfristig große Mengen des Kohlenstoffs in Form von  $\text{CO}_2$  und Methan freigesetzt werden (*UBA 2006, Schuur 2009*).

## 2.2 Ozean

Die gesamte im Ozean gelöste Menge an Kohlendioxid ist 50 Mal größer als der  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Atmosphäre. Der Gasaustausch findet vor allem in der 50 bis 100 m dicken ozeanischen Deckschicht statt und wird im Wesentlichen von der Differenz des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks zwischen Ozean und Atmosphäre angetrieben. Die größte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme findet zwischen dem 40. und 60. Breitengrad statt. In den vergangenen 200 Jahren hat das Meer ca. 120 Mrd. t des anthropogenen  $\text{CO}_2$  aufgenommen und damit die Atmosphäre um einer Konzentrationszunahme von 55 ppm „entlastet“ (*Sabine 2004*). Der gesamte jährliche Kohlendioxid-austausch beträgt ca. 100 Mrd. t (Abb. 2.2).

Die Aufnahmefähigkeit von  $\text{CO}_2$  in den Ozean ist temperaturabhängig. Eine Temperaturerhöhung von 1 °C führt infolge der geringeren Aufnahmefähigkeit von Kohlendioxid zu einer Ausgasung und damit zu einem Kohlendioxidanstieg in der Atmosphäre von etwa 4 Mrd. t C, der etwa doppelt so groß ist wie seine gegenwärtige jährliche Gesamtaufnahme von anthropogenem  $\text{CO}_2$ . Kalte Regionen erhöhen dagegen die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme des Ozeans. Über die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme und die regionale Verteilung, insbesondere in tieferen Schichten, bestehen nach *IPCC 2007* noch viele Unsicherheiten.

Gelöster anorganischer Kohlenstoff liegt im Ozean überwiegend als Hydrogenkarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) vor, da das gelöste  $\text{CO}_2$  aus der Luft mit Wasser und Karbonat zu Hydrogenkarbonat reagiert. Bei weiter ansteigendem  $\text{CO}_2$ -Gehalt steht künftig im Ozean weniger Karbonat für die chemische Reaktion mit Kohlendioxid zur Verfügung. Damit verringert sich langfristig die Fähigkeit des Ozeans, weiteres  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre einzubinden. Nach *IPCC 2007* ist dieser Effekt relativ groß: Bei einer weiteren Steigerung um 100 ppm (von 370 auf 470

ppm) verringert sich die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme durch den Ozean um 40 % gegenüber der ersten 100 ppm Steigerung seit Beginn der Industrialisierung. Neben dieser chemischen Umwandlung von  $\text{CO}_2$  wird es auch durch Photosynthese in Phytoplankton eingebunden. Über die Nahrungsaufnahme durch das Zooplankton wird es schlussendlich zu Abfall und sinkt als Detritus zum Meeresboden (Abb.2.2).

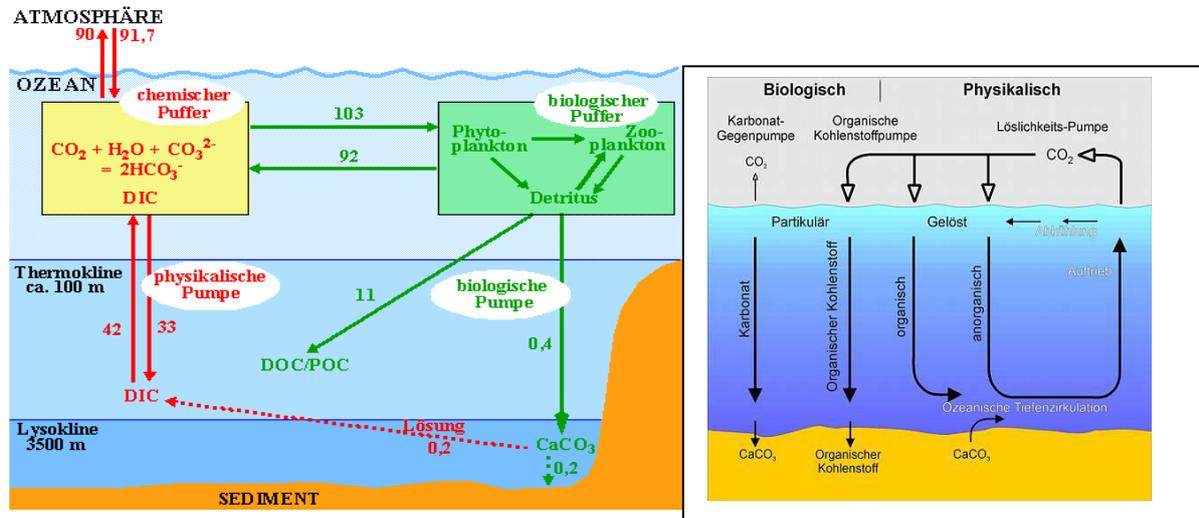


Abb.2.2: Der ozeanische Kohlenstoffkreislauf. Linkes Bild: Physikalische und chemische Prozesse sind rot, biologische Prozesse grün dargestellt (DIC = gelöster anorganischer Kohlenstoff, DOC = gelöster organischer Kohlenstoff, POC = fester organischer Kohlenstoff (Gewebeartikel), Lysokline = Grenze der Karbonatsättigung, Thermokline = Übergangsbereich zwischen warmem Oberflächenwasser und kaltem Wasser mittlerer Tiefen, Detritus = biologischer Abfall (nach IPCC 2001, aus Kasang, HBS 2005)), rechtes Bild: biologische und physikalische Kreisläufe vereinfacht dargestellt. (aus [pi.physik.unibonn.de/~diekmann/Down.../Kohlenstoffkreislauf3.ppt](http://pi.physik.unibonn.de/~diekmann/Down.../Kohlenstoffkreislauf3.ppt))

Unter der ozeanischen Deckschicht nimmt der  $\text{CO}_2$ -Gehalt deutlich zu; zum einen durch den Transport von  $\text{CO}_2$  durch absinkende Wassermassen in die Tiefe (physikalische Pumpe) und zum anderen durch Absinken organischen kohlenstoffhaltigen Materials (biologische Pumpe). Mit dem Absinken großer Wassermassen in die Tiefe infolge der thermohalinen Zirkulation wird das  $\text{CO}_2$  sehr effektiv über lange Zeiträume von bis zu tausend Jahren, der Umlaufzeit des Ozeans, dem Austausch mit der Atmosphäre entzogen. Durch die Erwärmung des Ozeans können sich weniger kalte Wassermassen bilden und absinken, damit wird die physikalische Pumpe reduziert. Die so genannte biologische Pumpe ist sehr effektiv und entfernt etwa 11 Mrd. t C pro Jahr. Ohne das ozeanische Phytoplankton würde die atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Konzentration um 150 bis 200 ppm höher liegen. Deswegen sind auch Überlegungen im Gange, den Nährstoffgehalt im Ozean zu erhöhen, um die Bildung von Phytoplankton zu steigern (s. Kap.11.1). Als zunehmend problematisch wird auch die Versauerung der Ozeane durch einen höheren  $\text{CO}_2$ -Gehalt angesehen (IPCC 2007).

Insgesamt geht man davon aus, dass sich die Kohlenstoffsенke des Ozeans (u.a. wegen höherer Meerwassertemperaturen und Versauerung) wahrscheinlich künftig abschwächen und damit ein größerer Teil des  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre verbleiben wird (IPCC 2007).

## 2.3 Atmosphäre

In der Atmosphäre befinden sich 0,001 % des globalen Gesamtkohlenstoffs, im Wesentlichen in Form von Kohlendioxid. Hier findet der  $\text{CO}_2$ -Austausch mit der Biosphäre, der Lithosphäre (Vulkane) und dem Ozean statt. Der Konzentrationsanstieg des  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre um ca. ein Drittel von ca. 280 ppm im Jahre 1860 auf ca. 386 ppm im Jahre 2009 ist insbesondere auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen.

## 2.4 Biosphäre

Der Austausch von  $\text{CO}_2$  zwischen der Atmosphäre und der Biosphäre erfolgt hauptsächlich über die Photosynthese der Pflanzen, wobei Kohlenstoff in den Pflanzen gespeichert wird. Bei der Respiration (Atmung) und der Verwesung der Pflanzen sowie auch der Atmung von Tieren und Menschen wird  $\text{CO}_2$  wieder in die Atmosphäre freigesetzt. Die Menschheit (ca.

6,8 Mrd. 2009) atmet jährlich 0,6 Mrd. t Kohlenstoff in Form von  $\text{CO}_2$  aus, das jedoch zuvor über die Nahrungskette der Atmosphäre entzogen wird und damit quasi  $\text{CO}_2$ -neutral ist. Der Kohlenstoff abgestorbener Pflanzen bildet ein Kohlenstoffreservoir, das teilweise durch die Flüsse in die Ozeane geschwemmt wird und teilweise in der Erde (beispielsweise als Humus) gespeichert wird. Insgesamt werden jährlich etwa 150 Mrd. t Kohlenstoff umgesetzt.

Rodungen und die Intensivierung der Landwirtschaft führen zu einem schnelleren Kohlendioxid-Umsatz, wobei aber die in den Waldgebieten und im Boden gespeicherte Kohlenstoffmenge größer ist als die in der sonstigen Biomasse.

Beträchtliche Unsicherheiten bestehen in der Kenntnis über die Wechselwirkungen des  $\text{CO}_2$  der Atmosphäre mit der Biosphäre. Die Unsicherheiten betreffen die Abschätzungen und Messungenauigkeiten bei den Angaben der Umwandlung von Wäldern in landwirtschaftliche Nutzflächen, der historischen Rodungen, der gegenwärtigen Kohlenstoffvorräte und der Rodungsraten in tropischen Regionen. Offen ist auch, ob und unter welchen Bedingungen und ab welcher  $\text{CO}_2$ -Konzentration die Biosphäre sich von einer Senke zu einer Quelle umwandeln wird und sich damit der Treibhauseffekt verstärken könnte (*IPCC 2007*).

Neben Kohlendioxid sind auch Kohlenmonoxid und Methan mit untergeordneter Bedeutung am Kohlenstoff-Kreislauf beteiligt.

### 3 Strahlungshaushalt und Treibhauseffekt

Die wichtigste Energiequelle der Erde ist die Sonne. Derzeit erreichen etwa  $1367 \text{ W/m}^2$  kurzwellige Sonnenstrahlung die Troposphäre. Die im thermischen Gleichgewicht aufgenommene Energie wird als Wärmestrahlung wieder an den Weltraum abgegeben. Verschiedene natürliche und anthropogene Faktoren beeinflussen den Energiehaushalt der Erde.

#### 3.1 Strahlungsbilanz

Als Strahlungsbilanz bezeichnet man die Differenz zwischen der einfallenden Globalstrahlung und der von der von der Erdoberfläche reflektierten bzw. umgewandelten Strahlung.

Für das Klimasystem Erde ist die langfristige Bilanz zwischen einfallender solarer und in den Weltraum abgegebener thermischer Strahlung entscheidend. Die Strahlungsvorgänge führen zu der global und über das Jahr gemittelte Strahlungsbilanz der Erde, wie sie in der Abbildung 3.1 für den Zeitraum März 2000 – Mai 2004 dargestellt ist. Die Strahlungsbilanz gibt an, wie viel Strahlung (in welchen Wellenlängen) auf die Erdoberfläche trifft bzw. die Erde verlässt.

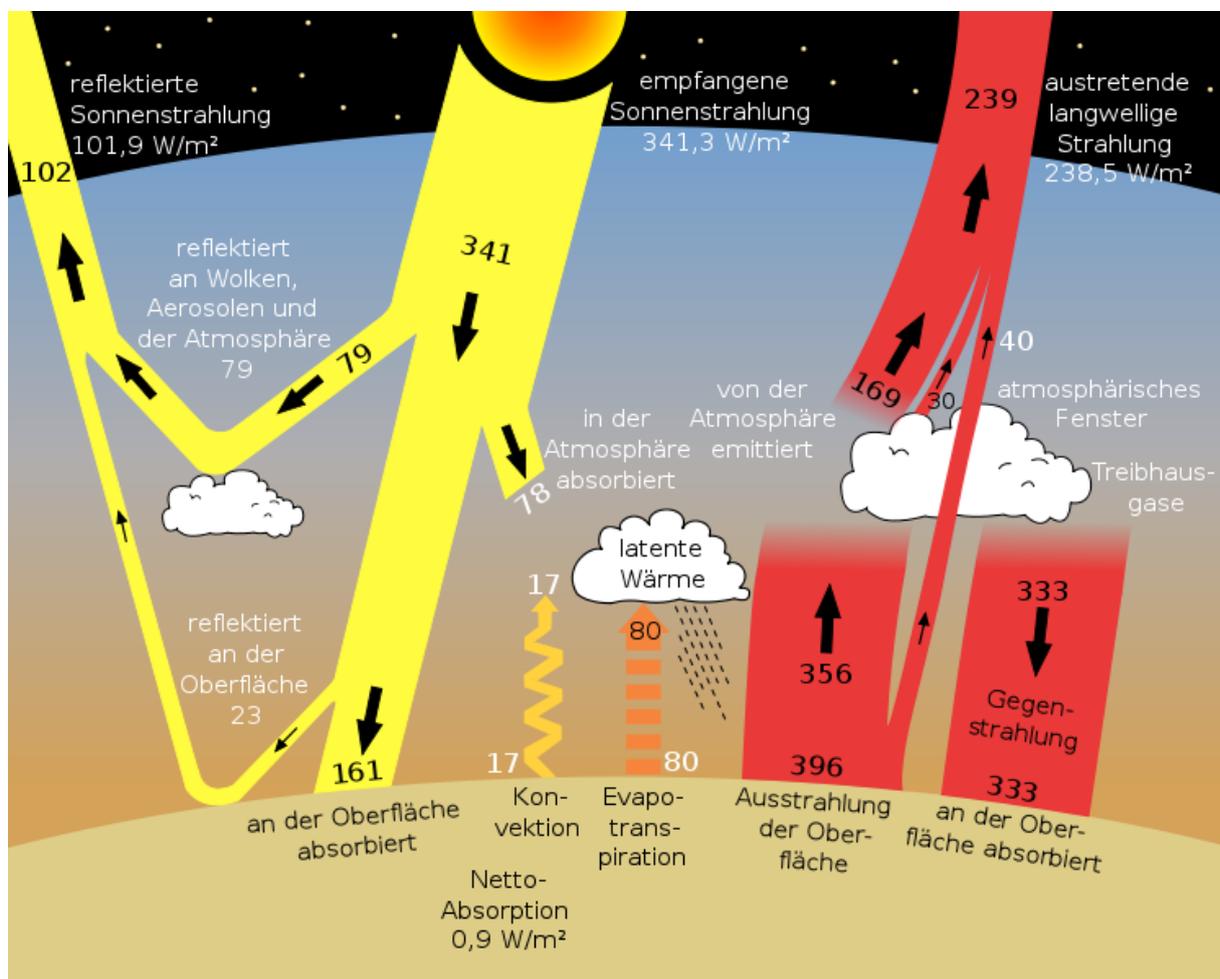


Abb. 3.1: Global und über das Jahr gemittelte Strahlungsbilanz der Erde in  $\text{W/m}^2$  für Periode März 2000 – Mai 2004. Links sind die Flüsse kurzwelliger, rechts die der langwelligigen Strahlung dargestellt. Die aus der Energiedifferenz Erdoberfläche-Atmosphäre resultierenden Flüsse latenter und sensibler Wärme sind in der Mitte dargestellt (Trenberth 2009) (deutsch aus Wikipedia.org.de)

Danach gelangen von  $341 \text{ W/m}^2$  einfallender Sonnenenergie (entspricht der über die Erde gemittelten gesamten solaren Einstrahlung ( $1/4$ ), s. Kap. 4.1.1) etwa  $184 \text{ W/m}^2$  bis zum Erdboden, wovon  $23 \text{ W/m}^2$  wieder in den Weltraum reflektiert werden. Der Rest wird von den Bestandteilen der Atmosphäre (Gase, Aerosole, Wolken) entweder absorbiert ( $78 \text{ W/m}^2$ ) oder in den Weltraum zurückgestreut ( $79 \text{ W/m}^2$ ). Von der einfallenden Solarstrahlung gelan-

gen also etwa 31 % wieder in den Weltraum zurück, knapp 20 % verbleiben in der Atmosphäre und 49 % im Erdboden und bewirken dort dessen Erwärmung. Zum Ausgleich der Strahlungsenergiebilanz der Erde muss die Wärmestrahlung des Planeten in den Weltraum gerade  $239 \text{ W/m}^2$  betragen. Dazu tragen die atmosphärischen Gase, Wolken und Aerosole mit  $199 \text{ W/m}^2$  bei, während etwa  $40 \text{ W/m}^2$  direkt vom Boden durch die atmosphärischen Transmissionsfenster in den Weltraum gelangen. Am Erdboden kommen noch  $333 \text{ W/m}^2$  zum solaren Strahlungsfluss hinzu. Die hohe Einstrahlung von zusammen  $494 \text{ W/m}^2$  wird durch thermische Abstrahlung von  $396 \text{ W/m}^2$ ,  $17 \text{ W/m}^2$  durch Wärmeleitung (Konvektion) und  $80 \text{ W/m}^2$  durch Verdunstung wieder von der Erdoberfläche abgeführt (Trenberth 2009).

Die zuverlässige Messung der Strahlungsbilanz gestaltet sich als äußerst schwierig. Auch Satellitenmessungen brachten noch keine eindeutigen Ergebnisse. Nach IPCC 2007 gab es danach Schwankungen der Abstrahlung der Erde sowohl räumlich als auch zeitlich. Einflüsse von Wolken, Aerosolen und städtischen Gebieten sind erheblich. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit von weiteren Untersuchungen. Die NASA misst seit über 10 Jahren mit dem „Clouds and the Earth’s Radiant Energy System“ (CERES) – mit satellitengestützten Messinstrumenten die Nettostrahlung (Strahlungshaushalt) der Erde und ihre Anomalien.

### 3.2 Strahlungsantrieb

Der Strahlungsantrieb (radiative forcing, RF) ist ein Maßstab für den Einfluss eines natürlichen oder anthropogenen Faktors auf die Veränderung des Strahlungshaushaltes der Atmosphäre. Er ist definiert als die Differenz zwischen der einfallenden Strahlungsenergie und der aus einem Klimasystem hinausgehenden Strahlungsenergie.

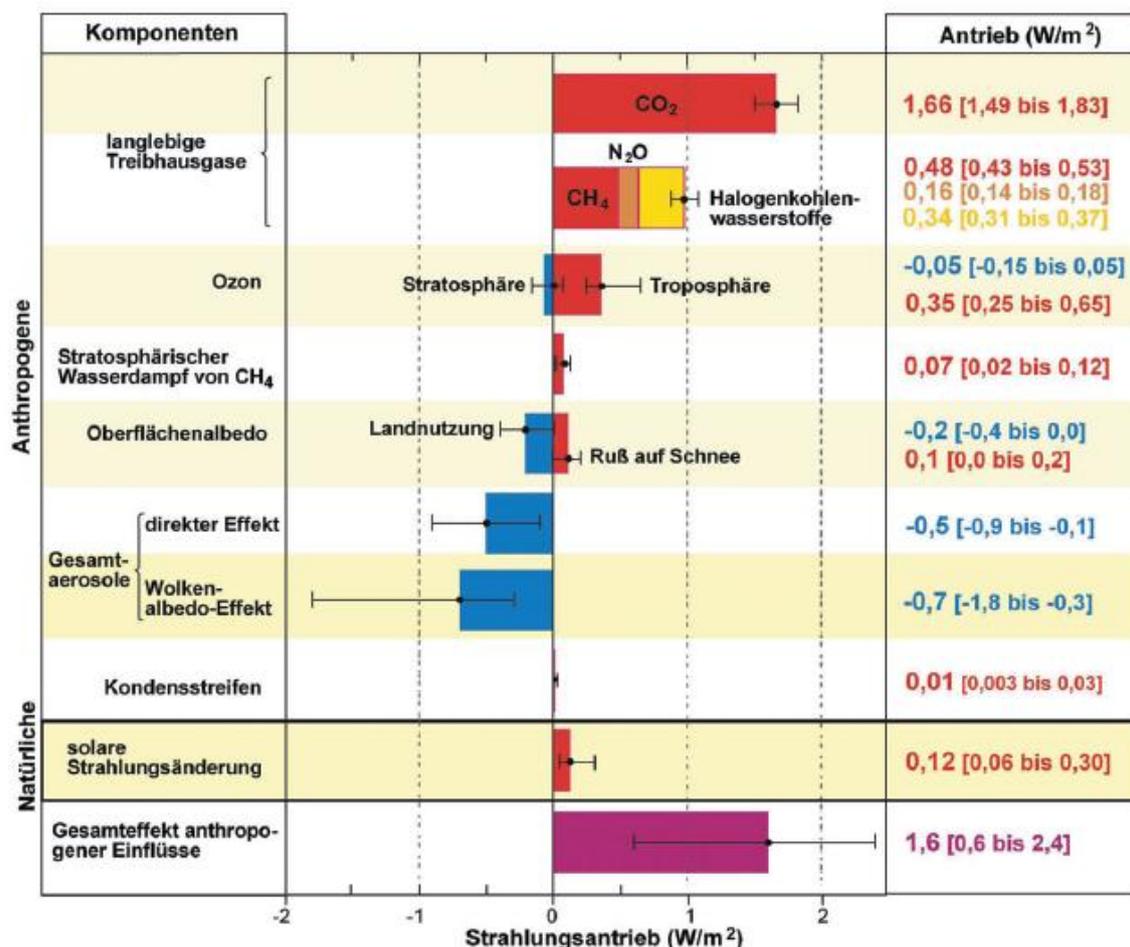


Abb. 3.2: Global gemittelte Strahlungsantriebe in  $\text{W/m}^2$  für Treibhausgase, Aerosole und Solarstrahlung, Flugzeuge, Landnutzung mit Abschätzung der Unsicherheiten (1750-2000). Der Grad des wissenschaftlichen Verständnisses ist bei den Aerosolen, den Wolken, der Landnutzung und dem solaren Einfluss noch sehr gering (Quelle: Jacobeit 2007 nach IPCC 2007)

Der Strahlungsantrieb gibt die Veränderung der Nettostrahlungsflussdichte aus solarer Einstrahlung und terrestrischer Abstrahlung an der Tropopause in Watt pro Quadratmeter ( $\text{W/m}^2$ ) an. Die Zunahme der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre führt zu einer Veränderung des Strahlungsgleichgewichtes und damit zu einer Klimaänderung.

Die Balken in Abb. 3.2 zeigen den globalen mittleren Strahlungsantrieb nach *IPCC 2007* für die anthropogenen Treibhausgase, Aerosole, die Solarstrahlungsänderungen und Landnutzungsänderungen. Die Strahlungsantriebe zeigen die Beiträge für den Zeitraum 1750 - 2000. Die Linien geben die quantitativen Unsicherheiten an, die insbesondere bei den Aerosolen noch erheblich sind. Die langlebigen und gut durchmischten Treibhausgase wie Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid und die FCKWs haben mit  $2,45 \text{ W/m}^2$  den größten Beitrag seit Beginn der Industrialisierung. Aber auch natürliche Faktoren wie Solarstrahlung, Vulkanausbrüche und mineralische Stäube haben einen erheblichen Einfluss. Die vermehrten Aerosole führen dagegen zu teilweise kompensierenden Antrieben u.a. durch Absorption und Reflexion (direkter Aerosoleffekt) und die damit verknüpften veränderten Wolkeneigenschaften (indirekter Aerosoleffekt).

Das Verständnis der Einflüsse auf das Klima durch die anthropogene Erwärmung und Abkühlung hat sich seit dem dritten Bericht des *IPCC 2001*(TAR) verbessert. Das hat dazu geführt, dass nach *IPCC 2007* ein sehr hohes Vertrauen darin besteht, dass der globale mittlere Nettoeffekt der menschlichen Aktivitäten seit 1750 zu einer Erwärmung geführt hat, mit einem Strahlungsantrieb von  $+1,6$  ( $+0,6 - +2,4$ )  $\text{W/m}^2$  (Abb. 3.3).

Der kombinierte Strahlungsantrieb durch die Zunahme von Kohlendioxid, Methan und Distickstoffoxid beträgt  $+2,30$  ( $+2,07 - 2,53$ )  $\text{W/m}^2$ . Im Zeitraum 1995 – 2005 erhöhte sich der Strahlungsantrieb von Kohlendioxid um 20 %. Der anthropogene Beitrag der Aerosole ergibt zusammen einen Abkühlungseffekt mit einem gesamten negativen Strahlungsantrieb von  $-0,5$  ( $-0,9 - -0,1$ )  $\text{W/m}^2$  und einem indirekten Wolken-Albedo Strahlungsantrieb von  $-0,7$  ( $-1,8 - -0,3$ )  $\text{W/m}^2$ . Der Strahlungsantrieb durch Aerosole ist heute besser verstanden als zur Zeit des TAR (*IPCC 2001*), bleibt aber die dominante Unsicherheit beim Strahlungsantrieb. Änderungen beim Ozon und den Halokarbonen tragen zu  $+0,69 \text{ W/m}^2$  bei und Änderungen in der Oberflächenalbedo und Ablagerungen von Rußaerosolen auf Schnee ergeben einen entsprechenden Strahlungsantrieb von  $-0,2 \text{ W/m}^2$  bzw.  $+0,1 \text{ W/m}^2$ . Änderungen in der Solarstrahlung seit 1750 verursacht einen Strahlungsantrieb von  $+0,12$  ( $+0,06 - +0,30$ )  $\text{W/m}^2$ ; das ist weniger als die Hälfte der Abschätzung für den 3. Bericht des *IPCC 2001* (TAR) (*IPCC 2007*).

### 3.3 Der Treibhauseffekt

Der missverständliche aber allgemein gebräuchliche Begriff „Treibhauseffekt“ beschreibt die Vorgänge in unserer Atmosphäre, die – ähnlich wie in einem Treibhaus – zu einer Erwärmung der Atmosphäre führen.

Die so genannten Treibhausgase wie Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid (Lachgas), Ozon und die synthetischen Fluorchlorkohlenwasserstoffe haben die besondere Eigenschaft, die kurzwellige Strahlung der Sonne weitgehend ungehindert durchzulassen, die langwellige Ausstrahlung der Erde aber zu absorbieren. Diese ungleiche Durchlässigkeit der Atmosphäre für Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge führt zum so genannten Treibhauseffekt (Abb. 3.4). Die Treibhausgase in der Atmosphäre absorbieren die von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung (IR) und strahlen ihrerseits in den Weltraum und in Richtung Erdoberfläche aus. Letzterer Teil wird wieder von der Erdoberfläche absorbiert, so dass die Atmosphäre insgesamt wärmer wird als ohne Treibhausgase. Der natürliche Treibhauseffekt aufgrund der Konzentration dieser Gase vor Beginn der Industrialisierung führt zu einer Erwärmung der Erde um rund  $33 \text{ }^\circ\text{C}$ , von  $-18^\circ \text{ C}$  auf  $+ca. 15^\circ \text{ C}$ . Die Absorption der langwelligen Wärmestrahlung der Erdoberfläche im Infrarotbereich erfolgt je nach Treibhausgas in unterschiedlichen Absorptionsbanden im Bereich der sog. Wasserdampffenster, wo der Wasserdampf nur teilweise absorbiert (*Bakan u. Raschke 2002*, Abb. 3.5).

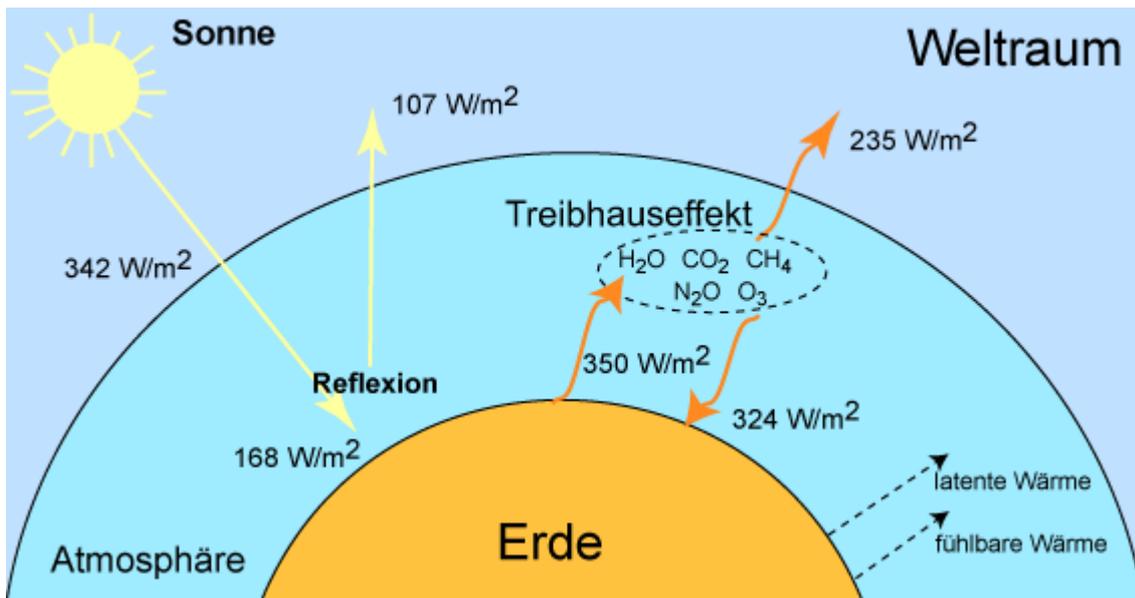


Abb. 3.4: Vereinfachtes Schema der Funktionsweise des Treibhauseffektes. Die einfallende kurzwellige Solarstrahlung wird an der Erdoberfläche absorbiert und in langwellige IR-Strahlung umgewandelt. Die Treibhausgase in der Atmosphäre absorbieren diese wiederum und strahlen sie teilweise zur Erde zurück; dadurch wird es wärmer (Kasang, HBS 2005)

Zwischen Treibhausgaskonzentrationen und Treibhauseffekt besteht kein linearer Zusammenhang, da die meisten Absorptionsbanden der natürlichen Treibhausgase nahezu gesättigt sind (Abb. 3.5). Deshalb leisten lediglich die Flügelbereiche der Absorptionsbanden natürlicher Treibhausgase (Wasserdampf, Kohlendioxid, Ozon) und die noch nicht gesättigten Absorptionsbanden einiger Treibhausgase wie die FCKWs einen Beitrag (Bakan u. Raschke 2002, Claussen 2003).

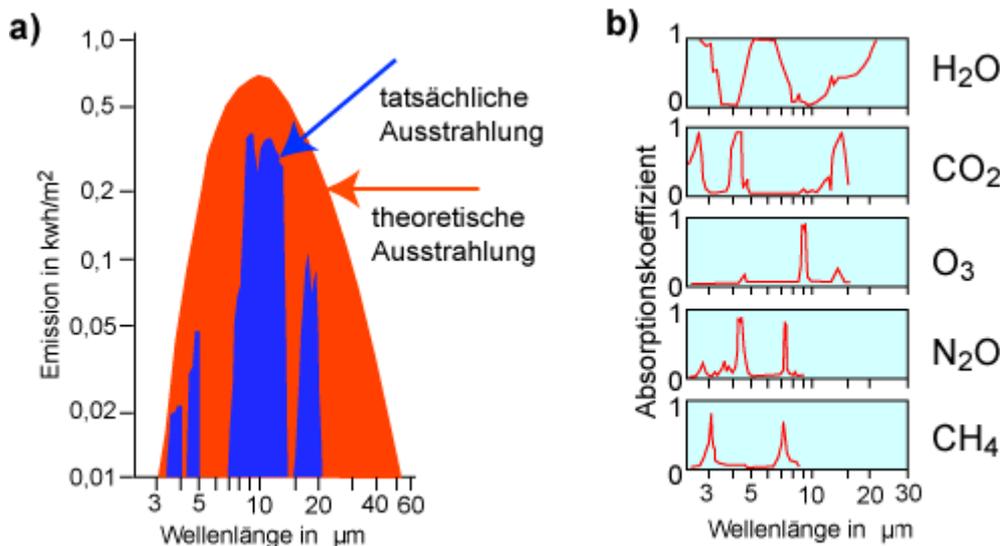


Abb. 3.5: (a) Spektrum der als Schwarzkörper idealisierten terrestrischen (255 K) Wärmestrahlung (rot) der Erde, die tatsächliche Ausstrahlung (blaue Fläche) aufgrund der Wirkung der Treibhausgase, aufgetragen über der log. Wellenlängenskala von 0,1 bis 60  $\mu\text{m}$ . Das Produkt aus Wellenlänge und Strahlendichte auf der Ordinate stellt sicher, dass gleichen Flächen gleiche Energiemengen entsprechen (b) Wellenlängenbereiche, in denen die Treibhausgase die Wärmestrahlung absorbieren. Der Absorptionskoeffizient gibt die Intensität dieser Absorption an. Die Spurengase Wasserdampf, Kohlendioxid, Ozon, Distickstoffoxid und Methan stellen die wesentlichen natürlichen Treibhausgase dar (nach IPCC 2001, Kasang HBS und Bakan u. Raschke 2002)

Durch die Abstrahlung der von den Treibhausgasen zuvor absorbierten Energie erhöht sich die Menge an Energie, die die Erdoberfläche erreicht. Da der Strahlungshaushalt der Erde langfristig ausgeglichen sein muss, erhöht sich die Energiemenge, die von der Erde wieder abgestrahlt wird und nach dem Stefan - Boltzmann-Gesetz auch die Durchschnittstemperatur

der Erde. Das Gesetz besagt, dass die abgestrahlte Leistung pro Einheitsfläche proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur  $T$  ist (Abb. 3.6). Die Proportionalitätskonstante, mit deren Hilfe die Leistung bestimmt werden kann, heißt die Boltzmann-Konstante ( $\sigma$ ).

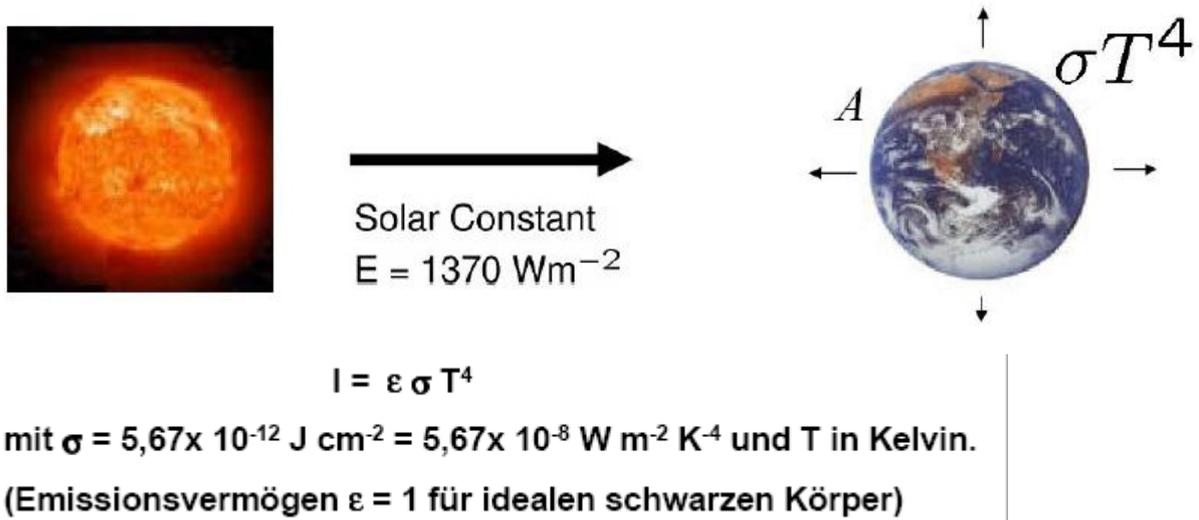


Abb. 3.6: Mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz wird die theoretische Temperatur der Erdoberfläche berechnet ( $\epsilon (A) = 0,3$  für Erdoberfläche), (Quelle oberes Bild aus [http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/wegscheider/gebhardt\\_files/skripten/Strahlungsbilanz.Wolf.pdf](http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/wegscheider/gebhardt_files/skripten/Strahlungsbilanz.Wolf.pdf))

Ein Ausgleich der Energiebilanz findet nicht nur durch die Strahlungsflüsse, sondern auch durch die latenten und fühlbaren Wärmeflüsse zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre statt (Abb. 3.4).

Um die Wirkung der Treibhausgase miteinander vergleichen zu können, wurde das so genannte **Treibhauspotential** (global warming potential, GWP) eingeführt. Es gibt an, wievielfach stärker ein Treibhausgas zum Treibhauseffekt beiträgt als  $\text{CO}_2$ , dessen Treibhauspotential auf 1 gesetzt wird (bei einer mittleren Verweildauer von 100 Jahren) (Abb. 3.7). Methan hat ein 21-faches stärkeres Treibhauspotential als  $\text{CO}_2$  (25-fach *IPCC 2007*),  $\text{N}_2\text{O}$  ein 310-faches (298-fach *IPCC 2007*) und die FCKWs ein bis zu 11 700-faches (14 800-fach *IPCC 2007*).  $\text{SF}_6$  hat das höchste Treibhauspotential mit 23 900 (22 800 *IPCC 2007*). Damit können die unterschiedlichen Beiträge zum Treibhauseffekt einzelner Treibhausgase verglichen und auch in  $\text{CO}_2$ -Äquivalente umgerechnet werden. Dies vereinfacht auch die Eingaben für Modellrechnungen. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass infolge der Unsicherheiten bei den Angaben zur Lebensdauer und der indirekten Wirkung der Fehlerbereich mit  $\pm 35\%$  groß ist (*IPCC 2007*). Für die internationalen Berichte im Rahmen des Kyoto-Protokolls werden weiterhin die Werte von 1995 verwendet, obwohl inzwischen aufgrund neuerer Erkenntnisse teilweise abweichende Werte (in Klammern) im vierten Bericht des IPCC (*AR4 IPCC 2007*) angegeben werden. Bei Methan werden indirekte Effekte durch Ozon- und stratosphärische Wasserdampfbildung berücksichtigt (*IPCC 2007*).

Greenhouse gas	Chemical formula	1995 IPCC GWP
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	1
Methane	CH <sub>4</sub>	21
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	310
<b>Hydrofluorocarbons (HFC)</b>		
HFC-23	CHF <sub>3</sub>	11700
HFC-32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	650
HFC-41	CH <sub>3</sub> F	150
HFC-43-10mee	C <sub>5</sub> H <sub>2</sub> F <sub>10</sub>	1300
HFC-125	C <sub>2</sub> HF <sub>5</sub>	2800
HFC-134	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub> (CHF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub> )	1000
HFC-134a	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub> (CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub> )	1300
HFC-152a	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> F <sub>2</sub> (CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub> )	140
HFC-143	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> F <sub>3</sub> (CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> F)	300
HFC-143a	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> F <sub>3</sub> (CF <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> )	3800
HFC-227ea	C <sub>3</sub> HF <sub>7</sub>	2900
HFC-236fa	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	6300
HFC-245ca	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> F <sub>5</sub>	560
<b>Perfluorocarbons (PFC)</b>		
Perfluoromethane	CF <sub>4</sub>	6500
Perfluoroethane	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	9200
Perfluoropropane	C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	7000
Perfluorobutane	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	7000
Perfluorocyclobutane	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	8700
Perfluoropentane	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	7500
Perfluorohexane	C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	7400
<b>Sulphur hexafluoride</b>		
Sulphur hexafluoride	SF <sub>6</sub>	23900

Quelle: FCCC/CP/2002/8, S.15

Abb. 3.7: Relatives molekulares Treibhauspotential, gemessen an der Treibhauswirkung von CO<sub>2</sub> (=1) über 100 Jahre (bei Methan ist der indirekte Effekt über die Bildung von Ozon und stratosphärischem Wasserdampf enthalten) diese 1995 festgelegten Werte werden zur Berechnung des Treibhauspotentials im Rahmen des Kyoto-Protokolls verwendet (NIR 2010)

Von Satelliten als auch von der Erde aus sind inzwischen Änderungen der Strahlung aufgrund des Treibhauseffektes gemessen worden. *Harries 2001* hat mit Hilfe von Satellitenmessungen die Verteilung der Wärmestrahlung als Funktion der Wellenlänge im Bereich der Absorptionsbanden der Treibhausgase gemessen und eine Verringerung der Wärmestrahlung, die mit verschiedenen Satelliten 1970 und 1997 gemessen wurde, festgestellt. *Philipona 2004* vom World Radiation Center, Davos, hat dies durch Messungen der einfallenden Infrarotstrahlung an 11 Messstationen in den Alpen bestätigt. In Europa hat, wie Messungen gezeigt haben (*Philipona 2005, 2009*), die langwellige Strahlung mit der Temperatur und absoluten Feuchte zugenommen und die solare Strahlung abgenommen. Dies zeigt den Antrieb durch den Treibhauseffekt und die deutliche Wasserdampfrückkoppelung. *Chen 2009* hat die von Satelliten gemessenen IR – Spektren von 1970, 1997, 2003 und 2006 miteinander verglichen und festgestellt, dass sich das Spektrum entsprechend der Zunahme der Treibhausgasemissionen in der Troposphäre verändert hat. Beim CO<sub>2</sub> entspricht das Differenzspektrum sehr gut dem modellierten Differenzspektrum. Dies stellt ein direkter Beleg für die Theorie des Treibhauseffektes dar.

## 4 Natürliche Einflussfaktoren auf das Klima

Klimaänderungen können sich durch interne Wechselwirkung im Klimasystem, das sich zumindest in Teilsystemen chaotisch verhält, ergeben (Claussen 2003, Bengtsson 2004). Ebenso verändern externe Faktoren wie Solarstrahlungsänderungen, Schwankungen der Erdbahnparameter und explosive Vulkanausbrüche unser Klima. Die anthropogenen Einflüsse durch Änderungen der Treibhausgaskonzentrationen, Aerosole, Ozonschicht und Landnutzung (s. Kap. 5) werden zu den externen Faktoren gerechnet. Zu den internen Einflussfaktoren zählen auch die Änderungen der Schwingungszustände in der Atmosphäre (Nordatlantische Oszillation (NAO), Arktische Oszillation (AO), Luftwirbel in Polargebieten (Vortex) und die südliche Oszillation (SO)), die gekoppelt ist mit Schwankungen der Meeresströmungen (El Niño- Southern Oscillation (ENSO), sowie die Thermohaline Oszillation (THC). Diskutiert wird, inwieweit diese von den menschlichen Aktivitäten beeinflusst werden.

### 4.1 Sonne

Die Sonne ist im Mittel 149 Millionen Kilometer von uns entfernt. Im Innern der Sonne finden Kernreaktionen durch Verschmelzung von Wasserstoff-Atomkernen und Helium-Atomkernen statt, wodurch ungeheure Mengen an Energie freigesetzt werden. Diese wird durch Konvektion an die Oberfläche geleitet (Temperatur ca. 6 000°C) und in Form von Licht und Wärme an die Umgebung abgegeben (Abb. 4.1).

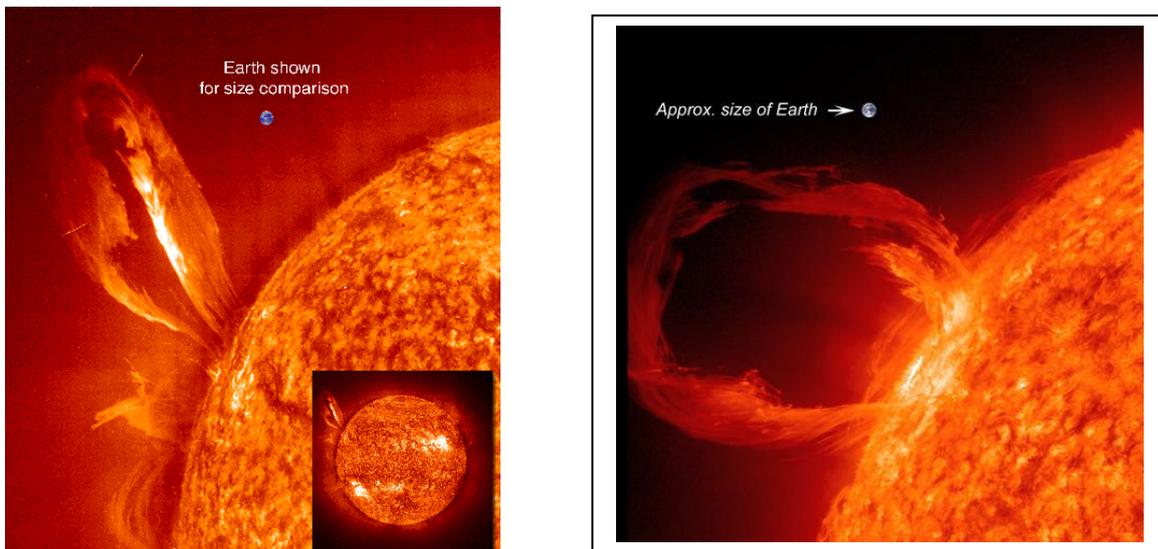


Abb. 4.1: Ausbruch von Protuberanzen (glühende Gaswolken) auf der Oberfläche der Sonne, die bis zu 1 Mio. km in die Sonnenatmosphäre hinausragen können (zum Vergleich ist die Erde eingezeichnet) (<http://soho.esac.esa.int/>), rechtes Bild vom **10. März 2010**, nach einer fast 2-jährigen „Ruhephase“ ist die Sonne wieder aktiv (<http://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/active.php?v=item&id=2>)

Die Sonne hat einen wesentlichen Einfluss auf das Klima der Erde. Erkenntnisse über die Bedeutung der Solarstrahlung als Klimafaktor sind in den vergangenen Jahren insbesondere seit Beginn der Satellitenmessungen 1979 verstärkt gewonnen worden (IPCC 2007).

Nicht nur die Entfernung der Sonne und die Neigung der Erde in ihrer Umlaufbahn um die Sonne spielen eine Rolle (Abb.4.2). Auch die Strahlung selbst variiert über Jahre und Jahrtausende. Die Strahlung der Sonne liefert mehr als 99,9% aller dem System Erde/Atmosphäre zur Verfügung stehenden Energie. Die Erde „taumelt“ innerhalb von 22 000 Jahren wie ein kippender Kreisel. Nach ca. 11.000 Jahren hat sich die Erdachse wegen der Präzession zur anderen Seite geneigt. Durch diese „Präzession“ schwankt die Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel entsprechend. Zusätzliche periodische Änderungen in der Neigung der Erdachse (Obliquität) und in der Form der Umlaufbahn (Exzentrizität) führen zu Zyklen mit Perioden von 41 000 und 100 000 Jahren. Je größer der Neigungswinkel, desto größer sind die jahreszeitlichen Temperaturunterschiede. Die Überlagerung dieser 3 Parameter ergibt ein Muster, das recht gut mit den Eiszeiten korreliert (Milankovitch - Theorie).

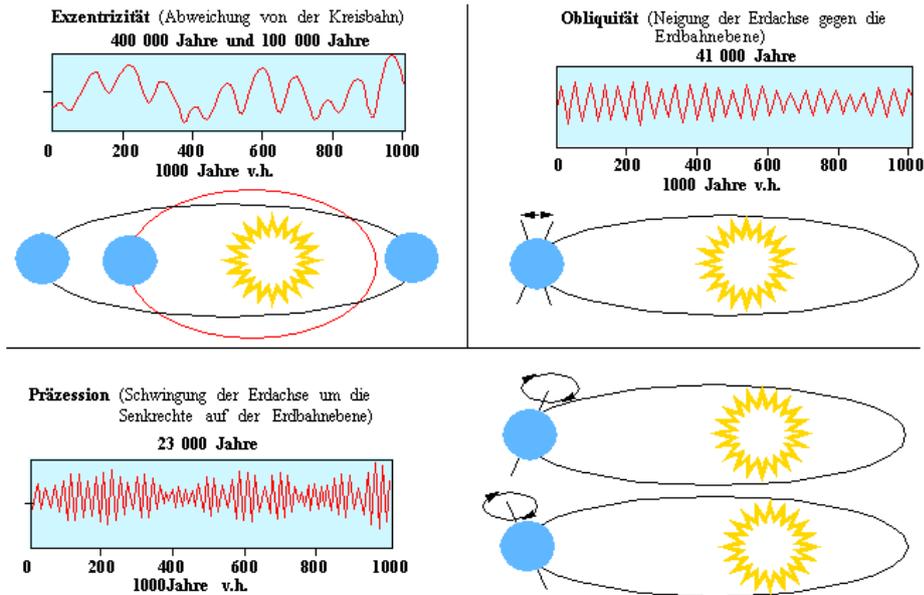


Abb. 4.2: Die Abweichungen der Erde von der Kreisbahn um die Sonne führen zu periodischen Änderungen der solaren Einstrahlung auf der Erde, die die Kalt- Warmzeiten auf der Erde bestimmen (v.h. = vor heute) ([http://www.pik-potsdam.de/~friwi/vorl\\_ss\\_2006\\_02.pdf](http://www.pik-potsdam.de/~friwi/vorl_ss_2006_02.pdf))

#### 4.1.1 Solarstrahlung

Wie viel Sonnenenergie der Erde zur Verfügung steht, hängt von der Strahlungsintensität der Sonne und von den Bahnparametern der Erde (Entfernung von der Sonne, Achsenneigung, Drehgeschwindigkeit der Erde etc., s. Abb. 4.3) ab. Die Zusammensetzung der Atmosphäre (Konzentration der Treibhausgase), die Wolkenbedeckung und die Oberflächenbeschaffenheit der Erde (z. B. Wälder, Felder, Gletscher, Wasser) beeinflussen das Ausmaß der an der Erdoberfläche verfügbaren und der ins Weltall zurückgestrahlten Energie.

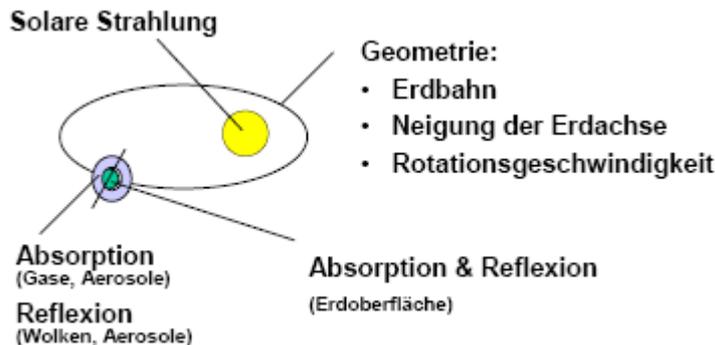


Abb. 4.3: Die Intensität der solaren Strahlung ist abhängig von den Bahnparametern der Erde und den Eigenschaften der Atmosphäre und der Erdoberfläche, welche Absorption und Reflexion bestimmen (Kromp-Kolb Wien) ([http://www.iff.ac.at/socec/backdoor/sose05-ring-sozoek/11\\_KrompKolb\\_WKOKlima.pdf](http://www.iff.ac.at/socec/backdoor/sose05-ring-sozoek/11_KrompKolb_WKOKlima.pdf))

Die Leuchtkraft der Sonne und damit der solare Energiefluss ändern sich langfristig auf nahezu allen Zeitskalen. Die Sonne wird im Laufe ihres Lebens immer heißer, und der solare Energiefluss, der die Erde erreicht, nimmt im Laufe der Jahrtausende (10 %/Mrd. Jahr) stetig zu. Für die Betrachtung der Klimadynamik im Laufe der letzten Jahrtausende sind die Schwankungen der Sonne im Bereich von etwa 11, 22, 78, 211 und vermutlich auch 1500 und 2500 Jahren von Bedeutung (Claussen 2003). Der wichtigste Zyklus ist vermutlich der sehr regelmäßige quasi-elfjährige so genannte Schwabe-Zyklus, der zwischen 9 und 14 Jahren schwankt.

Der solare Energiefluss einschließlich seiner Schwankungen kann erst in den letzten ca. 30 Jahren von Satelliten aus direkt gemessen werden (Abb. 4.4). Der Mittelwert der solaren Einstrahlung (= Solarkonstante) wurde 1982 von der WMO auf  $1367 \pm 2 \text{ W/m}^2$  festgelegt. Für

die Zeit davor werden die solaren Schwankungen aus Beobachtungen der Änderungen der Sonnenflecken oder aus Messungen der kosmogenen Isotope C-14 und Be-10, die sich in verschiedenen Klimaarchiven (Baumringe, Eisbohrkerne) finden, abgeschätzt. Die kosmische Strahlung führt durch Umwandlung von atmosphärischen Stickstoffmolekülen zur Bildung von Be-10 und C-14 Isotopen. Da die kosmische Strahlung durch eine hohe Sonnenaktivität abgeschwächt wird, werden in Zeiten starker Sonnenaktivität weniger C-14 und Be-10 Isotope gebildet. Wegen dieses gegenläufigen Zusammenhanges zwischen Sonnenaktivität und kosmischer Strahlung ist die Produktionsrate der Isotope C-14 und Be-10 auch ein Maß für die Aktivität und das Magnetfeld der Sonne in der Vergangenheit.

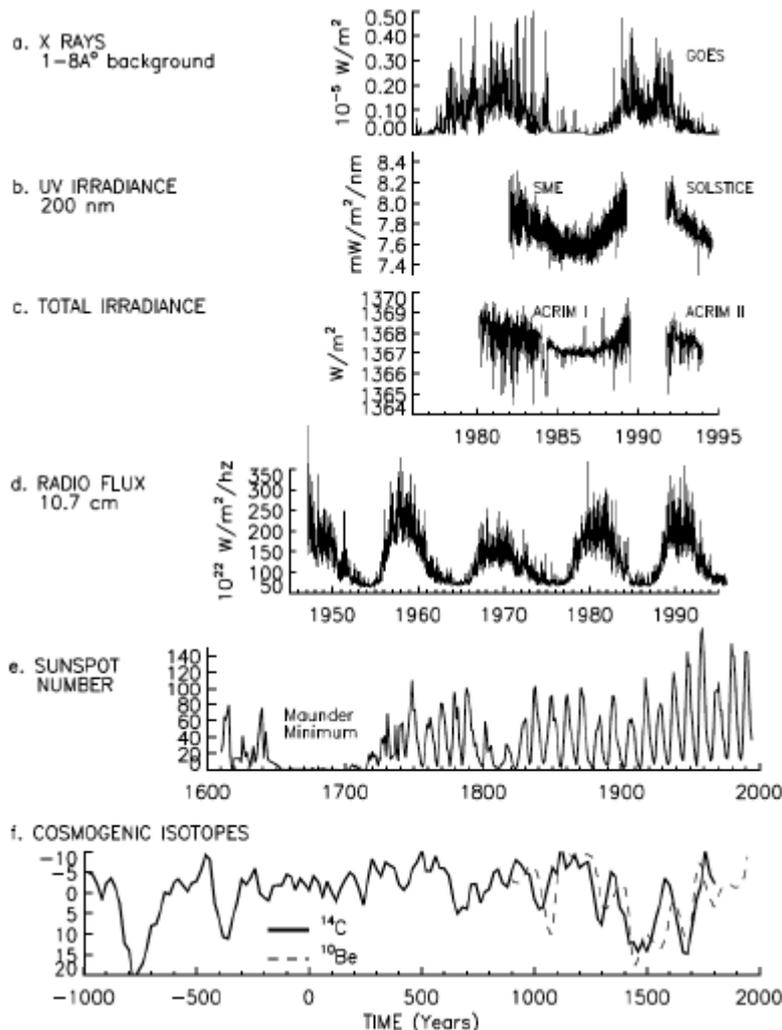


Abb. 4.4: Verschiedene Messungen der Sonnenaktivität, beobachtet von Satelliten (a-d) bzw. von der Erde (e, f) in verschiedenen Zeitskalen (a) Röntgenstrahlung, (b) UV-Strahlung, (c) Gesamtstrahlung, (d) Radio-Strahlung, (e) Sonnenfleckenanzahl, (f) kosmogene Isotope (C14, Be10), (aus Lean 1998)

Die Sonne sendet neben dem sichtbaren Licht noch andere Wellen aus (Abb. 4.4.), insbesondere Radiowellen und Röntgenstrahlung, die in ihrer Helligkeit bis um das Hundertfache schwanken. Diese Strahlungen stammen aus größeren Höhen der Sonnenatmosphäre, der sogenannten Korona, welche von starken Magnetfeldern und elektrischen Strömen dominiert wird. Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung der Sonne (Abb. 4.4) umfasst einen breiten Wellenlängenbereich von der kurzwelligen Röntgenstrahlung bis zu Radiowellen von mehreren 100 m Wellenlänge. Der Radiofluss bei 10,7 cm Wellenlänge ist ein Index, der im Allgemeinen gut mit der Sonnenfleckenanzahl korreliert, aber auch von den starken Magnetfeldern der Sonnenflecken beeinflusst wird (Solanki 2002). Flares (große Sonneneruptionen) erzeugen eine starke Erhöhung der Radio- und Röntgenstrahlung.

Der Ursprung der schwankenden Sonnenaktivität sind Schwankungen des Magnetfeldes der Sonne sowie möglicherweise weitere Prozesse wie Konvektion. Die Schwankungen der Sonnenaktivität zeigen sich in der Häufigkeit der Sonnenflecken. Sie sind häufiger, wenn die

Sonne aktiv ist. Gleichzeitig mit den dunklen Sonnenflecken treten auch hellere Sonnenfackeln und Protuberanzen (Flares) auf (Abb. 4.1), welche zu einer Zunahme der Strahlung führen. Flecken und Fackeln haben eine Lebensdauer von im Mittel einigen Tagen bis zu 2 Wochen.

Änderungen im solaren Energiefluss sind ein wichtiger Klimaantrieb für die Erde. Rund ein Drittel der Strahlung wird jedoch ins Weltall reflektiert und trägt nicht zur Energiebilanz bei. Da die Oberfläche der Erdoberfläche viermal größer ist als ihr Querschnitt, entfallen im Mittel von den  $1367 \text{ W/m}^2$  auf jeden Quadratmeter Erdoberfläche 342 Watt, davon werden etwa 30 % in den Weltraum zurückreflektiert, verbleiben also  $240 \text{ W/m}^2$ , die teils in der Atmosphäre, teils im Ozean, teils am Erdboden absorbiert werden und so die Erde aufheizen. Somit wirkt sich 1 Watt pro Quadratmeter Solarstrahlungsänderung nur mit 0,17 Watt auf die Energiebilanz der Erde aus. Die Sonneneinstrahlung ist nicht gleichmäßig über die Erdoberfläche verteilt; während am Äquator der Jahreswert  $426 \text{ W/m}^2$  beträgt, ist er an den Polen nur  $176 \text{ W/m}^2$ . Diese unterschiedliche Einstrahlung ist die Grundlage der planetarischen Zirkulationsmechanismen der Atmosphäre.

Der 11-Jahres-Zyklus (Schwabe-Zyklus) macht eine Schwankungsbreite von etwa 0,10 % der Solarkonstante aus, der Gleissberg-Zyklus (80 Jahre) etwa 0,24 bis 0,30 %. Die weiteren Zyklen kann man in Schwankungen der kosmischen Strahlung über Messungen von C-14 und Be-10 in Baumringen und Eisbohrkernen wiederfinden (*Cubasch 2002*).

Die untere Stratosphäre reagiert auf die schwankende Sonnenstrahlung in Abhängigkeit von der Phasenlage der QBO (quasi-biannual oscillation = eine Windumkehrung in der Stratosphäre mit einer annähernd zweijährigen Periode) unterschiedlich stark (*Labitzke und Loon 1999*). *Labitzke 2003* fand in der Stratosphäre Temperatur- und Druckschwankungen im „Gleichtakt“ mit dem 11-Jahres-Zyklus der Sonnenflecken. Auswertungen der vergangenen 65 Jahre bestätigten nach *Labitzke 2006* den Einfluss des 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus auf die Stärke des stratosphärischen Polarwirbels und auf die mittlere Meridionalzirkulation. Nach *Mathes 2005*, *Rind 2005* hat dies auch signifikante Auswirkungen auf die Troposphäre (Vertikalbewegung, Niederschlag, Wolkenbildung).

*Usoskin und Solanki* haben (*Usoskin 2003*) nach umfangreichen Messungen der Isotopenhäufigkeit von Be-10 und C-14 in Eisbohrkernen Grönlands und der Antarktis und der Auswertung historischer Daten eine Korrelation mit der Sonnenfleckenanzahl und der Temperaturentwicklung gefunden. Die aus diesen Messungen rekonstruierte Sonnenfleckenanzahl reicht bis ins Jahr 850 zurück. Die Auswertung ergab, dass sich die Sonne in den vergangenen 70 Jahren in einem Zustand ungewöhnlicher hoher Aktivität befindet. Eine weitere Periode erhöhter Sonnenaktivität – jedoch mit einer erheblich geringeren Sonnenfleckenanzahl als heute – trat im Mittelalter in den Jahren 1100 bis 1250 auf. Der zeitliche Verlauf der Sonnenaktivität weist über den gesamten Untersuchungszeitraum große Ähnlichkeit mit der Entwicklung der mittleren Temperatur auf der Erde auf. Da die Aktivität jedoch in den letzten Jahren nicht weiter angestiegen ist, kann sie nach *Solanki* nicht für den Temperaturanstieg in den vergangenen 30 Jahren verantwortlich sein.

*Solanki/Usoskin 2004* haben die mittlere Zahl der Sonnenflecken bis ins Jahr 9400 v.Ch. zurückverfolgt (Abb. 4.5) und festgestellt, dass die magnetische Aktivität der Sonne, die sich aus der Zahl der Sonnenflecken bestimmen lässt, seit mehr als 8000 Jahren nicht mehr so hoch war wie seit etwa 1940. Dies hat sich aus aufwändigen Jahrringanalysen des C-14-Gehaltes von Baumproben ergeben. Bedeutend könnte die Aussage sein, dass sich aus einer statistischen Analyse der Längen von Zeiträumen mit erhöhter Sonnenaktivität auf einen Rückgang der Sonnenaktivität von ihrem derzeitigen Höchststand in den nächsten 50 Jahren schließen lässt. Die Wahrscheinlichkeit hierfür betrage über 90 %. Andererseits ist ein stabiles regelmäßiges Verhalten der Solaraktivität in der Vergangenheit nicht auszumachen. Das gelte auch für den Zusammenhang zwischen Solarschwankungen und Erdklima. Eine Beziehung ist regelmäßig vorhanden, aber oft nicht stark signifikant. Die kleine Eiszeit zwischen 1645 und 1715 lässt sich damit jedoch gut erklären, da in diesem Zeitraum praktisch keine Sonnenflecken beobachtet wurden.

*Muscheler 2005* kommt in seiner Auswertung zu einer etwas anderen Aussage als *Solanki*. Danach war um 1150 und 1600 und im späten 18. Jahrhundert die Solaraktivität wahrscheinlich ähnlich hoch wie in den satellitengestützten Beobachtungen der vergangenen 30 Jahre.

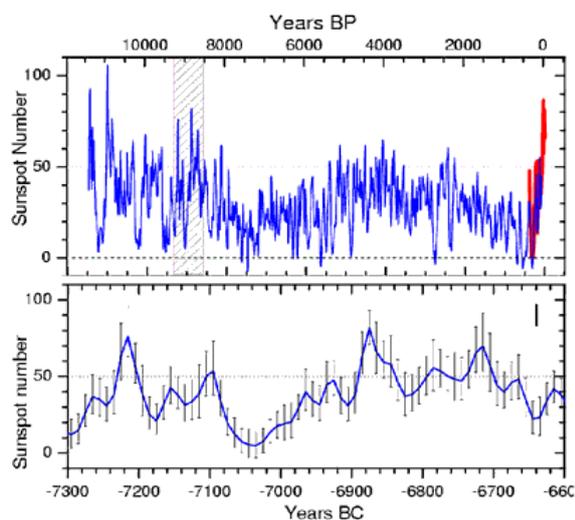


Abb. 4.5: Aus C-14 Daten rekonstruierte Sonnenfleckenzenzahlen (10-Jahresmittelwerte) für die vergangenen 11.400 Jahre (blaue Kurve) und die direkt beobachteten Sonnenfleckenzenzahlen seit 1610 (rote Kurve) bis 1900 (dem Ende der verlässlichen C-14-Daten). Der starke Anstieg seit 1930 ist somit nicht zu sehen. Die untere Kurve zeigt einen Ausschnitt mit mehreren Episoden vergleichbarer Sonnenaktivität wie heute (BP = Before Present, BC = Before Christ) (Solanki 2004)

Eine Auswertung der Helligkeitsschwankungen aus den Aufzeichnungen der Sonnenflecken und Sonnenfackeln der letzten 100 Jahre ergab einen Anstieg der „Solarkonstante“ bis 1940 um etwa 0,2 %, dann einen Stillstand bis etwa 1970, gefolgt von einem leichten Anstieg bis heute. Bis 1970 ist dieser Verlauf in relativ guter Übereinstimmung mit dem Verlauf der mittleren globalen Temperatur. Auch Modellrechnungen haben diesen Zusammenhang bestätigt. Scafetta und West 2008 haben nach Auswertung der letzten beiden Solarzyklen von 1986 - 1996 anhand von Satellitendaten einen Trend des Anstiegs der Solarstrahlung von +0,033 %/Dekade ausgemacht. Damit wäre hieraus nur ein minimaler Beitrag zur globalen Temperaturerwärmung in diesem Zeitraum zu erwarten. Benestad 2009 weist der Arbeit von Scafetta 2008 zu kleine Fehlerbreiten nach und kann für den Zeitraum nach 1980 keinen Anstieg der Solarstrahlung feststellen.

### **Diskussion um den Einfluss der Sonne**

Am Boden lässt sich eine Temperaturvariation mit dem 11-Jahres-Zyklus nicht sicher nachweisen – die Solarstrahlungsschwankungen sind mit 0,1 Promille auch sehr gering. Möglicherweise beeinflussen jedoch Änderungen in der Stratosphäre die Troposphäre. Auch im Ozean finden sich Hinweise auf eine Wirkung des elfjährigen Sonnenflecken-Zyklus.

Eine positive Rückkoppelung und damit eine Verstärkung des solaren Signals werden in der Fachwelt diskutiert. Modellergebnisse zeigen in Zeiten mit erhöhter Solareinstrahlung eine Verschiebung des Spektrums des Sonnenlichts in den UV-Bereich. Hier können die Intensitätsschwankungen bis zu 8 % betragen. Dies führt zu einer Temperaturerhöhung in der Stratosphäre und zu einer verstärkten Ozonbildung, was wiederum mehr Solarstrahlung absorbiert. Dadurch kann sich auch die troposphärische Zirkulation ändern und einen Einfluss auf unser Wetter ausüben. Die Zusammenhänge sind jedoch noch nicht gut verstanden (IPCC 2007). Meehl 2009 hat bei den Sonnenaktivitätsmaxima des 11-Jahres-Zyklus eine Verstärkung der Hochdruckgebiete im tropischen Bereich durch die stärkere Solarstrahlung gefunden sowie Veränderungen in der Stratosphäre durch die UV-Ozonchemie, die zusammen die Temperaturerhöhung von ca. 0,1° C erklären könnten.

Auch ein Zusammenhang zwischen der Sonnenfleckenaktivität und Änderungen der Arktischen bzw. Nordatlantischen Oszillation (AO/NAO) wird diskutiert. So hätte die Solarstrahlungsänderung durch Verringerung der Sonnenflecken im Maunder-Minimum Ende des 17. Jahrhunderts nur zu einer Temperaturänderung von 0,3 bis 0,4 °C führen dürfen. Modellrechnungen führten jedoch zu einer – auch beobachteten – Temperaturänderung von 1 bis 2 °C, die sich durch eine Änderung des AO/NAO-Indexes erklären lässt (Shindell 2004). Ob auch ein Zusammenhang besteht zwischen Solarwind und der NAO ist unklar (IPCC 2007).

Die in Abbildung 4.6 gezeigte direkte Auswertung der Sonnenfleckenanzahl für den Zeitraum 1950 – 2010 zeigt keinen Anstieg in den vergangenen 60 Jahren. Damit ist der globale Temperaturanstieg seit 1975 hiermit nicht zu erklären.

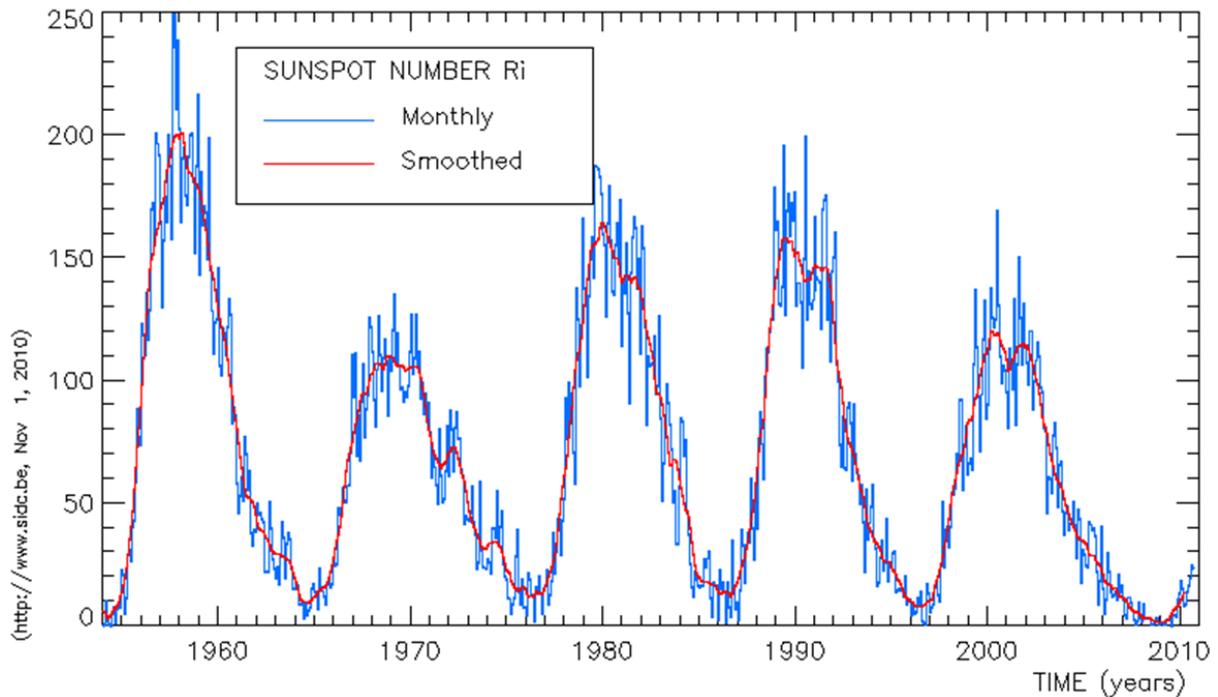


Abb. 4.6: Sonnenfleckenanzahl 1950 - 10/2010: die vergangenen 5 Solazyklen, kein Anstieg in den letzten 60 Jahren (Monatsmittel), (Quelle: SIDC 2010, 1.11. 2010, (<http://sidc.oma.be/html/wolfmms.html>))

#### 4.1.2 Kosmische Partikelstrahlung und Erdmagnetfeld

Der mögliche Einfluss des Sonnenwindes auf unser Klima wird in der Fachwelt intensiv diskutiert. Die Sonne verliert durch den Sonnenwind pro Sekunde etwa 1 Mio. t ihrer Masse. Die Stärke des Sonnenwindes, der hauptsächlich aus Protonen und Elektronen besteht, hängt von der Sonnenaktivität ab und verformt, da er aus elektrischen Teilchen besteht, das Magnetfeld der Sonne und der Erde (Abb.4.7).

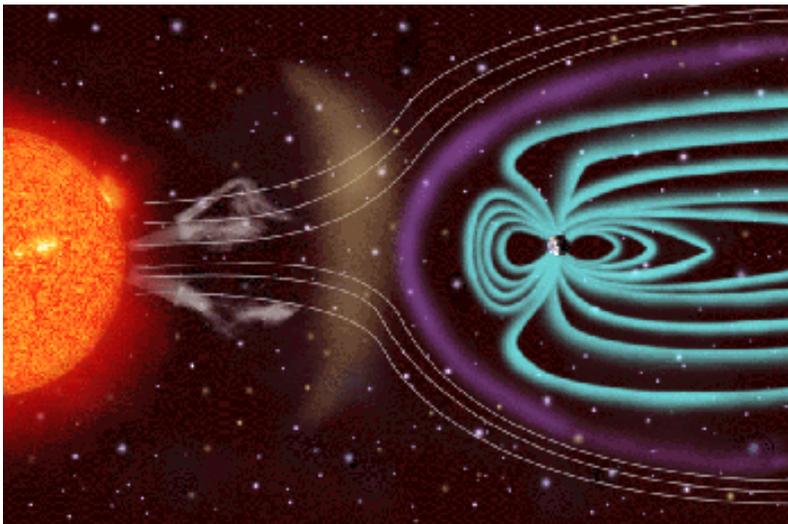


Abb. 4.7: Der Sonnenwind wird vom Magnetfeld der Erde abgelenkt und schwächt die kosmische Strahlung, die vom Weltall in die Erde eindringt, ab ([www.esa.int/esaCP/ESAFM97708D\\_Germany\\_0.html](http://www.esa.int/esaCP/ESAFM97708D_Germany_0.html)), (Quelle: NASA)

Der Sonnenwind beeinflusst seinerseits die galaktische kosmische Strahlung; eine starke Sonnenaktivität führt zu einer Verringerung der auf die Erde treffenden kosmischen Strahlung, da sich auch das Magnetfeld verstärkt, das die kosmische Strahlung weitgehend von

der Erde abschirmt. Daraus ergibt sich, dass die Produktion von kosmogenen Isotopen in der Atmosphäre umgekehrt proportional zur Stärke der Sonnenaktivität ist.

Die von der kosmischen Strahlung erzeugten Ionen sollen nach einem viel diskutierten Modell dänischer Forscher (*Friis-Christensen 1991, Svensmark 1997*), das weiter verfeinert wurde, als Kondensationskeime für größere Schwebeteilchen (Cluster) dienen und damit die Wolkenbildung fördern. Bei geringerer Sonnenaktivität müsste demnach die erhöhte kosmische Strahlung in der Erdatmosphäre verstärkt eine Abkühlung verursachen, da sich infolge der höheren Teilchenzahl mehr Wolken bilden. Der mikrophysikalische Prozess, der den atmosphärischen Aerosolbildungsprozess mittels durch kosmische Strahlen erzeugter Ionen beeinflussen kann, wurde zwar bestätigt, aber die Größenordnung dieses Einflusses ist ungewiss (*Gray 2005, 2010, IPCC 2007*).

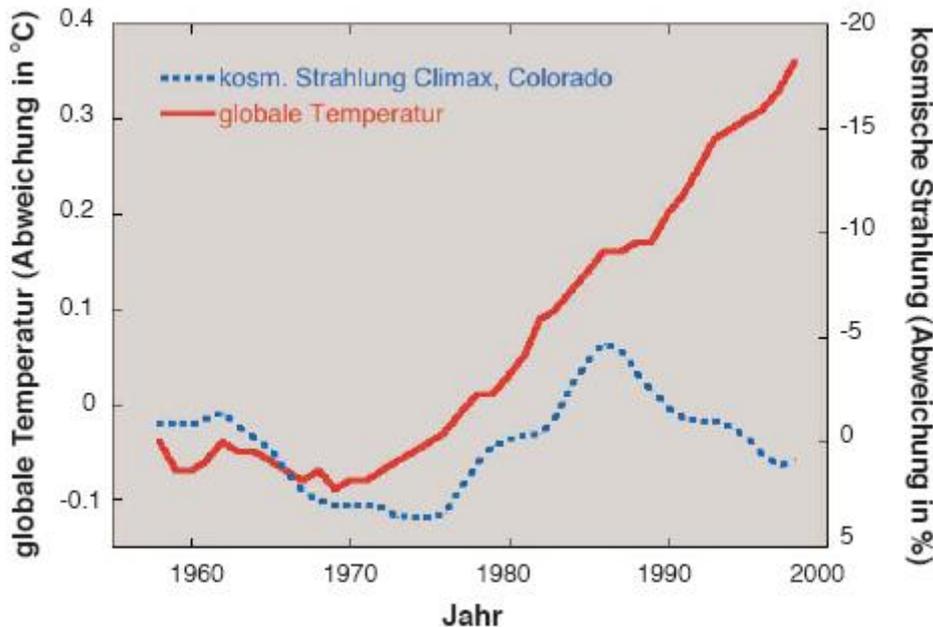


Abb. 4.8: Der Verlauf der kosmischen Strahlung in Climax, Colorado (eine der längsten Messreihen) und der Temperatur an der Erdoberfläche seit 1953 (jeweils gleitendes 11-Jahres-Mittel). Die kosmische Strahlung ist nach oben abnehmend dargestellt, da nach der Theorie eine Abnahme der kosmischen Strahlung eine Zunahme der Temperatur bewirken sollte. Der Verlauf der kosmischen Strahlung könnte den Temperaturverlauf bis 1980 theoretisch in etwa erklären, nicht aber den nachfolgenden starken Temperaturanstieg (Daten: NOAA (kosmische Strahlung), Cru (Temperatur), Grafik: ProClim)

Die von dänischen Wissenschaftlern (*Friis-Christensen u. Lassen 1991, Marsh und Svensmark 2000, 2001, 2003, 2004, 2006, 2009*) vermutete Korrelation zwischen Sonnenzyklus bzw. kosmischer Strahlung und Bewölkung hat sich bislang so nicht bestätigt. Zusammenhänge werden zwischen der Temperaturänderung und dem regional unterschiedlichen Bedeckungsgrad tiefliegender, aber auch hoher Bewölkung vermutet. Wie im AR4 (*IPCC 2007*) berichtet kommen verschiedene Studien zu teils unterschiedlichen Ergebnissen. Die Zusammenhänge sind wesentlich komplexer. Der theoretische Zusammenhang zwischen kosmischer Strahlung und Wolkenbildung ist zwar inzwischen nachgewiesen worden, aber z.B. nur gültig für die Regionen, in welchen kondensierbarer Wasserdampf ohne substantielle konkurrierende Kondensationspartikel vorhanden ist. Die geografische Verteilung dieser Partikelbildung und ihre Häufigkeit sind jedoch nicht bekannt. Diese Aussage wird auch nicht durch die Ergebnisse der Experimentalstudie von *Svensmark 2006* in Frage gestellt, nachdem in Reaktionskammern negative Ionen Aerosolcluster bilden, die als Vorstufe von Kondensationskeime für eine Wolkenbildung angesehen werden können. Auch die Ergebnisse einer neueren Arbeit von *Svensmark 2009*, die mit einer Zeitverzögerung von 7 – 9 Tagen einen Zusammenhang mit der Abnahme von kosmischer Strahlung nach sog. Forbush Ereignissen und atmosphärischen Aerosolen und Wolken sieht, wird von anderen Forschern, wie *Kristjánsson 2008, Laken 2009* nicht bestätigt. (Ein Forbush-Ereignis ist ein beobachteter plötzlicher Abfall der hochenergetischen kosmischen Strahlung nach einem solaren Ausbruch.) *Calogovic 2010* hat in detaillierten Analysen gezeigt, dass Änderungen der kosmischen Strahlung, wie sie durch Schwankungen der Sonnenaktivität auf der Zeitskala

von einigen Tagen verursacht werden, keine Veränderungen der globalen oder regionalen Wolkenbedeckung zur Folge haben.

Der zeitweise vorhandene Korrelation des Temperaturanstiegs mit dem Rückgang der kosmischen Strahlung in den 1980'er Jahren hat sich, wie Abb. 4.8 zeigt, nicht weiter fortgesetzt, so dass zumindest für die letzten 35 Jahre die kosmische Strahlung nicht für den globalen Temperaturanstieg verantwortlich sein kann (<http://www.proclim.ch/Products/ClimatePress/ClimatePress19D.pdf>). Wie *Erlykin 2009* nachweist, ist die Korrelation mit der zyklisch variierenden kosmischen Strahlung um 2 - 4 Jahre zeitverzögert und kann somit nicht für die Temperaturerhöhung verantwortlich sein.

Das gilt auch für die Solarstrahlung. Während in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts ein paralleler Anstieg der Temperatur und der Solarstrahlung zu verzeichnen war, gilt das nicht mehr ab etwa 1970 (Abb. 4.9). Die globale Temperaturerhöhung in den letzten 40 Jahren kann auch durch diese Theorie nicht erklärt werden, da die Solarstrahlung in den vergangenen 70 Jahren – zwar auf hohem Niveau – mehr oder minder konstant geblieben ist (*Benestad 2009*).

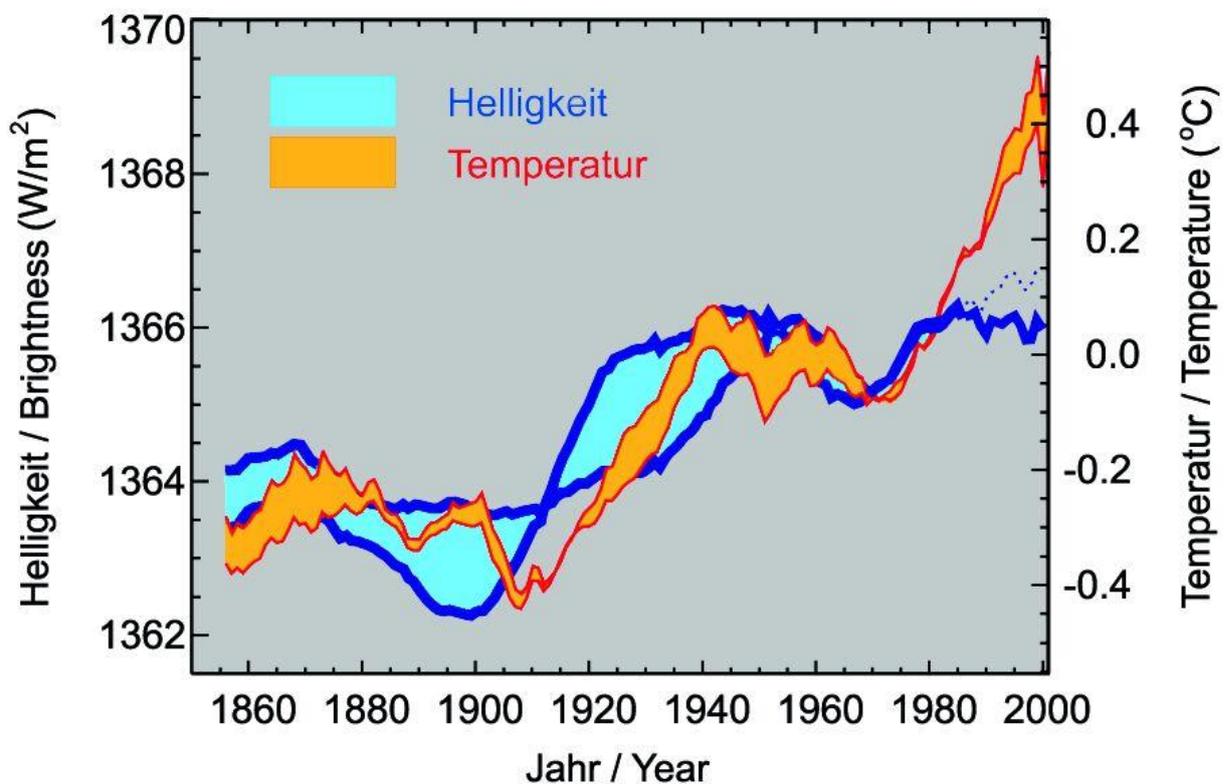


Abb. 4.9 Solarstrahlung (Helligkeit) und Anomalie der Erdoberflächentemperatur 1860 – 2002. Zunahme der 11-jährig gemittelten Strahlung zwischen 1700 und 1980 um  $4 \text{ W/m}^2$ . Die blaue Kurve vor 1985 gibt die Strahlungsrekonstruktion wieder. Ab 1985 Strahlung aus Messungen ermittelt. Die untere rote durchgezogene Linie gibt die globale Temperaturanomalie an und die obere rote Linie die nordhemisphärische Temperaturanomalie. Die roten und blauen Flächen zeigen unterschiedliche Temperaturmittelungen bzw. deuten die Unsicherheiten in der Bestimmung der Sonnenhelligkeit an. ([http://www.mps.mpg.de/projects/sun-climate/resu\\_body.html](http://www.mps.mpg.de/projects/sun-climate/resu_body.html))

Eine weitere **extraterrestrische Theorie**, von *Shaviv (2002)*, *Shaviv und Veizer 2003* veröffentlicht, sieht einen Zusammenhang der globalen Erdoberflächentemperatur mit der kosmischen Strahlung. Da sich in geologischen Zeiträumen über Hunderte von Millionen Jahren unser Solar-system durch die Spiralarme unserer Galaxie bewegt (Abb. 4.10), soll sich auch der galaktische kosmische Strahlungsfluss ändern und die Temperatur auf der Erde über die Wolkenbildung beeinflussen (Intensitätszyklus der kosmischen Strahlung von rund 143 Mio. Jahren). *Rahmstorf* hat 2004 diese These überprüft und den vermuteten Zusammenhang nicht bestätigen können. Auch *Shaviv und Veizer* haben bestätigt, dass ihre Theorie nur auf eine Millionen Jahre umfassende Zeitskala angewendet werden kann und nicht für kürzere Zeitskalen geeignet ist (*Rahmstorf 2004*). *Overholt 2009* hat mit neueren Berechnungen der Spiralarme der Milchstraße die Theorie von *Veizer* überprüft und keinen Zusammenhang mehr gefun-

den. Nach der 2008 neu bestimmten Struktur unserer Galaxie mit dem Spitzer Weltraumteleskop gibt es statt vier Spiralarme nur zwei (major arms)- und sie bewegt sich auch schneller als bisher angenommen (Abb. 4.10 rechtes Bild). Damit ist der von *Veizer* vermutete Zusammenhang mit einem von Zyklus von ca. 140 Millionen Jahre nicht mehr gegeben.

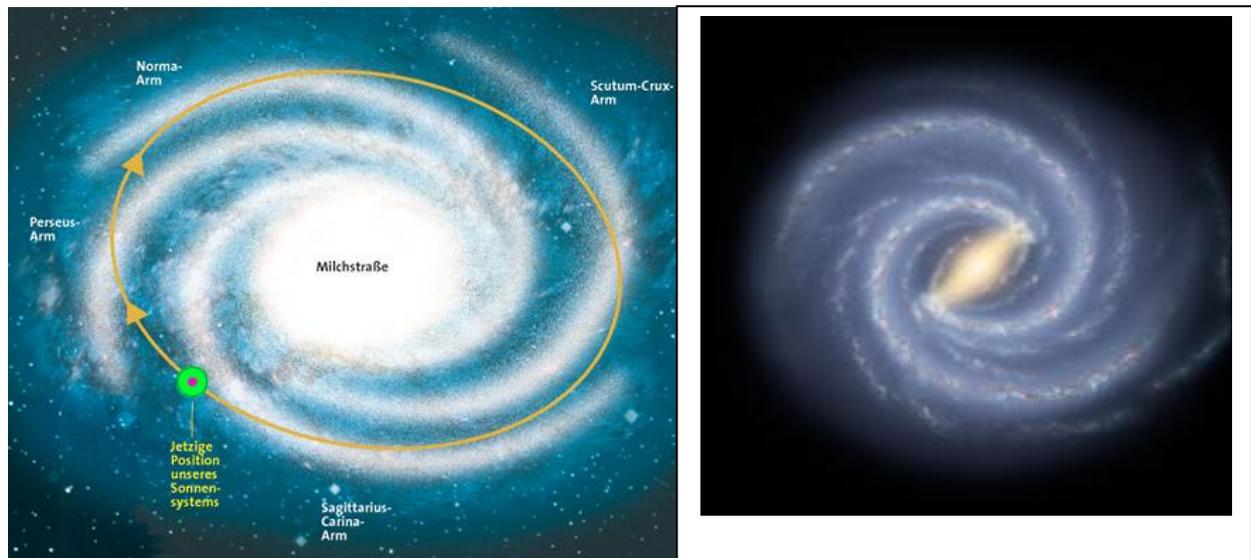


Abb. 4.10: links: Unser Sonnensystem in den Spiralarmen der Milchstraße, grüner Punkt = jetzige Position unseres Sonnensystems (Bild <http://www.staff.uni-mainz.de/bpfeiffe/Vhs04f-w.pdf>), rechts: neues Bild unserer Milchstraße mit 2 Hauptarme (NASA/Spitzer Space Telescope, <http://www.spitzer.caltech.edu/Media/releases/ssc2008-10/release.shtml>)

**Zusammenfassend** ist festzuhalten, dass die Sonne einen erheblichen Einfluss auf unser Klima hat (*IPCC 2007*). Für das 20. Jahrhundert ging das IPCC 2001 im 3. Bericht (TAR) noch von einem Anteil an der globalen Erwärmung von ca. 20 % aus; im 4. Bericht (AR4) wurde der Strahlungsantrieb 1750 – 2005 gegenüber dem TAR halbiert (*IPCC 2007*). *Benestad 2009* zeigt, dass sehr wahrscheinlich der Beitrag des solaren Antriebs im 20. Jahrhundert zur globalen Erwärmung nur  $7 \pm 1\%$  gewesen sei, und seit 1980 vernachlässigbar ist. *Lockwood 2007* weist nach, dass wie die Abb. 4.11 zeigt, ab etwa 1975 keine Korrelation besteht zwischen dem beobachteten mittleren globalen Temperaturanstieg und solaren Parameter wie die Sonnenfleckenanzahl  $R$  (b), der offene solare magnetische Fluss  $F_s$  (c), die Neutronenzählrate  $D$ , verursacht durch kosmische Strahlung (d) und die Solarstrahlung (totale solare Irradianz, TSI (integriert über alle Wellenlängen)).

*Feulner 2010* hat nachdem derzeitigen langanhaltenden Minimum (2008 und 2009 an 266 bzw. 260 Tagen keine Sonnenflecken) an Solaraktivität den Einfluss auf den anthropogen verursachten Klimawandel untersucht. Die Modellrechnungen ergeben, selbst wenn das Solarminimum sich fortsetzen würde, der Temperaturanstieg durch die anthropogen verursachte Zunahme der Treibhausgase bis zum Ende des Jahrhunderts nur um etwa  $0,3^\circ \text{C}$  geringer ausfallen würde. Nach *Livingstone 2009* gibt es Anzeichen, dass die Solaraktivität 2010 wieder zunehmen wird, was auch tatsächlich im Winter 2009/10 beobachtet wurde (Abb.4.6).

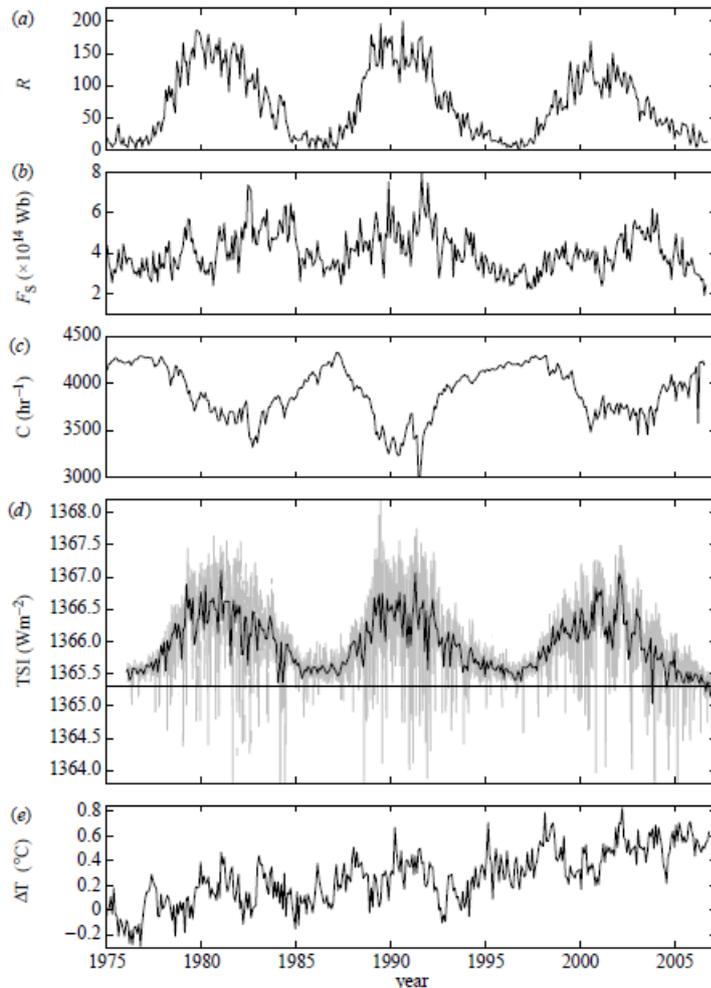


Abb.4.11: Solare und heliosphärische Daten im Vergleich mit der mittleren globalen Temperatur, (a) die internationale Sonnenfleckenanzahl  $R$ , (b) der offene solare magnetische Fluss  $F_s$ , (c) die Neutronenzählrate  $D$ , verursacht durch kosmische Strahlung, (d) Solarstrahlung (totale solare Irradianz, TSI (integriert über alle Wellenlängen)), (e) globale mittlere Temperatur (Lockwood 2007)

Grundsätzlich schließen die Klimawissenschaftler nicht aus, "dass künftig indirekte Wirkungsmechanismen der Sonne (z.B. Sonnenwind) identifiziert werden können. Es scheint aber eher unwahrscheinlich, dass indirekte Wirkungen viel stärker sind als die direkten Wirkungen der Strahlungsintensität, die bereits heute in den Modellen berücksichtigt werden und die Vergangenheit recht gut erklären" (Solanki 2003). Dies wird auch in einer umfangreichen Review Arbeit von Gray 2010 bestätigt.

## 4.2 Vulkane

Explosive Vulkanausbrüche emittieren große Mengen an Feststoffen und Gasen (mehrere Millionen Tonnen) in die Atmosphäre (Abb. 4.11). Neben vulkanischer Asche sind das auch erhebliche Mengen von Gasen wie Wasserdampf, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff, Kohlendioxid, HF, HCl, etc. Insbesondere wenn feinste vulkanische Asche und Sulfataerosole in die Stratosphäre gelangen, können sie durch die lange Verweildauer von 1-3 Jahren das Klima deutlich beeinflussen. Die Aerosole absorbieren zum einen die kurzwellige Einstrahlung der Sonne und zum anderen die langwellige Infrarotstrahlung der Erde. Außerdem streuen sie auch das einfallende Sonnenlicht. Der Nettoeffekt dieser Strahlungsbilanzänderung ist im Allgemeinen eine Erwärmung der Stratosphäre und eine bodennahe Abkühlung an der Erdoberfläche (IPCC 2007). Nach großen Vulkanausbrüchen kann sich der Strahlungsantrieb jeweils für 1 - 2 Jahre um  $3 - 6,5 \text{ W/m}^2$  ändern (Abb. 4.12).



Abb. 4.11 Ausbruch des Pinatubo 1991: große Gasmassen und Aerosole werden bis in die Stratosphäre geschleudert ([http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/Philippines/Pinatubo/description\\_pinatubo.html](http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/Philippines/Pinatubo/description_pinatubo.html))

Nach den großen Vulkanausbrüchen im 20. Jahrhundert, wie z.B. dem des El Chicón 1982 und des Pinatubos 1991 (Abb. 4.11), zeigten sich eine Abnahme der Sommertemperatur und eine Zunahme der Wintertemperatur. Global hat sich die Erde für zwei Jahre um ca.  $0,5^{\circ}\text{C}$  abgekühlt (Robock 2000, 2002). Die untere Stratosphäre dagegen erwärmte sich um  $1^{\circ}\text{C}$  über 3 Jahre (Langematz 2008). Bei großen Vulkanausbrüchen in hohen Breitengraden (z.B. Katmai, Alaska, 1912) bleiben die Aerosole in der Hemisphäre, in der sie emittiert wurden (Oman 2005) und verursachen eine deutliche Abkühlung und eine Abnahme des asiatischen Monsuns sowie als Folge eine Erwärmung im nördlichen Indien. Auswertungen der letzten 500 Jahre haben auch gezeigt, dass große Vulkanausbrüche El Niño-Ereignisse auslösen können (Adams 2003, IPCC 2007). Weitere Studien sind jedoch notwendig, um diese möglichen Zusammenhänge bewerten zu können (IPCC 2007).

Vulkanische Aerosole beeinflussen nicht nur die Strahlungsströme in der Stratosphäre, sondern auch chemische Prozesse wie die Ozonbildung und Ozonzerstörung. Dies führt zu einer Abnahme der Ozonschichtdicke von 3-10 % über 1-2 Jahre hinweg (Bissolli 2001). Nach dem Pinatubo-Ausbruch 1991 wurde eine Reduktion des Gesamtzons von bis zu 7 % gemessen, was zu einer verstärkten UV-Strahlung am Boden führte (Graf 2002).

Weiterhin wird wegen des entstehenden stärkeren Temperaturgradienten in der Stratosphäre der Polarwirbel verstärkt, was tendenziell auch zu einem höheren NAO-Index führt. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge spricht IPCC 2007 von einem geringen wissenschaftlichen Verständnis der von Vulkanausbrüchen verursachten Änderung des Strahlungsantriebs.

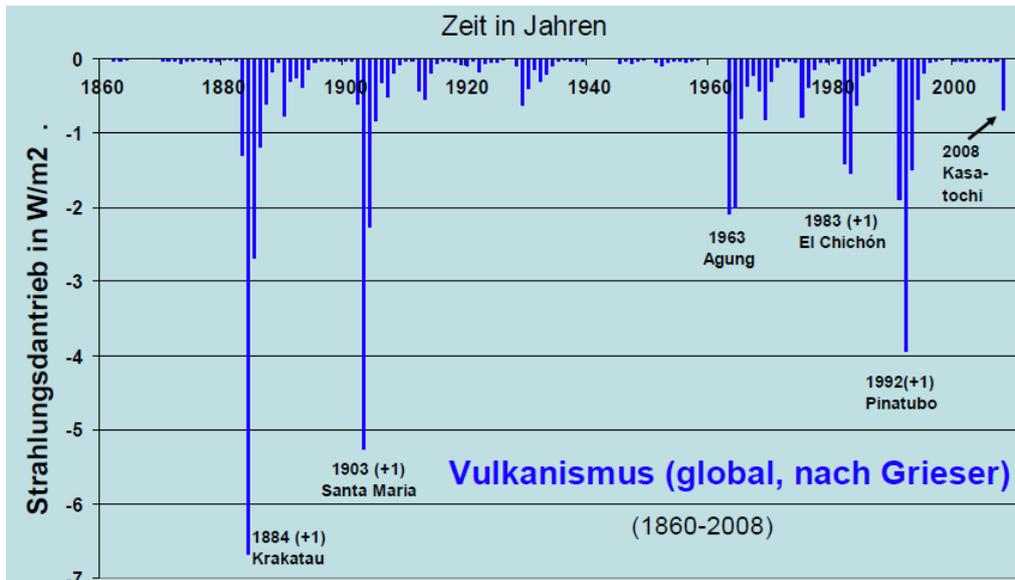


Abb. 4.12: Veränderung des Strahlungsantriebes in Höhe von 3 – 6,5 W/m<sup>2</sup> nach großen Vulkanausbrüchen jeweils für 1 - 2 Jahre (J. Grieser, C.-D. Schönwiese, 1999; erg. nach US Smiths. Inst., 2009, aus [http://www.meteo.uni-bonn.de/8DKT/talks/2009\\_8DKT\\_Schoenwiese.pdf](http://www.meteo.uni-bonn.de/8DKT/talks/2009_8DKT_Schoenwiese.pdf))

Der Ausbruch des Eyjafjallajökull auf Island am 16.3.2010, der für Wochen den Flugverkehr in Europa zeitweise lahmgelegt hat, gehört nicht zu den globalen klimabeeinflussenden Kategorien, da die Aschewolke innerhalb der Troposphäre verblieb. Seine Aerosolpartikel und Schwefeldioxidkonzentrationen konnten an den meteorologischen Stationen in Hohenpeißenberg, an der Zugspitze und am Schauinsland, sowie mit dem Messflugzeug der DLR gemessen werden (Flentje 2010, Gilge 2010)).

### 4.3 Nordatlantische Oszillation - NAO

Die Nordatlantische Oszillation (NAO) ist eines der dominierenden Schwingungsmuster natürlicher Klimavariabilität auf der Nordhalbkugel (Hurrell 1995). Sie ist eine mehr oder weniger regelmäßige Veränderung der atmosphärischen Zirkulation (Luftdruckschaukel) auf der Nordhalbkugel, die das Witterungs- und Klimageschehen in Europa und Nordamerika stark beeinflusst. Die NAO beschreibt die Schwankung des Luftdruckverhältnisses zwischen dem Islandtief im Norden und dem Azorenhoch im Süden des Nordatlantiks. Als Maßeinheit gilt der NAO-Index. Er wird üblicherweise definiert als Differenz der standardisierten Druckanomalien von Ponta Delgada (Azoren) und Reykjavik (Island). Daneben gibt es noch weitere NAO-Indizes. Ist der NAO-Index positiv, herrscht über Island ein sehr tiefer und über den Azoren ein sehr hoher Druck. Bei geringen Druckunterschieden wird der NAO-Index negativ (Abb. 4.13). Die NAO ist hauptsächlich im Winter ausgeprägt, in den anderen Jahreszeiten ist sie nur sehr schwach ausgebildet.

Eine anhaltende positive Anomalie der NAO, d.h. ein erhöhter Luftdruckgegensatz, bedingt eine verstärkte Zufuhr von Kaltluft westlich Grönlands und deren Aufwärmung über dem Nordatlantik; das Westwindband wird intensiviert und Wärme kann verstärkt vom Wasser an die Luft abgegeben werden. Die größten Druckamplituden treten in den Wintermonaten auf. Die Nordatlantische Oszillation beeinflusst insbesondere das Winterwetter in Europa und Nordostamerika erheblich (Abb. 4.14). Als Folge wird in Europa das Vordringen sibirischer Kaltluft unterdrückt und es werden milde Winter über Westeuropa und an der Ostküste der USA beobachtet. In Nordkanada und Grönland dagegen ist es besonders kalt und trocken (maritime Phase).

Der Luftdruckunterschied zwischen den Azoren und Island - führt zu einer Abschwächung des Westwindbandes über dem Nordatlantik, die Zufuhr milder, feuchter, atlantischer Luftmassen nach Westeuropa wird gedrosselt, und kalte, trockene Luft aus dem sibirischen Raum führt zu strengen Wintern über Westeuropa. Dabei ist es an der Ostküste der USA kalt, und Grönland hat einen milden Winter (kontinentale Phase).

Der Verlauf des Nordatlantischen Oszillationsindex (NAOI) seit 1825 ist in der Abb. 4.15 dargestellt. Zu erkennen sind die dekadischen Schwankungen und ein Trend von negativem hin zu positivem NAOI von 1960 – 1990. Vergleiche mit NAO-Rekonstruktionen der letzten 350 Jahre zeigen, dass es zwar schon früher interdekadische Schwankungen gab, dass aber der Anstieg bis Mitte der 90'er Jahre ungewöhnlich stark war. Als Konsequenz waren diese Winter – wie auch zu Beginn des 20. Jahrhunderts – außergewöhnlich warm. Der Trend hat sich aber nach der Mitte 1990 nicht fortgesetzt und wurde von starken jährlichen Schwankungen überlagert. Der milde europäische Winter 2006/07 zeigte ebenfalls einen starken positiven NAO-Index. In den vergangenen Jahren hat sich die Winter-NAO im Vergleich zum Beginn der 1990er Jahre abgeschwächt und war in drei Wintern leicht negativ (Abb. 4.15); die Wintertemperaturen in Mitteleuropa lagen über den Durchschnittswerten, sind aber im Vergleich zum Beginn der 1990'er Jahre nicht weiter gestiegen, der Winter 2009/10 war deutlich kälter mit einer extrem negativem NAOI, (s. auch nächste Seite).

Die NAO ist offensichtlich auch eng gekoppelt mit der arktischen Oszillation (AO), eine großräumige Schwingung der Atmosphäre, die durch entgegengesetzte Luftdruckanomalien in der zentralen Arktis und Teilen der mittleren Breiten gekennzeichnet ist. Die Arktische Oszillation ist mit der Variation des Luftdrucks auf Meereshöhe im Arktischen Ozean ganzjährig positiv mit der NAO korreliert. Weiterhin gibt es auch einen Zusammenhang mit den Anomalien der Meeresoberflächentemperatur des pazifischen El Niños und dem indischen Sommermonsun (IPCC 2007).

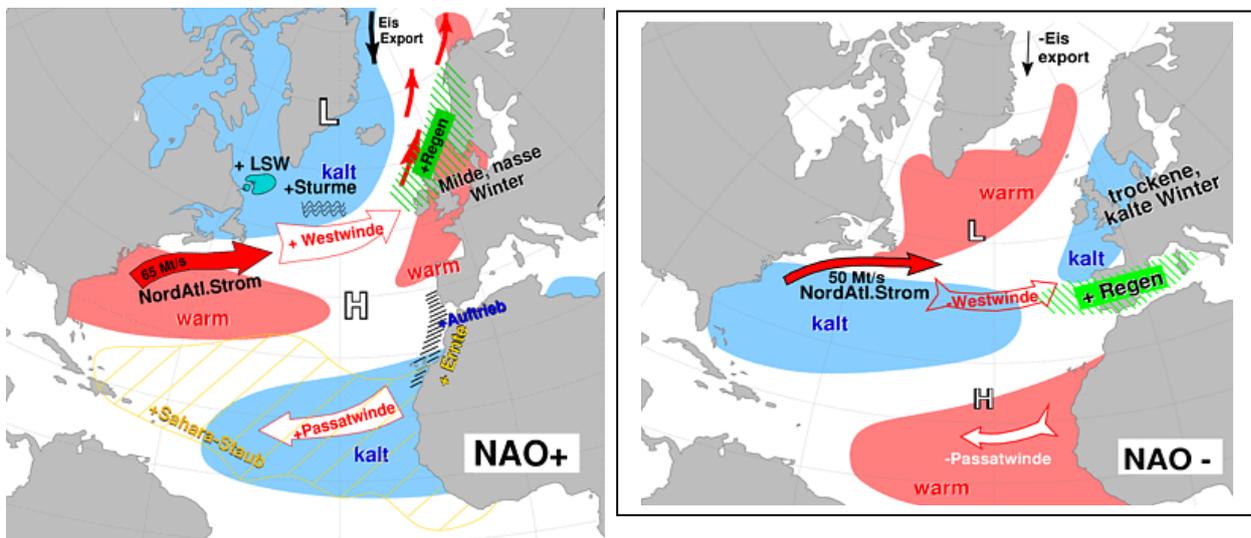


Abb.4.13: Modell der positiven und negativen Phase der Nordatlantischen Oszillation (NAO). Die Pfeile zeigen das Flusssystem im Ozean und der Atmosphäre (Quelle: IFM-GEOMAR, Kiel [http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=ozon\\_nao#8516](http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=ozon_nao#8516))

Ein positiver NAO-Index hat nicht nur Auswirkungen auf die Atmosphäre und den Ozean, sondern auch auf Ökosysteme. In Grönland ist es besonders kalt und trocken. Starke Stürme erreichen Nordeuropa, starke Niederschläge und milde Temperaturen sind in Mitteleuropa die Folge. Der Eisexport aus der Arktis verstärkt sich. Die Labradorsee wird besonders kalt, der Golfstrom erwärmt sich. Die verstärkten Passatwinde führen zu einer Abkühlung des äquatorialen Pazifiks. Als Folge geht der Fischbestand (Kabeljau, Dorsch) im Bereich der Labradorsee zurück, vor der afrikanischen Küste vermehren sich dagegen infolge des Aufstiegs nährstoffreicheren Tiefenwassers die Fische ([www.ifm-geomar.de/index.php?id=ozon\\_nao#8516](http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=ozon_nao#8516), Hense 2008).

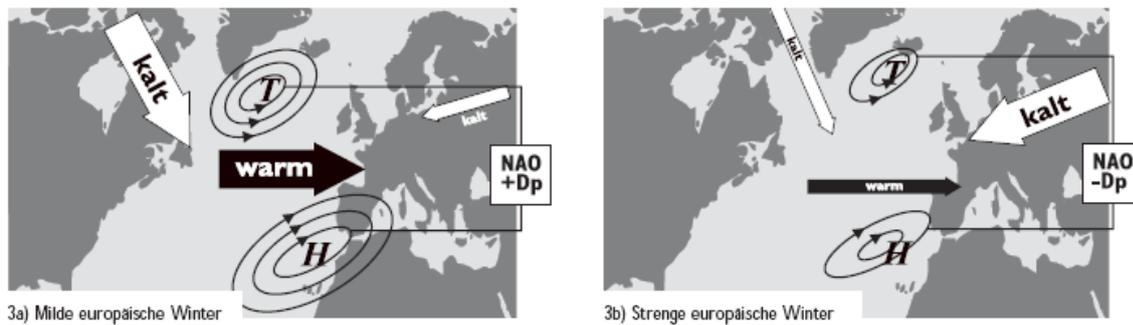


Abb. 4.14: Eine positive NAO führt zu milden europäischen Wintern, eine anhaltende negative NAO-Phase zu strengen europäischen Wintern (Hagen 2003)

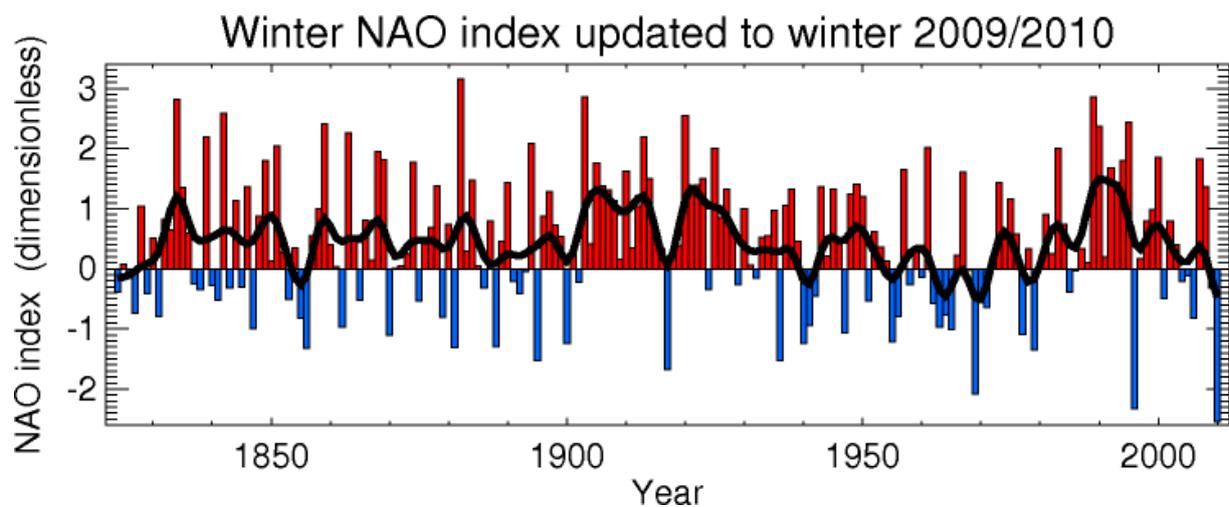


Abb. 4.15: Anomalien des Nordatlantischen Oszillationsindex 1825 – 2009/10. Auffallend sind die sehr niedrigen Werte in den 60'er Jahren und die hohen Werte um 1990, die mit milden Wintern gekoppelt waren. Der milde europäische Winter 2006/07 hatte einen stark positiven und der kalte europäische Winter 2009/10 einen extrem negativen NAO Index (<http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/datapages/naoi.htm>)

Die Arktische Oszillation (AO), oder auch Northern Hemispheric Annular Mode (NAM), ist Ausdruck des Luftdruckgegensatzes zwischen den arktischen und den mittleren Breiten auf der Nordhemisphäre. Die Nordatlantische Oszillation und die Arktische Oszillation (AO) sind räumlich sehr ähnlich und können deshalb nicht getrennt betrachtet werden. Der Winter AO-Index 1900 – Febr. 2010 ist in Abb. 4.16 dargestellt. Der kalte Winter in Europa und Teilen von Nordamerika 2009/10 ist auf die extrem negative Phase der NAO und AO zurückzuführen.

Wissenschaftler des Alfred-Wegener-Institutes (Brand 2008) haben erstmals in ein Atmosphären-Ozean-Klimamodell ein Modul der stratosphärischen Ozonchemie eingefügt. Durch einen Vergleich von Simulationen des Standardmodells und des um die Ozonchemie ergänzten neuen Modells konnten die Wissenschaftler zeigen, dass die Ozonchemie einen deutlichen Einfluss auf die Arktische Oszillation hat. Änderungen der atmosphärischen Strömung und der Temperaturverteilung führen demnach zu einer Verstärkung der winterlichen negativen Phase der Arktischen Oszillation.

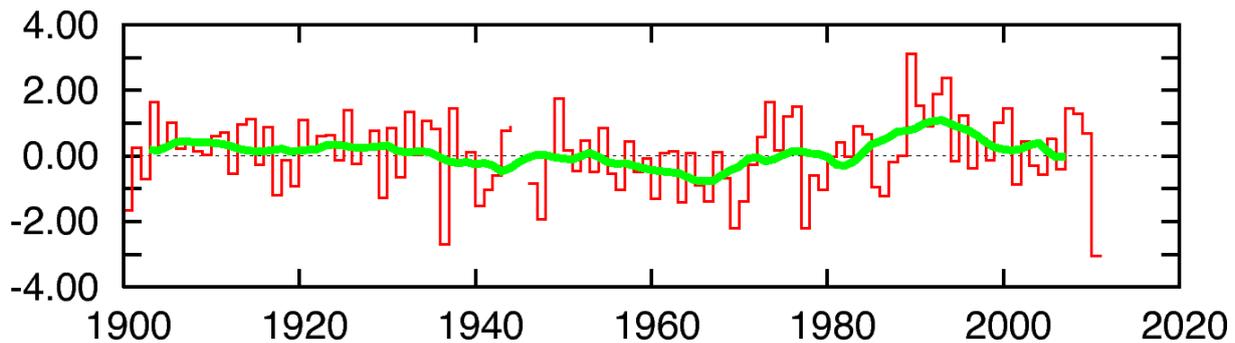


Abb. 4.16: Der Winter AO Index (Dezember-Februar) von 1900 bis Febr. 2010. Quelle: Colorado State University, Climate - Prediction Center (CPC, NOAA), CPC/NCEP.

Ein Zusammenhang des NAO-Trends mit dem Temperaturanstieg in Europa wurde bereits 1996 von Hurrell aufgezeigt. Korrelationsstudien haben eindeutig einen Einfluss der NAO im Winter mit dem Lufttemperaturfeld in Europa bestätigt (*Tinz 2002, Hense 2008*).

### Diskussion möglicher Ursachen der Änderungen der NAO

Die NAO ist ein großskaliges atmosphärisches Phänomen, das sich nach *Hurrell 2003* aus dem stochastischen Zusammenwirken verschiedener Klimatelemente ergibt. Obwohl die NAO eine interne Variabilität der Atmosphäre darstellt, können stratosphärische und anthropogene Prozesse die Phasen und Amplituden der NAO beeinflussen (*Hurrell 2003*). Nach *Jung 2008* gibt es kein Zweifel, dass wichtige Wechselwirkungen zwischen der NAO und dem Ozean sowie dem Meereis auf einem weiten Bereich von Zeitskalen bestehen. Während der Einfluss der NAO auf den nordatlantischen Ozean und das Meereis deutlich ausgeprägt und vergleichsweise gut verstanden ist, sind die Rückwirkungen sowohl des Ozeans als auch des Meereises auf die NAO wesentlich schwächer ausgeprägt und weniger gut verstanden.

Die Mehrzahl der Modellergebnisse zeigen, dass die ozeanischen Strömungen, extratropische und tropische Temperaturänderungen des Oberflächenwassers einige der Antriebe für die NAO-Schwankungen sind. Der Modellvergleich von 18 gekoppelten Ozean-Atmosphären-Modellen im Rahmen des Modellvergleichsprojekts (CMIP2) hat gezeigt, dass steigende Treibhausgasemissionen eine gewisse Verstärkung der NAO in Richtung positiven Indexes verursachen. Die Unsicherheiten sind jedoch noch groß. (*IPCC 2007, Ulbrich 2008*).

*Scaife 2005* erklärt nach Modellrechnungen einen Teil des starken positiven Winter-NAO-Trends 1964 - 1995 mit einer Kopplung der beobachteten stratosphärischen Zirkulationsänderungen. Die Änderungen in der Stratosphäre können jedoch auch von einer positiven Rückkoppelung mit der Troposphäre herrühren. Nur wenn die stratosphärische Dynamik im Modell repräsentiert ist, lässt sich die Größenordnung der beobachteten NAO-Zunahme zwischen den 1960er und 1990er Jahren in einem Modell simulieren (*Langematz 2008*). Eine Zunahme der Treibhausgase in der Troposphäre und Abnahme des Ozons in der Stratosphäre verstärken den meridionalen Temperaturgradienten in der unteren Stratosphäre, was zu einem stärkeren – auch beobachteten – polaren Vortex (Wirbel) führt. Dies könnte den positiven NAO-Trend beeinflusst haben (*Langematz 2008*). Modellrechnungen, die sowohl Treibhausgase als auch Schwefelaerosole berücksichtigen, haben zwar auch eine Zunahme der NAO modelliert, der beobachtete Anstieg ist aber erheblich und signifikant größer als der modellierte Anstieg, was zeigt, dass die derzeitigen Klimamodelle nicht in der Lage sind, diesen wichtigen Aspekt der großskaligen Klimaänderung zu simulieren (*Gillett 2005, Jung 2008*).

Eine Modellrechnung des AWI (*Dethloff 2006*) mit einem verbesserten Ozean-Atmosphäre-Modell, das das verstärkte Rückstrahlverhalten für Solarstrahlung im arktischen Bereich berücksichtigt, sagt eine deutliche Veränderung des Wettergeschehens im nordatlantischen Raum voraus. Die Energieflüsse in der Arktis werden durch die Eis-Albedo-Rückkoppelung

infolge der Erwärmung der Arktis umverteilt. Dadurch ändert sich auch die NAO. Die verbesserten Modelle sagen eine Tendenz zur negativen NAO-Phase voraus. Damit könnten künftig häufiger trockene und kalte Winter auftreten.

Allgemein wird der Beitrag der NAO an der eurasischen Wintererwärmung in den letzten 30 Jahren auf 30 - 50% abgeschätzt (*Thompson 2000, 2001, Hense 2008*). Eine von *Jung 2008* erstellte Auswertung zum derzeitigen Stand der Forschung weist darauf hin, dass viele grundlegende Mechanismen in Zusammenhang mit der Veränderung der NAO bei steigendem Treibhausgas(THG)-Antrieb noch nicht gut genug verstanden und abgesichert sind.

#### 4.4 Südliche Oszillation El Niño – ENSO

Die stärkste natürliche Klimaschwankung auf Zeitskalen von einigen Monaten bis Jahren ist das El Niño/Southern Oscillation-Phänomen (ENSO). El Niño und La Niña sind Phänomene des tropisch-pazifischen Wettergeschehens, bei denen sich die Zirkulationsverhältnisse im Pazifik grundlegend ändern. Diese Zirkulationsänderung im tropischen Ozean (Abb.4.16) ist seitens der Atmosphäre mit der so genannten südlichen Oszillation (SO), einer Art Luftdruckschwung zwischen dem südostasiatischen Tiefdruckgebiet und dem südostpazifischen Hochdruckgebiet (der tropisch/subtropischen Südhemisphäre), eng korreliert (*Schönwiese 2005, Wang 2002, 2005*).

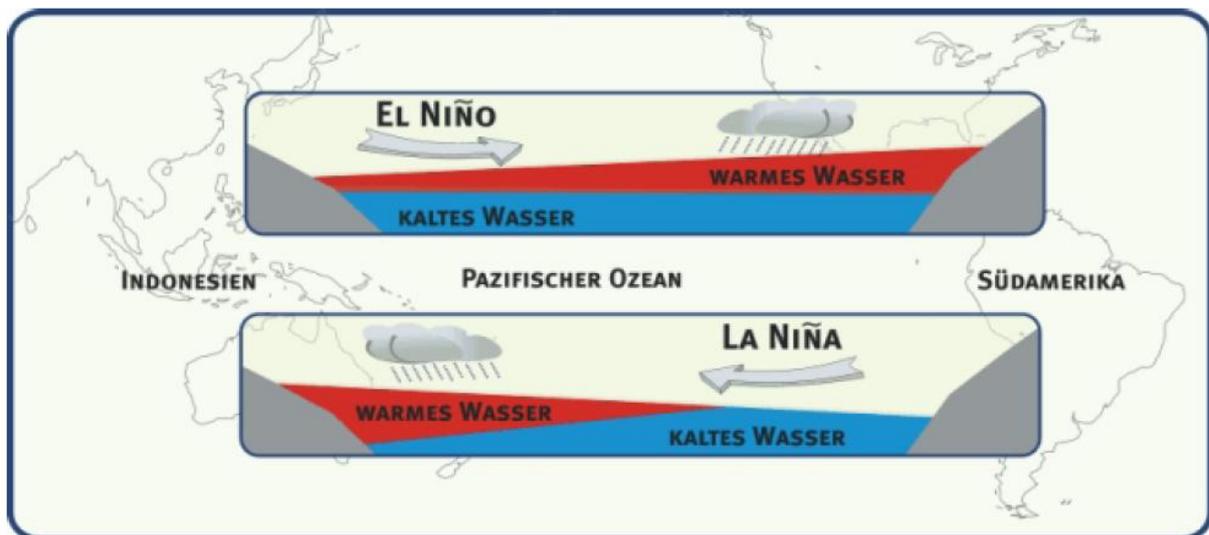


Abb. 4.16: Vereinfachtes Schema von El Niño und La Niña (Brönnimann 2004/05)

El Niño ist geprägt durch eine ungewöhnliche Erhöhung der Meeresoberflächentemperaturen von über 5 °C entlang des Äquators von der peruanischen Küste bis in den zentralen Pazifik (Abb. 4.17); diese Gebiete sind normalerweise sehr kalt. Dadurch schwächt sich der Südostpassat ab. Im westlichen - normalerweise niederschlagsreichen - äquatorialen Pazifik herrscht bei einem El Niño außergewöhnliche Trockenheit, während es durch erhöhte Verdunstung über den erwärmten Wasserflächen an dem östlichen Rand des Ozeans (Peru) zu verstärkten Niederschlägen kommt. Die Abstände zwischen zwei El Niño-Ereignissen sind unregelmäßig und liegen zwischen 3 und 7 Jahren und dauern ca. 12 -18 Monate. Nach einer Übergangsphase folgt auf ein El Niño-Ereignis meist eine La Niña. Dieses kalte Ereignis ist im Wesentlichen durch eine Verstärkung des Normalzustandes gekennzeichnet.

Nach Satellitenbeobachtungen (*Lee 2010*) hat sich in den vergangenen 30 Jahren die Intensität der El Niño-Ereignisse im äquatorialen Pazifik nahezu verdoppelt. Auch die Häufigkeit hat seit den 90er Jahren zugenommen. Das stärkste Ereignis fand 2009/10 statt (Abb. 4.17)

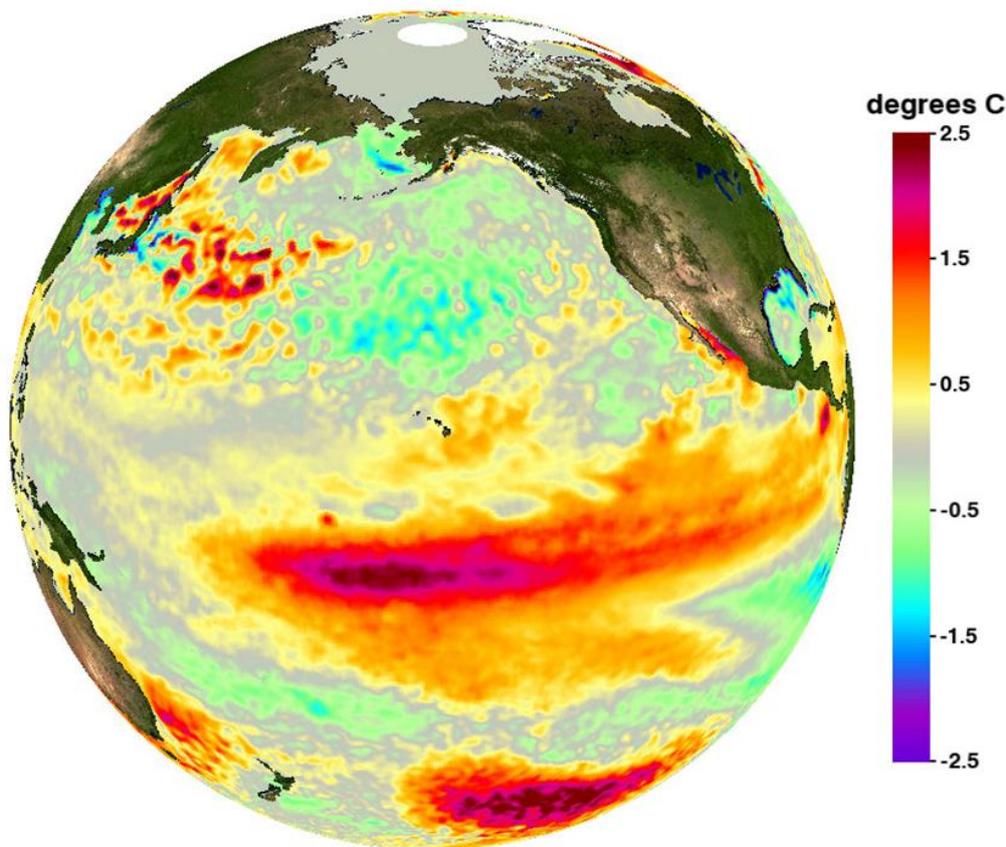


Abb. 4.17: Anomale Meeresoberflächentemperatur in °C während des ungewöhnlich starken El Niño-Ereignisses 2009 vor der Westküste Südamerikas (Quelle: Physical Oceanography Distributed Active Archive Centre (PO.DAAC) of NASA JPL.)

El Niño ist ein natürliches, seit Jahrtausenden auftretendes Phänomen.

Die wichtigsten – weitgehend gesicherten - globalen Folgen eines El Niño sind:

- Steigerung der Niederschläge im östlichen und Abnahme im westlichen äquatorialen Pazifik
- Zunahme tropischer Sturmaktivitäten im östlichen Nordpazifik
- Abnahme der Hurrikan-Aktivitäten im Atlantischen Ozean
- Trockenheit in der Karibik und Mittelamerika
- Höhere Niederschläge in den südlichen USA und im östlichen Afrika
- Dürren im nordöstlichen Brasilien und Südostasien

Als Folge wird von Ernteaussfällen, Rückgang des Fischfangs, Korallenriffausbleichungen, Dürren, Stürmen und Überschwemmungen in vielen Teilen der Welt (Asien, Afrika, Südamerika) berichtet. USA hat beim stärksten El Niño-Ereignis der vergangenen 25 Jahre 1997/98 durch mildere Temperaturen (weniger Heizkosten) profitiert. Die globale Temperaturerhöhung betrug 1998 durch dieses Ereignis  $0,17^{\circ}$  C. Sehr starke El Niño-Ereignisse haben auch (geringe) Auswirkungen auf das Wettergeschehen in Europa, wie *Brönnimann 2004* nachgewiesen hat. Die Vorhersage von El Niño-Ereignissen mit gekoppelten Klimamodellen ist heute noch mit großen Unsicherheiten verbunden (*IPCC 2007*).

### Diskussion des möglichen Einflusses der globalen Erwärmung

Inwieweit die globale Erwärmung einen Einfluss auf El Niño hat, oder umgekehrt El Niño sich auf die globale Mitteltemperatur auswirkt und der beobachtete Temperaturanstieg der letzten 30 Jahre zumindest teilweise auf gehäuft aufgetretene El Niño-Ereignisse zurückgeführt werden kann, wird in der Wissenschaft diskutiert. Die seit 1976 beobachtete Erhöhung der

Meeresoberflächentemperatur im tropischen Pazifik um 0,3 bis 0,4 °C spräche *Sun 2003* zufolge dafür, da zwischen den ENSO-Phasen und der globalen Mitteltemperatur ein signifikanter Zusammenhang besteht. Die Multi-Modellrechnungen für den AR4 Bericht ergaben keine erkennbare Änderung in Höhe und Häufigkeit von El Niño-Ereignissen im 20. Jahrhundert. Auch für das 21. Jahrhundert ergaben sich keine konsistenten Hinweise für Änderungen in Stärke und Häufigkeit von El Niño Ereignissen (*IPCC 2007*). Neuere Modellrechnungen ergaben nach *Latif 2008* Hinweise auf eine Verstärkung der El Niño Aktivitäten bei höheren Treibhausgaskonzentrationen im 21. Jahrhundert.

#### 4.5 Thermohaline Zirkulation (THC), Meridionale Umwälzbewegung (MOC)

Die großräumige Zirkulation der Ozeane wird bestimmt durch das Windfeld sowie Wärme- und Frischwasserflüsse an der Oberfläche. Die globale Verteilung der Wärmeflüsse führt dazu, dass am Äquator Wärme aufgenommen und in der Polregion wieder abgegeben wird.

Die Oberflächenströme des Ozeans sind zusammen mit den Tiefenströmen Teil eines alle drei Ozeane umspannenden Strömungssystems, des „großen marinen Förderbandes“ (great conveyor belt), das sich vom Nordatlantik über das antarktische Zirkumpolarmeer und den Indischen Ozean bis in den nördlichen Pazifik und zurück erstreckt (Abb. 4.18). Aufgrund seiner wichtigsten Antriebsfaktoren Temperatur und Salzgehalt wird es auch „thermohaline Zirkulation (THC)“ genannt. Ein wichtiger Motor der Dichte-getriebenen THC ist das thermohalin bedingte Absinken von kaltem und salzreichem Wasser im Nordatlantikstrom, der eine Fortsetzung des Golfstroms ist. Die größte Absinkregion liegt zwischen Norwegen und Grönland, eine zweite wichtige liegt vor der Antarktis im Wedell-Meer. Zum Ausgleich strömt im Gegenzug an der Meeresoberfläche warmes Wasser nach Norden. Die THC ist Teil der Meridionalen Nordatlantischen Umwälzbewegung (MOC), die den gesamten Nordsüdwärts-Fluss über die Breite und Tiefe des Ozeans beinhaltet, also auch den windgetriebenen Teil (<http://www.clivar.ucar.edu/organization/atlantic/THCwrkshp.pdf>).

Die atlantische (meridionale) Umwälzbewegung (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) besteht (*Jungclaus 2008*) aus warmen, nordwärts gerichteten oberflächennahen Strömungen, einem Absinken von Wassermassen in hohen Breiten und tiefen Bodenströmungen am westlichen Rand. Die AMOC ist Teil eines globalen ozeanischen Umverteilungssystems für Wärme und Süßwasser. Temperatur- und salinitätsbedingte Dichteunterschiede halten diese Zirkulation aufrecht. Das Strömungssystem gibt die mitgeführte Wärme zum großen Teil an die Atmosphäre ab und trägt damit zu dem relativ milden Klima Nordwesteuropas bei. Die AMOC sollte nicht mit dem Golfstrom verwechselt werden, der ein Teil der windgetriebenen Zirkulation des Atlantiks ist (*Jungclaus 2008*).

Die eigentliche Ursache dieser globalen Zirkulation liegt in dem höheren Salzgehalt (1-3 ‰) aufgrund der stärkeren Verdunstung und damit der höheren Dichte des Atlantiks gegenüber den anderen Ozeanen. Das warme Wasser, das oberflächennah nach Norden strömt, gibt die Wärme an die Luft ab, sinkt gekühlt und infolge der Verdunstung bzw. Gefrieren salzreicher und damit auch dichter nach unten und strömt in 2-3 km Tiefe wieder in Richtung Süden. Das dichtere Atlantikwasser strömt in der Tiefe in die beiden anderen Ozeane ein und leichteres Oberflächenwasser in den Atlantik zurück.

Neueren Untersuchungen (*Lozier 2010*) nach ist der Einfluss von Wind und Stromwirbeln, so genannten Eddys, bislang nicht genügend berücksichtigt worden. Demnach fließt das Tiefenwasser im Atlantik größtenteils nicht als kontinuierlicher Strom entlang der Kontinentalränder nach Süden. Vielmehr zirkulieren hier zahlreiche Eddys, die das Wasser nach und nach weitergeben. Gleichzeitig vermischt sich dadurch »frisches« Wasser, das erst vor kurzer Zeit abgesunken ist, mit »älterem« Wasser aus den Meeresbecken, so dass der Austausch zwischen den Strömungen und dem quasistabilen Tiefenwasser der Ozeane größer ist als bislang angenommen.

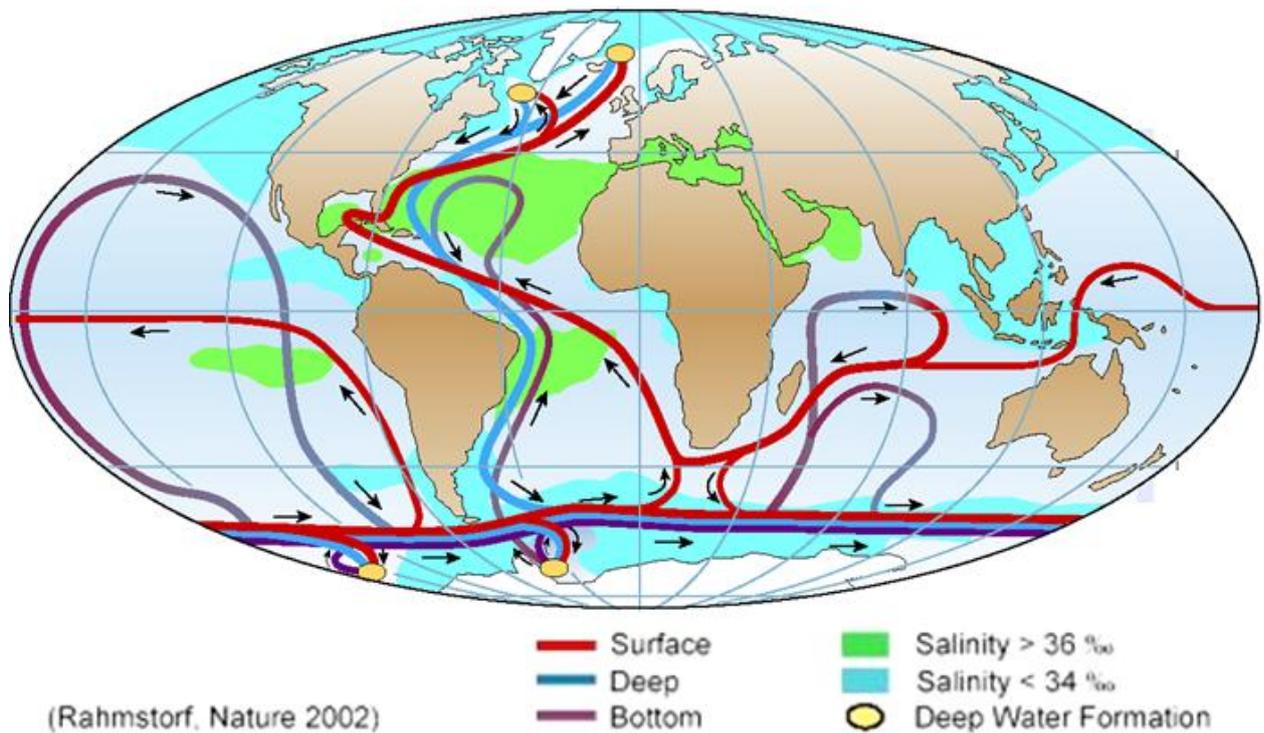


Abb. 4.18: Stark vereinfachte Darstellung des globalen Systems von Meeresströmungen (thermohaline Zirkulation) mit kalten Tiefen- (blau), am Meeresboden (Lila) und warmen Oberflächenströmungen (rot), Gebiete mit hohem Salzgehalt (grün) und mit niedrigem Salzgehalt (dunkelblau), Gebiete mit Tiefenwasserbildung (gelb) (Rahmstorf 2002)

### Diskussion der möglichen Änderung der THC/MOC

In der Fachwelt wird seit einigen Jahren intensiv diskutiert, ob sich durch die globale Erwärmung diese Zirkulation verändern und der Tiefenwasserstrom (irreversibel) abreißen könnte. Dies würde zu einer Vereisung des Nordmeeres und zu einer globalen Abkühlung mit besonderer Auswirkung für Europa führen. Neuere Modellsimulationen zeigen ein differenziertes Verhalten und eine geringe Gefahr des Abreißen des marinen Förderbandes und damit auch eines Ausbleibens des Golfstroms in den kommenden Jahrzehnten. Selbst bei einer Vervielfachung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration würde sich die Zirkulationsstärke nur um 10 bis 50 % verringern. Nach *IPCC 2007* ist es nach den Modellrechnungen sehr unwahrscheinlich, dass die thermohaline Zirkulation (Meridional Overturning Circulation (MOC)) im Nordatlantik im 21. Jahrhundert einen großräumigen abrupten Wandel erfährt. Eine Verlangsamung der MOC ist in diesem Jahrhundert aufgrund der Klimaerwärmung jedoch sehr wahrscheinlich. Die von *Bryden 2005* anhand von einzelnen Messungen zwischen 1957 und 2004 festgestellte Verlangsamung der Meridionale Nordatlantische Zirkulation (MOC) - die THC ist ein Teil davon - um ca. 30 % hat sich als eine Variabilitätsschwankung herausgestellt (*Cunningham 2007*). *Willis 2010* hat nach Satelliten- und Meeresströmungsmessungen mit Hilfe von Sonden keine Änderung der MOC zwischen 2002 und 2009 feststellen können; gegenüber 1993 hat sie sich sogar um ca. 20 % verstärkt. Auch *Latif 2006* kann aufgrund von Analysen Messungen im Ozean und Modellrechnungen keine nachhaltige Schwächung der THC feststellen und geht auch davon aus, dass sie in den nächsten Dekaden im Rahmen der natürlichen Klimavariabilität bleiben wird. *Lohmann 2008*, *Hofmann 2009* haben im Gegensatz zum AR4 (*IPCC 2007*) das zusätzliche Frischwasser der schmelzenden grönländischen Eisfläche in die Modellrechnungen einbezogen und kommt zu einer stärkeren Abschwächung der MOC im 21. Jahrhundert. *Hofmann 2009* sieht deswegen der starke Eintrag von Frischwasser in Grönland als ein Kippunkt (Tipping point) der Klimaveränderungen (s. auch Kap. 9).

### 4.6. Natürliche Treibhausgase

Aufgrund des Strahlungsantriebs der klimarelevanten, natürlichen Spurengase in der Atmosphäre wird die bodennahe globale Mitteltemperatur von  $-18\text{ °C}$  auf ca.  $+15\text{ °C}$  angehoben. Dieser so genannte natürliche Treibhauseffekt wird durch Absorption und Reemission lang-

welliger, terrestrischer Wärmestrahlung in der Atmosphäre hervorgerufen. Die wichtigsten natürlichen Treibhausgase sind Wasserdampf,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$  und  $\text{N}_2\text{O}$  (s. Kap. 3.3). Die Konzentration in der Atmosphäre war in den vergangenen 2000 Jahren bis zum Beginn der Industrialisierung in etwa konstant und ist danach deutlich angestiegen (Abb. 4.19).

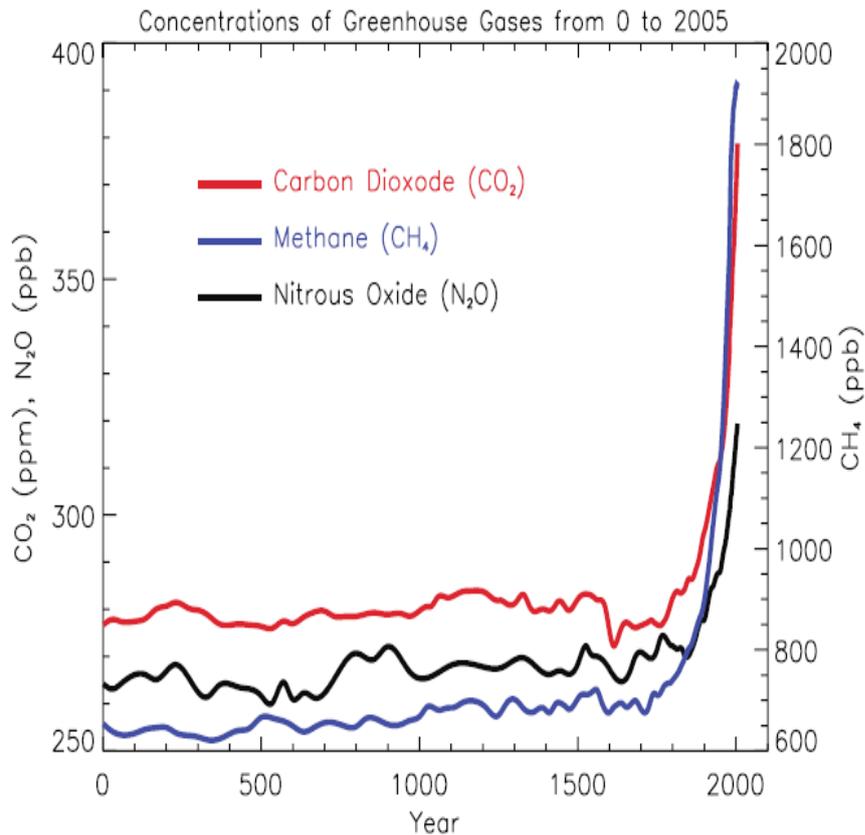


Abb. 4.19: Entwicklung der wichtigsten langlebigen Treibhausgase in den vergangenen 2000 Jahren. Die Zunahme seit etwa 1750, dem Beginn der Industrialisierung ist auf menschliche Tätigkeiten zurückzuführen. Die Konzentration wird in ppm bzw. ppb angegeben und gibt die Anzahl der Moleküle pro Million bzw. Milliarde Luftmoleküle an (IPCC 2007).

## 5 Anthropogene Einflussfaktoren auf das Klima

Der Mensch ist Teil der Biosphäre und nimmt allein durch seine Existenz zwangsläufig Einfluss auf seine Umwelt und damit auch auf das Klimasystem. Die stetige Zunahme der Weltbevölkerung seit der Steinzeit und das Sesshaft werden des Menschen vor einigen tausend Jahren und der damit verbundene Übergang vom Nomadentum zu Ackerbau und Viehzucht hatte bereits einen Einfluss auf das Klima, weil hierfür die Rodung von Waldflächen erforderlich war. Die ersten systematischen Waldrodungen fanden zur Zeit des Römerreichs im Mittelmeerraum statt, als z.B. der Apennin weitgehend für den Schiffsbau abgeholzt wurde.

Die Menschheit hat in den vergangenen 8000 Jahren nahezu die Hälfte der Wälder zur landwirtschaftlichen Nutzbarmachung gerodet (*Brovkin 2004*). In Deutschland sank der Waldanteil zwischen 800 und 2000 n. Chr. von 90 auf ca. 31%, das Ackerland erhöhte sich im selben Zeitraum von 5 % auf 38 %, dies bewirkt eine Änderung der Rückstrahlungseigenschaften (Albedo) unserer Erdoberfläche. Das Trockenlegen von Sümpfen verringerte die Methanemission, der Reisanbau erhöhte diese wieder. Das Stadtwachstum erhöhte die Versiegelung der Landschaft. Mit Beginn der Industrialisierung begann der Mensch nun auch in großem Umfang, die Zusammensetzung der Atmosphäre weltweit zu verändern. So kann die Zunahme von Kohlendioxid und Methan während der letzten 200 Jahre in Eisbohrkernen nachgewiesen werden. Hinzu kommen neue, künstliche Verbindungen wie zum Beispiel die FCKWs, die die Ozonschicht in der Stratosphäre zerstören und einen Beitrag zur Klimaerwärmung leisten (*Wagner 2004*, ergänzt vom Verfasser).

Eine Übersicht über anthropogene Einflussfaktoren auf das Klima gibt Abb. 5.1 (*Wagner 2004*).

Anthropogene Veränderung	Wirkung auf das Klimasystem
Brandrodung	Veränderung der Erdoberfläche, Emission von Spurengasen, z.B. CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> <sup>1)</sup> , CH <sub>4</sub> , CH <sub>3</sub> Cl und Aerosolen
Ackerbau	Veränderung der Erdoberfläche, Emission von Spurengasen, z.B. CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , Bewässerung
Viehzucht	Emission von Spurengasen, z.B. CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S
Verbrennung fossiler Energieträger	Emission von Spurengasen, z.B. CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> <sup>1)</sup> , CO, HCl und Aerosolen
Mülldeponierung	Emissionen von Spurengasen, z.B. CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
Künstliche Bebauung	Veränderung der Erdoberfläche (z.B. Veränderung der Albedo, der oberflächennahen Luftströmungen sowie des Wasserhaushalts)
Industrielle Prozesse	Emission einer Vielzahl von zum Teil künstlichen Spurenstoffen sowie Aerosolen
Flugverkehr	Emission von Spurengasen, z.B. CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> <sup>1)</sup> , direkte Veränderung der Bewölkung
Regulierung von Binnengewässern	Veränderung des Wasserhaushalts

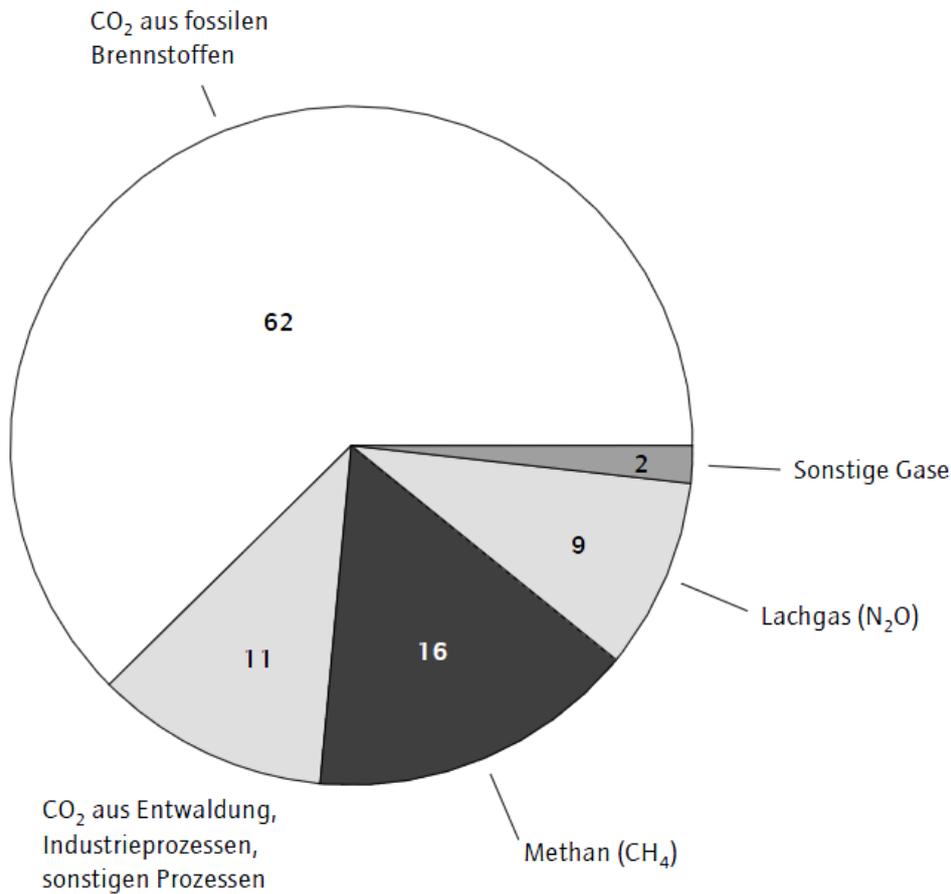
1) NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>

Abb.5.1: Anthropogene Veränderung und ihre Wirkung auf das Klimasystem. Neben der Veränderung der Erdoberfläche werden Spurengase und Aerosole, die Albedo, der Wasserhaushalt und die Bewölkung verändert (*Wagner 2004*)

### 5.1 Anthropogene Treibhausgase

Die wichtigsten Treibhausgase sind Wasserdampf (H<sub>2</sub>O), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Ozon (O<sub>3</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O), fluorhaltige Gase (FCKW, H-FKW und SF<sub>6</sub>). Ihr Anteil beträgt 11% bei N<sub>2</sub>O, 16 % bei Methan und 73 % bei CO<sub>2</sub> (Abb. 5.2). Daneben gibt es noch einige

Vorläufersubstanzen (indirekte Treibhausgase), wie Stickoxide, organische Verbindungen (NMVOC) und Kohlenmonoxid, die für die Atmosphärenchemie und die Bildung bzw. Zerfall von Treibhausgasen, wie z.B. Ozon und Methan, eine wichtige Rolle spielen. Die Datenerfassung zur regionalen und globalen Entwicklung der Treibhausgase wird vom World Data Center for Greenhouse Gases (WDGCC) durchgeführt (<http://gaw.kishou.go.jp>).



Quelle: International Energy Agency 2008.

DIW Berlin 2009

Abb.5.2 : Globale anthropogene Treibhausgasemissionen 2005, Anteil in Prozent (Kempf 2009 nach IEA 2008)

Abb. 5.3 gibt eine Übersicht der wichtigsten Charakteristika der klimawirksamen Spurengase (Treibhausgase) mit Emissionen und Konzentrationen (jeweils 2008, vorindustrielle Konzentrationen ca. 1800 in Klammern) sowie Abschätzung der Beiträge zum natürlichen (vorletzte Spalte) bzw. anthropogener Treibhauseffekt (letzte Spalte) (geändert, nach Schönwiese 2006). Die CO<sub>2</sub>-Konzentration ist 2009 auf 386 ppm gestiegen. Demnach ist CO<sub>2</sub> zu ca. 61 % am anthropogenen Treibhauseffekt, CH<sub>4</sub> zu ca. 15 %, FCKW zu ca. 11 %, N<sub>2</sub>O zu ca. 4 % und O<sub>3</sub> zu ca. 9 % beteiligt.

Die wichtigsten menschlichen Aktivitäten, bei denen Treibhausgase freigesetzt werden, sind neben der Verbrennung fossiler Brennstoffe die Waldrodung, die Landwirtschaft, Abfalldepotien und bestimmte industrielle Prozesse. Eine Aufschlüsselung der Herkunft der anthropogenen Treibhausgase gibt ebenfalls Abb. 5.2 wieder (Schönwiese 2006, geändert). Der Anteil zur anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emission in Höhe von ca. 85 % fossile Energie umfasst die Bereiche Energiewirtschaft, Industrie, Haushalt und Verkehr.

<b>Spurengasübersicht</b>					
Spurengas, Symbol	Anthropog. Emissionen	Atmosphärische Konzentrationen		Treibhauseffekt	
				natürl.	anthrop.
Kohlendioxid, CO <sub>2</sub>	30 Gt/Jahr	386 (280)	ppm	22 %	60 %
Methan, CH <sub>4</sub>	330 Gt/Jahr	1,8 (0,7)	ppm	2 %	15 %
CFC	0,2 Mt/Jahr	0,5 (0)	ppb	-	11 %
Distickstoffoxid, N <sub>2</sub> O	10 Mt/Jahr	<0,32 (0,27)	ppm	4 %	4 %
Ozon, O <sub>3</sub>	-	34 (25)	ppb	8 %	8 %
Wasserdampf, H <sub>2</sub> O	relativ gering	2,6 (2,6)	%*	60 %	(indirekt)
<b>Herkunft der anthropogenen Emissionen</b>					
<b>CO<sub>2</sub>: 85% fossile Energie, 15% Waldrodungen und Holznutzung (insb. Entw.länder)</b>					
<b>CH<sub>4</sub>: 25% fossile Energie, 28% Viehhaltung, 11% Reisanbau, 4 % tierischer. Dünger, 13 % Abfälle, 10% Abwasser, 9% Biomasseverbrennung</b>					
<b>CFC: Treibgas in Spraydosen, Kältetechnik, Dämm-Material, Reinigung</b>					
<b>N<sub>2</sub>O: 86% Landwirtschaft (einschl. Düngung), 5% chem.. Industrie, 6% fossile Energie, 1% Biomasse-Verbrennung, 2% Abwasser</b>					
<b>O<sub>3</sub>: indirekt durch Vorläufersubstanzen (z.B. Stickoxide NO<sub>x</sub>, Verkehrsbereich)</b>					

\*) bodennaher Mittelwert

Abb. 5.3: Übersicht der Spurengase und ihr Beitrag zum Treibhauseffekt sowie Aufschlüsselung der Herkunft der Emissionen, vorindustrielle Werte in Klammern (geändert 2010 vom Verfasser, Quelle: Schönwiese 2006, GAW 2009, <http://gaw.kishou.go.jp/wdceg/products/bulletin/Bulletin2008/ghg-bulletin-5.pdf>, IPCC 2007, Arndt 2010)

Die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre hat seit Beginn der Industrialisierung unterschiedlich stark zugenommen (Abb. 5.3 (ab ca. 1978)). Insbesondere bei den FCKWs wurde der Anstieg in den letzten Jahren stark verringert bzw. konnte ein Rückgang festgestellt werden. Beim Methan war 1999 - 2006 kein Anstieg zu verzeichnen, ab 2007 nimmt die Zuwachsrates wieder zu. Die Kohlendioxidkonzentration stieg in den vergangenen 30 Jahren im Mittel um 1,5 ppm pro Jahr an.

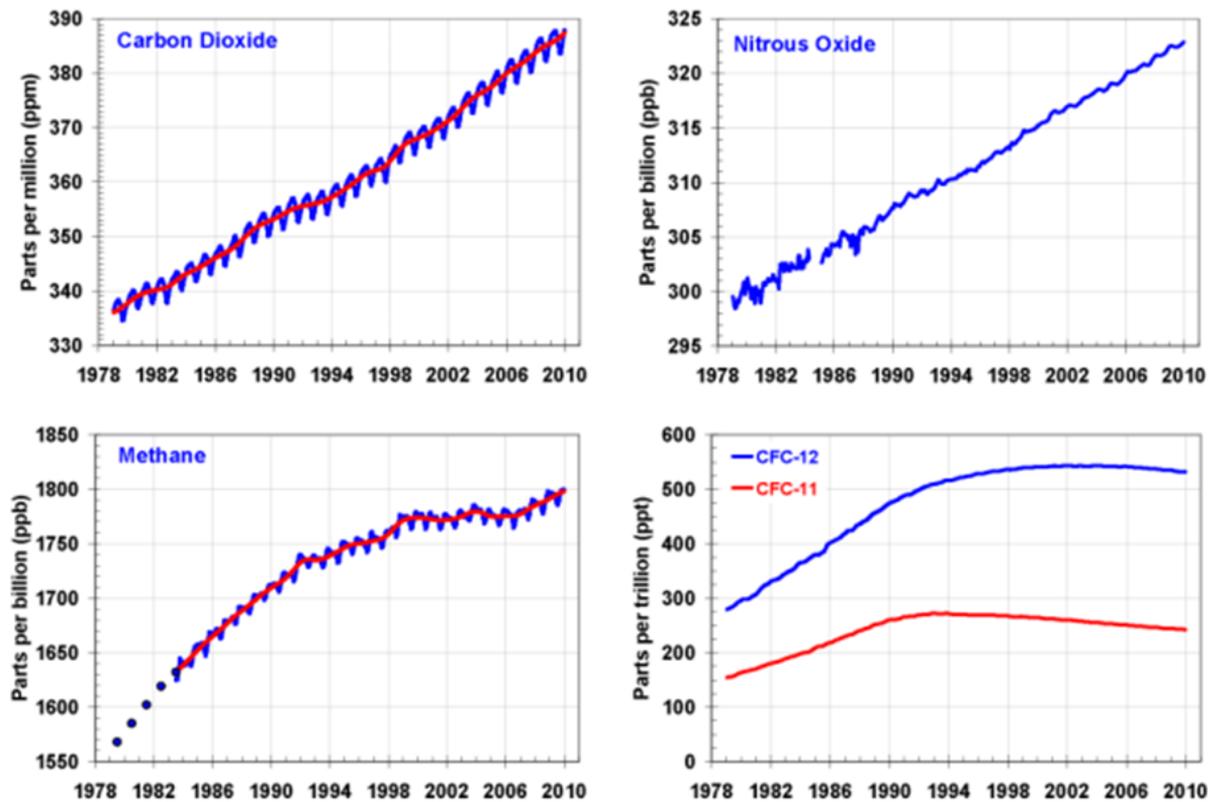
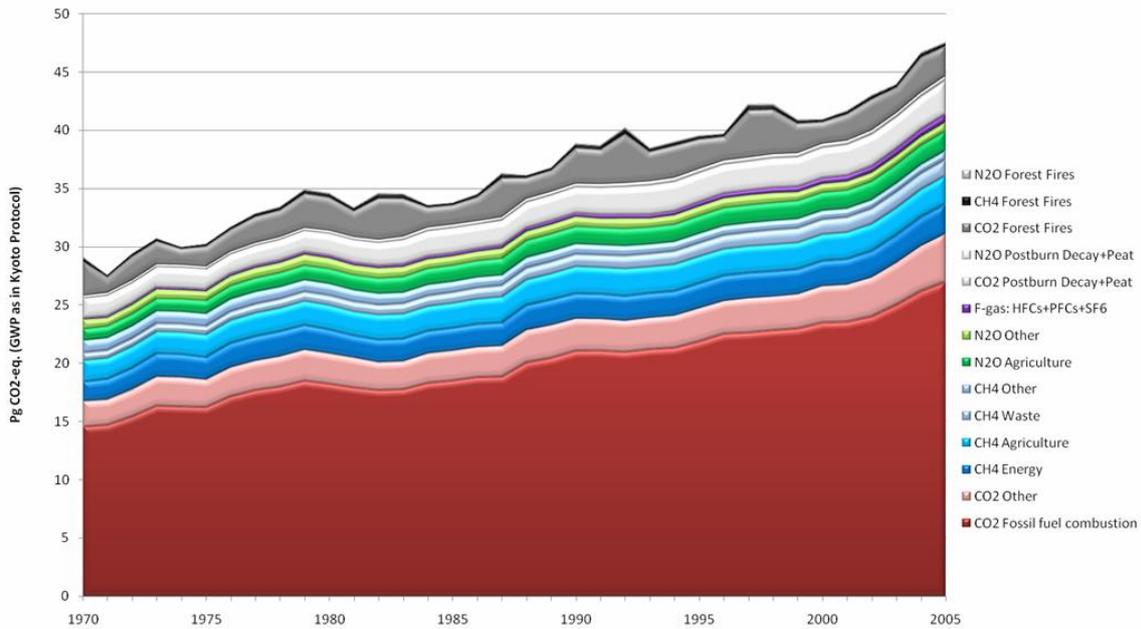


Abb. 5.3: Entwicklung der mittleren globalen Konzentrationen der wesentlichen, gut durchmischten, langlebigen Treibhausgase 1978 - 2009 von dem globalen Datenerfassung-Netzwerk der NOAA. Diese Gase machen 96 % des direkten Strahlungsantriebes der langlebigen Treibhausgase seit 1750 aus (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>).

Die weltweiten Treibhausgasemissionen nahmen 1970 - 2009 kontinuierlich zu (s. auch Kap. 10). In Abb. 5.4 und 5.5 wird beim  $\text{CO}_2$  der Beitrag durch die Entwaldung und beim Methan und  $\text{N}_2\text{O}$  der hohe Anteil durch die Landwirtschaft sichtbar. Der Anteil der F-Gase liegt bei etwa 1 %. Abb. 5.4 zeigt den Anstieg der THG-Emissionen für verschiedene Sektoren einschließlich der Verbrennung von Biomasse (Emissionen von Waldbränden sind eingeschlossen, nicht aber Biobrennstoffe sowie Verbrennung von landwirtschaftlichen Abfällen, Grasland und Savannenfeldern (unter der Annahme, dass diese  $\text{CO}_2$ -neutral sind)). Danach hat die Treibhausgasemission im Zeitraum 1970 – 2005 von 29 Mrd. t  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  auf 47,5 Mrd. t zugenommen. Vor allem durch die  $\text{CO}_2$ -Zunahme im Energiesektor aber auch durch deutliche Beiträge der  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CH}_4$  Emissionen. Im Zeitraum 1970-2005 wurden insgesamt 1 300 Mrd. t  $\text{CO}_2$ -Äquivalente in die Atmosphäre freigesetzt. In den ersten fünf Jahren des neuen Jahrhunderts war der Zuwachs der globalen Emissionen stärker als in den 1990er Jahren.



Source: EDGAR 4.0 (JRC/PBL, 2009)

Abb. 5.4: Entwicklung der weltweiten Treibhausgasemissionen von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, F-Gase in Pg t (= Mrd. t) CO<sub>2</sub>eq (Quelle: RIVM/MNP, <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/background.php>)

Die Gesamtemissionen der Industrieländer (Annex I) sind im Zeitraum 1990 – 2007 um 3,9 % und die der Mitgliedsländer des Kyoto-Protokolls (z. Zt. 36 Staaten) um 16,4 % gesunken (UNFCCC 2009). Die Treibhausgasemissionen in der EU-27 nahmen von 1990 bis 2008 um 11,3 % 627 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente ab (Abb. 10.1) (EEA 2010). 2007 – 2008 betrug der Rückgang 2 %, 2009 ergab sich aufgrund der Wirtschaftskrise ein weiterer Rückgang.

Die Abb. 5.5 zeigt nach IPCC 2007 die Entwicklung der Treibhausgasemissionen 1970 – 2004 (a) und die Anteile der verschiedenen Treibhausgase (b) und Sektoren (c). Die Treibhausgasemissionen sind in diesem Zeitraum um 70 % angestiegen. Der Hauptanteil hatte 2004 CO<sub>2</sub> aus der fossilen Verbrennung mit ca. 56,6 % und die Entwaldung mit 17,3 %, gefolgt von Methan mit 14,3 %, Lachgas 7,9 % und F-Gase 1,1 %. Bei den Sektoren haben die Energieversorgung mit 25,9 % und die Industrie mit 19,4 % den Hauptanteil, gefolgt von der Forst- und Landwirtschaft mit 17,4 % bzw. 13,5 %.

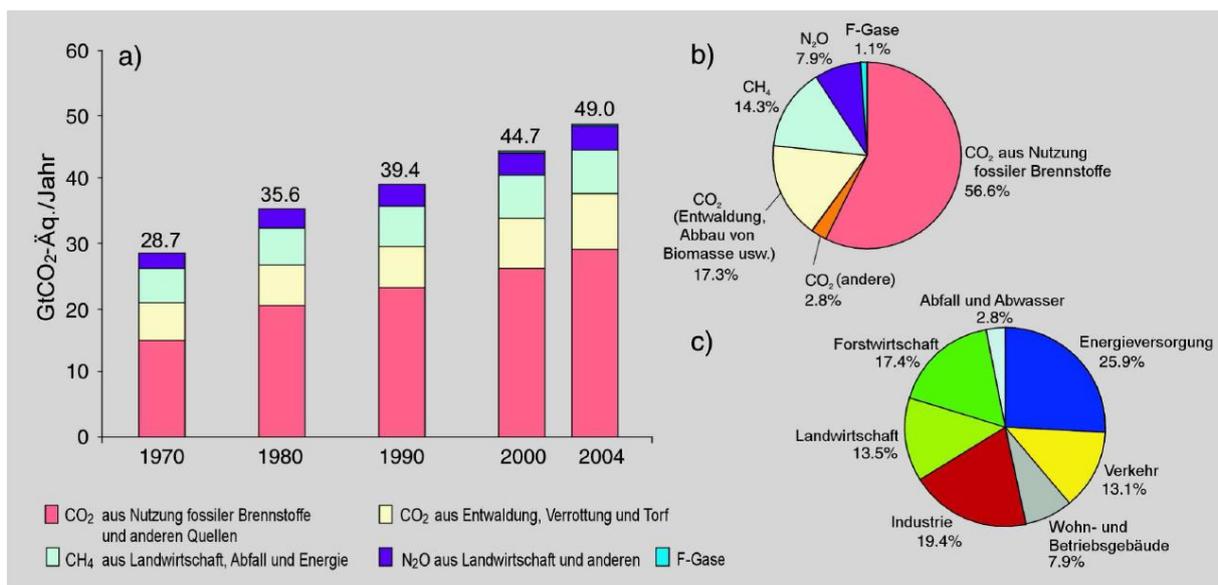


Abb. 5.5: (a) Weltweite jährliche Emissionen anthropogener Treibhausgase von 1970 – 2004, (b) Anteil der wichtigsten Treibhausgase an den Gesamtemissionen im Jahr 2004 als CO<sub>2</sub>-Äq., (c) Anteil unterschiedlicher Sektoren an den gesamten anthropogenen Treibhausgasemissionen im Jahr 2004 als CO<sub>2</sub>-Äq. (Forstwirtschaft schließt Entwaldung mit ein) (IPCC 2007)

Abbildung 5.6 zeigt die Entwicklung der Treibhausgase in Deutschland für den Zeitraum 1990 – 2008. Für alle Gase mit Ausnahme von HFC konnten in diesem Zeitraum erhebliche Reduzierungen erreicht werden (*NIR 2010*). Auf den Beitrag der Energiewirtschaft wird in Kapitel 10 eingegangen.

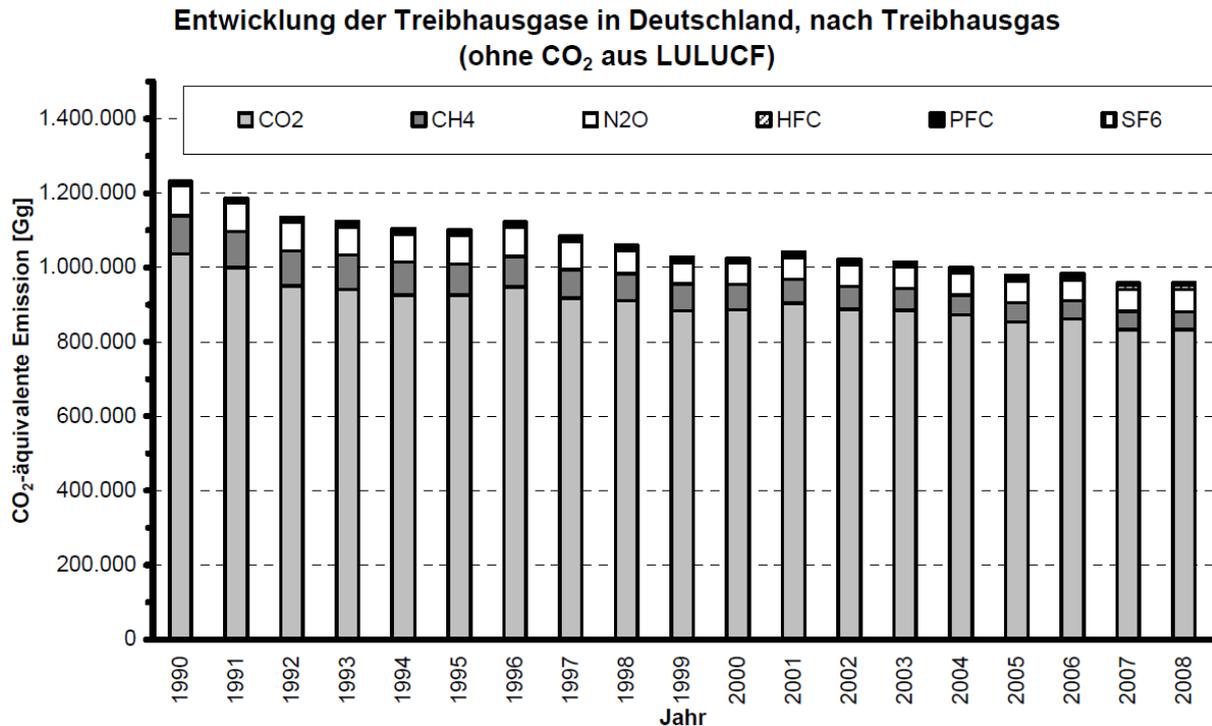


Abb. 5.6: Entwicklung der Emissionen der Treibhausgase in Deutschland für die Jahre 1990 bis 2008 in 1000 t (Gg) CO<sub>2</sub>-Äquivalent (*NIR 2010*)

Der für das Klima bedeutsame **Strahlungsantrieb** der Treibhausgase hat kontinuierlich zugenommen (Abb. 5.7). 1990 – 2009 hat sich der gesamte Strahlungsantrieb um über 27,5 % (AGGI = 1,275) erhöht (CO<sub>2</sub> allein um 36 %, rechte Seite der Abb.5.7). Der von der amerikanischen Ozean- und Wetterbehörde (NOAA) definierte jährliche Treibhausgasindex (AGGI) wurde für 1990, das Basisjahr des Kyoto-Protokolls, auf 1 gesetzt. Mit der Einführung des „Annual Greenhouse Gas Index (AGGI) hat NOAA ein einfaches Instrument zur Verfügung gestellt, um die relative Änderung des Strahlungsantriebs der langlebigen Treibhausgase bezogen auf das Jahr 1990 zu verfolgen (Abbildung 5.7).

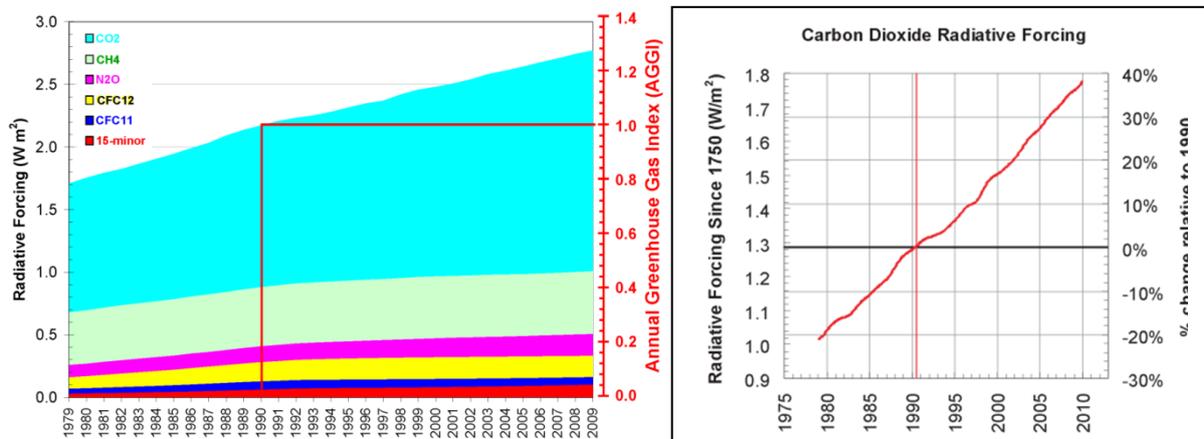


Abb.5.7: Entwicklung des Strahlungsantriebs von CO<sub>2</sub> (rechts) und allen langlebigen Treibhausgasen (links) für 1979 – 2009 gegenüber der vorindustriellen Ära (1750) (*Arndt 2010*). Der Strahlungsantrieb des Kohlendioxids hat sich seit 1990 um 36 % erhöht, während der Zuwachs beim Methan gebremst wurde und bei den FCKWs ein Rückgang eintrat. Der AGGI (links) gibt den prozentualen Anstieg des gesamten Strahlungsantriebs seit 1990 an. 1,275 bedeutet einen Anstieg um 27,5 % (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>)

Die dargestellten 6 langlebigen Spurengase machen 96 % des Strahlungsantriebs durch Treibhausgase aus. In 2009 lag der AGGI um 27,5 % über dem Wert von 1990. Somit wurde der starke Anstieg von CO<sub>2</sub> durch die Abflachungen bei Methan und den FCKW teilweise kompensiert (*Plaß-Dülmer 2009*). CO<sub>2</sub> allein ist für 80 % des Anstiegs des Strahlungsantriebs verantwortlich.

### 5.1.1 Wasserdampf (H<sub>2</sub>O)

Wasserdampf ist der hauptsächliche Absorber der Wärmestrahlung in der Atmosphäre. Wasserdampf ist im Mittel zu 0,3 % der Masse in der Atmosphäre enthalten, Kohlendioxid zu 0,038 %, d.h. Wasserdampf entspricht rund 80 % der Masse der Treibhausgase in der Atmosphäre (ca. 90 % des Volumens). Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas mit einem Beitrag zum Treibhauseffekt zwischen 36 % und 66 % und zusammen mit den Wolken sogar 66 % und 85 %. Wasserdampf hat jedoch nur eine kurze Verweilzeit von ca. 10 Tagen in der Troposphäre. *Schmidt 2010* geht heute von einem Beitrag zum Treibhauseffekt von 50 % für Wasserdampf, 25 % für Wolken und 20 % für CO<sub>2</sub> aus.

Als Sekundäreffekt spielt der Wasserdampf auch beim anthropogenen Treibhauseffekt eine Rolle, da sich über die Temperaturerhöhung auch die Verdunstung erhöht. *IPCC 2007* geht davon aus, dass durch den anthropogen verursachten Wasserdampfanstieg infolge der Temperaturerhöhung durch den CO<sub>2</sub>-Anstieg eine zusätzliche Erwärmung in gleicher Höhe verursacht wird. Wasserdampf führt also zu einer positiven Rückkoppelung (Feedback) beim Treibhauseffekt. Für einen Teil der gemessenen Zunahme des Wasserdampfes in der Stratosphäre - 75 % in den letzten 40 Jahren - ist das ebenfalls angestiegene Methan verantwortlich, da es in der Stratosphäre zu Wasserdampf und Kohlendioxid oxidiert.

Die Rolle des Wasserdampfes wird in den Modellen über die Rückkoppelungsmechanismen berücksichtigt. Klimamodelle und empirische Studien berechnen einen positiven Rückkoppelungsfaktor des Wasserdampfes von 0.9 - 2.5 W/m<sup>2</sup>/°C (*IPCC 2007*). *Dessler 2008* hat im Zeitraum 2003 – 2008 satellitengestützte Infrarotmessungen der Atmosphäre (AIRS) in verschiedenen Schichten ausgewertet und einen vergleichbaren Wert der Wasserdampfrückkoppelung von im Mittel 2.04 W/m<sup>2</sup>/K gefunden. Damit konnten die Ergebnisse der Modellrechnungen bestätigt werden.

### 5.1.2 Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

Kohlendioxid ist ein bedeutendes Treibhausgas und trägt nach dem Wasserdampf am stärksten zum Treibhauseffekt bei. CO<sub>2</sub> wird an der Erdoberfläche in verschiedener Weise emittiert und absorbiert: Aufnahme und Photosynthese durch die terrestrische Biosphäre, Austausch mit den Ozeanen und menschliche Aktivitäten wie Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie Änderungen in der Landnutzung (z.B. Brandrodung). Kohlendioxid wird aus der Atmosphäre durch verschiedene Prozesse entfernt, welche in unterschiedlichen Zeiträumen ablaufen. Es hat eine relativ lange Verweilzeit von im Mittel 100 Jahren. Als Referenz-Gas wird dem Kohlendioxid definitionsgemäß ein Treibhauspotential von 1 zugewiesen. CO<sub>2</sub> trägt zu 63,5 % zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei (*WMO 2010*).

### CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre

Der CO<sub>2</sub>-Pegel in der Atmosphäre ist seit Beginn der Industrialisierung bis 2009 um etwa 38 % gestiegen. Die jährliche Konzentrationszunahme in den letzten beiden Dekaden betrug etwa 0,4 %. Die globale mittlere Konzentration in der Atmosphäre erhöhte sich 2009 um 1,5 ppm auf 386 ppm (0,0386 %) (*Arndt 2010*). Die globale Zuwachsrate variiert jährlich stark (0,9 – 3,1 ppm) und lag im Durchschnitt in der Periode 1960 -2005 bei 1,4 ppm/Jahr. Während der Periode 1998 – 2008 erhöhte sich die Zuwachsrate auf 1,93 ppm (*WMO 2010*). Die höchsten Zuwachsraten (2 - 3 ppm/Jahr) traten in den Jahren mit warmen El Niño Southern Oscillation-Ereignissen (ENSO) auf, aber auch 2002, 2003, 2005 und 2006. Die niedrigste Zuwachsrate (0,4 ppm/Jahr) mit teilweise negativem Zuwachs in den nördlichen Breiten ergab sich 1992 nach dem Ausbruch des Mt. Pinatubo in 1991. Eine Zunahme von 1 ppm CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre entspricht der Masse von 2,1 Mrd. t Kohlenstoff. Die Abb. 5.8 zeigt die Änderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Änderung der Landnutzung, Verbrennung fossiler

Energien, Zementproduktion u.a. (oben links) sowie die Veränderung der CO<sub>2</sub>-Senkenanteile der Atmosphäre (oben rechts), der Landvegetation (unten links) und des Ozeans (unten rechts). Der Senkenanteil des Ozeans nimmt deutlich ab (Canadell 2007).

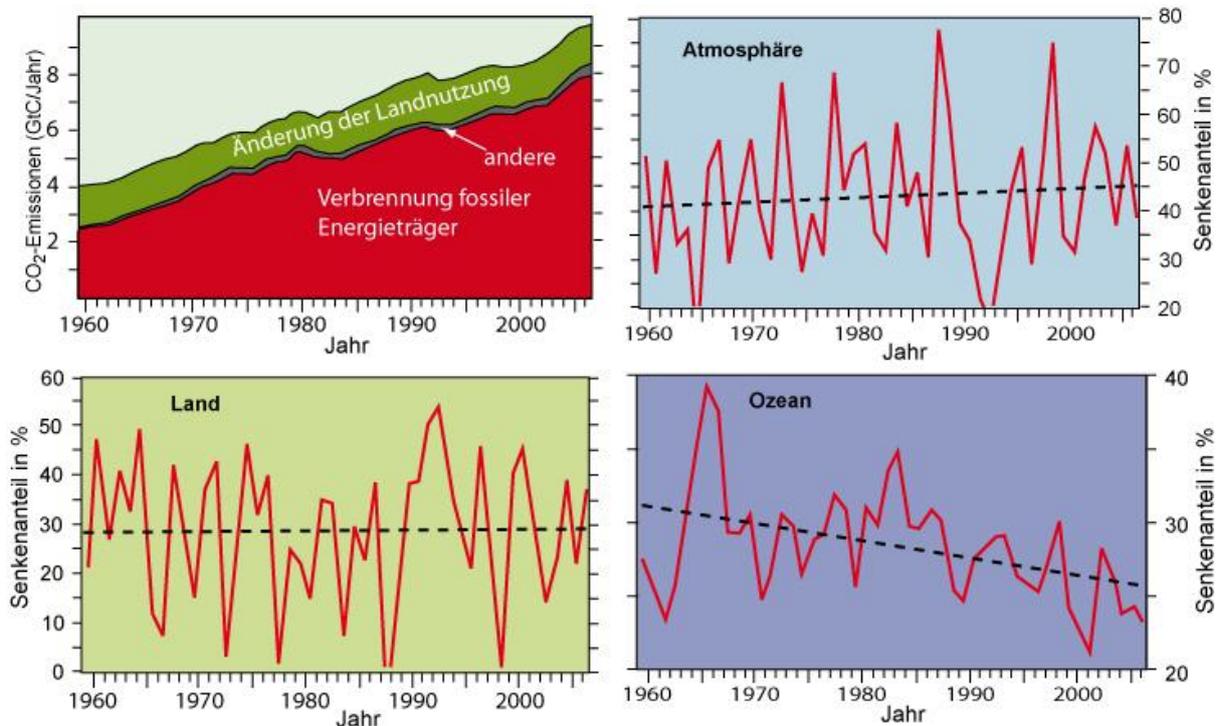


Abb. 5.8: Die Änderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Änderung der Landnutzung, Verbrennung fossiler Energien, Zementproduktion u.a. (oben links) sowie die Veränderung der CO<sub>2</sub>-Senkenanteile der Atmosphäre (oben rechts), der Landvegetation (unten links) und des Ozeans (unten rechts). Der Senkenanteil des Ozeans nimmt deutlich ab. (Darstellung von D. Kasang, 2009 [www.wiki.bildungsserver.de](http://www.wiki.bildungsserver.de) nach Canadell 2007)

Eisbohrkernmessungen in der Antarktis im Rahmen des EPICA Projektes (European Project for Ice Coring in Antarctica) haben gezeigt, dass die heutige Kohlendioxidkonzentration von 386 ppm die höchste seit 650 000 Jahren ist (Siegenthaler 2005).

Die saisonalen Schwankungen sind in der Nordhemisphäre hoch und im Süden niedrig. Während die Schwankungen in der Nordhemisphäre die Absorption und Emission der Biosphäre widerspiegeln, zeigen die Schwankungen in der Südhemisphäre Änderungen im Ozean sowie Biomasseverbrennung zusätzlich zum Einfluss der Biosphäre an (WDCGG, März 2006, <http://qaw.kishou.go.jp/wdogg.html>).

Der atmosphärische CO<sub>2</sub>-Anstieg mit seinen jahreszeitlichen Schwankungen wird weltweit an zahlreichen Stationen gemessen. Abbildung 5.9 zeigt beispielhaft die Messstellen Schauinsland im Schwarzwald, Zugspitze und Mauna Loa, Hawaii, die den gleichen Verlauf zeigen.

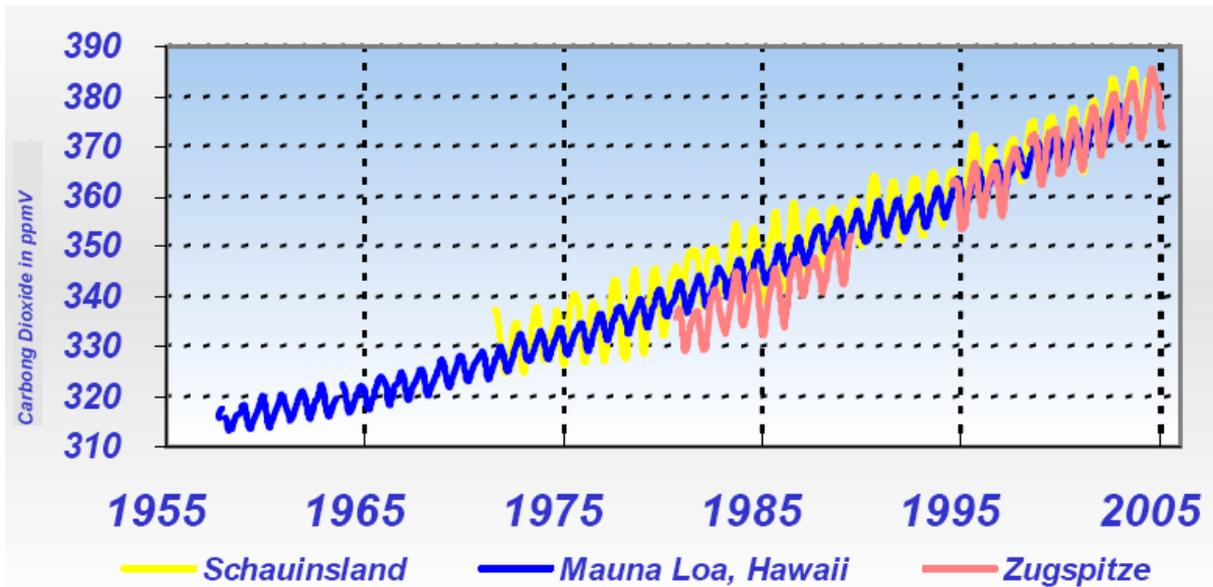


Abb. 5.9: Trend der weltweiten CO<sub>2</sub> Konzentration 1958 – 2005 für die Stationen Mauna Loa, Hawaii, Zugspitze und Schauinsland (Ries 2006)

Aufgrund der guten Durchmischung in der Atmosphäre (Durchmischungszeit in der Troposphäre einige Tage bis einige Wochen) unterscheiden sich die Konzentrationen räumlich und zeitlich nur wenig. Der Jahresgang der Monatswerte mit einem Maximum im Frühling und einem Minimum im Spätsommer/Frühherbst wird durch das Zusammenspiel der biologischen Aktivität, der Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie der Höhe der Mischungsschicht verursacht. Durch die Photosynthese wird vom Frühling bis Frühherbst der Troposphäre Kohlendioxid entzogen. Durch die Mineralisation (Zersetzung) von Biomasse wird anschließend bis zum Frühjahr wieder Kohlendioxid freigesetzt. Die Jahresamplitude beträgt deshalb etwa 15 ppm. Das Konzentrationsniveau ist in den Flachlandstationen etwas höher, da Bergstationen v.a. im Winter häufig oberhalb der so genannten Mischungsschicht liegen. Da die atmosphärische Mischung nicht schnell erfolgt, werden in Gebieten mit starken Emissionsquellen geringfügig höhere Konzentrationen gemessen als an Hintergrundstationen. So werden z.B. für den Schauinsland eine „fossile Überhöhung“ im Monatsmittel von bis zu 10 ppm (Jahresmittel 1,9 ppm) und in Heidelberg von bis zu 50 ppm gefunden (UBA 2000).

## CO<sub>2</sub>-Emissionen

Der Kohlendioxidanstieg in der Atmosphäre seit Mitte des 19. Jahrhunderts von 280 ppm auf 386 ppm 2009 ist auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen. Die Erde (Meer, Landoberfläche mit Vegetation) nimmt, wie Abb. 5.10 zeigt, seit 1950 im Mittel ca. 40 % des aus Verbrennung fossiler Brennstoffe emittierten Kohlendioxids auf und vermindert damit den Kohlendioxidanstieg in der Atmosphäre deutlich (IPCC 2007, s. auch Kap. 2 u. 10.2).

Nach IPCC 2007 haben sich die jährlichen CO<sub>2</sub> Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe von einem Mittelwert von 6,4 (6,0 – 6,8) Mrd. t C (Gt) in den 1990er Jahren auf 7,2 (6,9 – 7,5) Mrd. t C in den Jahren 2000 – 2005 erhöht. Die jährliche Kohlendioxidemission aus Landnutzungsänderungen wird auf 1,6 (0,5 – 2,7) Mrd. t C für die 1990er Jahre abgeschätzt, obgleich diese Schätzungen große Unsicherheiten beinhalten (IPCC 2007). Canadell 2007 gibt für 2000 – 2006 eine globale CO<sub>2</sub>-Emission von 7,6 Mrd. t C an und für die Landnutzung 1,5 Mrd. t C. Für 2008 werden von Le Quéré 2009 eine Emission von 8,7 Mrd. t C aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe, einschließlich der Zementproduktion und Gasfackeln angegeben. Ca. 45 % der CO<sub>2</sub>-Emission verbleiben in der Atmosphäre, 24 % werden vom Ozean und 30 % von der Land-Biosphäre aufgenommen (Abb. 5.10). Weltweit ist 2009 infolge der Wirtschaftskrise die Kohlendioxidemission erstmals – jedoch geringfügiger als erwartet – um 1,3 % gesunken (Myrhe 2010). In Deutschland sind 2009 die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 8,2 % gegenüber 2008 auf 765 Mio. t gesunken (UBA Presseinformation Nr. 13/2010).

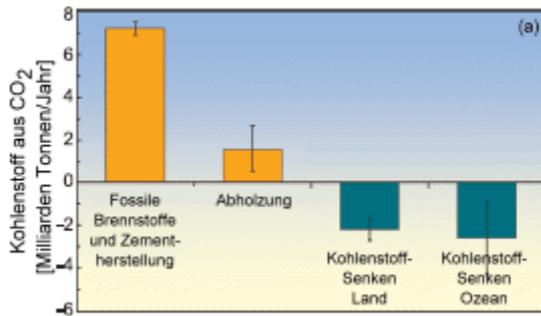


Abb. 5.10: Beitrag der wichtigsten Quellen und Senken zum Anstieg der Kohlendioxidemission in der Atmosphäre, aus IPCC 2007, WG I S.513 (aus <http://www.oekosystem-erde.de/html/treibhausgase.html>)

Ausgasungen des Ozeans oder der Landoberfläche leisten zum Kohlendioxidanstieg keinen großen Beitrag. Verschiedene Argumente für die anthropogene Herkunft des  $\text{CO}_2$ -Anstiegs in der Atmosphäre lassen sich hierfür anführen:

- Die vom Menschen verursachte Emission durch fossile Energienutzung – derzeit ca. 9,1 Milliarden Tonnen Kohlenstoff jährlich (incl. Abholzung) - ist größer, als dem atmosphärischen Konzentrationsanstieg entspricht (s. auch Kap. 10.2). Bei Berücksichtigung der Senken (Meer und Vegetation ca. 5 Mrd. t C/a) stimmen die Werte in etwa überein.
- Weder im Meer noch im Boden wurde eine Abnahme des Kohlendioxids beobachtet. Das Meer nimmt im Gegenteil große Mengen an  $\text{CO}_2$  auf.
- Parallele Abnahme des C-14/C-12-Verhältnisses beim atmosphärischen  $\text{CO}_2$ . Dieser sogenannte Suess-Effekt wurde erstmals Anfang der 1950'er von Hans Suess, Univ. California, beschrieben. Dieser Effekt tritt auf, da fossile Brennstoffe kein C-14 mehr enthalten Ursache hierfür ist, dass fossile Brennstoffe viel älter sind als 10 Halbwertszeiten des Kohlenstoffisotops C-14 (60 000 Jahre). Bei der Verbrennung werden daher nur C-12 und C-13 der fossilen Brennstoffe frei und verdünnen die Menge des C-14 in der Atmosphäre.
- Parallele Abnahme des C-13/C-12-Verhältnisses beim atmosphärischen  $\text{CO}_2$ . Dieses Phänomen entsteht dadurch, dass fossile Brennstoffe, Bäume und Bodenkohlenstoff aus photosynthetisch erzeugtem Kohlenstoff stammen, welcher deutlich weniger C-13 enthält als Kohlenstoff aus dem Meer oder Vulkanen (Abb. 5.11 b Abnahme des C-13/C-12 Verhältnisses mit Zunahme der C-Emission).
- Parallele Abnahme des Sauerstoffgehaltes in der Atmosphäre, welche eine zwangsläufige Folge der Oxidation von Kohlenstoff zu Kohlendioxid (= Verbrennungsvorgang) ist. (Abb. 5.11 b, <http://scrippsco2.ucsd.edu/>)
- Der intersphärische Gradient der  $\text{CO}_2$ -Zunahme zwischen Nord- und Südhemisphäre gibt einen zusätzlichen Hinweis, dass die Zunahme des  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre durch Quellen in der Nordhemisphäre verursacht wird (Abb. 5.11 rechte Seite)

Quelle: IPCC 2007

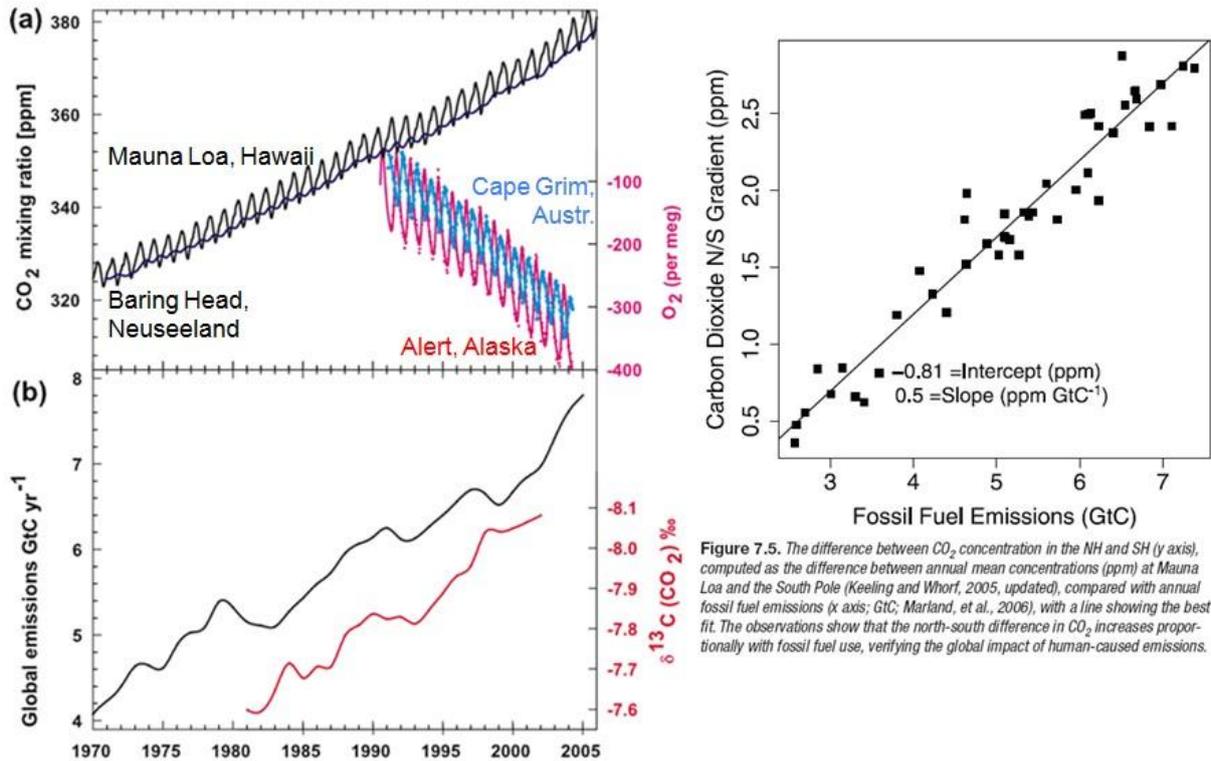


Figure 7.5. The difference between  $\text{CO}_2$  concentration in the NH and SH (y axis), computed as the difference between annual mean concentrations (ppm) at Mauna Loa and the South Pole (Keeling and Whorf, 2005, updated), compared with annual fossil fuel emissions (x axis; GtC; Marland, et al., 2006), with a line showing the best fit. The observations show that the north-south difference in  $\text{CO}_2$  increases proportionally with fossil fuel use, verifying the global impact of human-caused emissions.

Abb.5.11: Hinweise für die anthropogene Herkunft des Anstiegs der  $\text{CO}_2$  Konzentration in der Atmosphäre. Links oben: parallele Abnahme des Sauerstoffgehaltes durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, links unten: Abnahme des  $\text{C-13/C12}$  Verhältnisses mit Zunahme der C-Emission, rechts:  $\text{CO}_2$ -Zunahme zwischen Nord- und Südhemisphäre (IPCC 2007)

### 5.1.3 Methan ( $\text{CH}_4$ )

Methan ( $\text{CH}_4$ ) ist das zweitwichtigste Treibhausgas. Methan trägt sowohl direkt durch seine Absorptionsbanden im IR-Bereich als auch indirekt als Quelle klimarelevanter Gase wie Ozon, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Wasserdampf zum Treibhauseffekt bei. Das Treibhauspotential ist 25-mal stärker als das von Kohlendioxid, und es trägt zu etwa 18 % zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei (WMO 2010). Methan wird in der Atmosphäre durch viele einzelne Reaktionsschritte mit OH zerstört, in der Stratosphäre auch durch Reaktion mit Chlor und Sauerstoff und am Boden durch Absorption. Die Zerstörung in der Stratosphäre führt zu einer Erhöhung der Wasserdampfkonzentration und damit zu einem zusätzlichen Strahlungsantrieb ( $0,07 \text{ W/m}^2$ ), der als indirekter Effekt bei der Berechnung des Strahlungsantriebs des Methans berücksichtigt wird. Durch weitere indirekte Wirkungen über die Reaktionen mit anderen Spurengasen in der Atmosphäre wie Ozon und OH, sowie  $\text{NO}_x$ , CO und die VOCs wird der Klimaertrieb erhöht und vom IPCC 2007 mit  $0,48$  ( $0,43 - 0,53$ )  $\text{W/m}^2$  angegeben. Über die Quellen und Senken gibt es immer noch Unsicherheiten (WMO 2010). Die mittlere atmosphärische Verweildauer liegt bei 12 Jahren.

Die von Keppler 2006, Uni Heidelberg veröffentlichten Ergebnisse von Messungen, wonach auch Pflanzen Methan erzeugen und an die Atmosphäre abgeben sollen, konnte durch neuere Messungen mit denselben Pflanzen (Dueck 2007, Beerling 2008) nicht bestätigt werden. Nisbert 2008 fand experimentell einen Mechanismus für die Methanemission von Pflanzen. Sie fungieren stattdessen als rein passive Transporteure des Methans: Mit ihren Wurzeln nehmen sie aus dem Boden Wasser und darin von Bakterien erzeugtes, gelöstes Methan auf, leiten es zu den Blättern und verdampfen es wieder, während sie atmen.

Die  $\text{CH}_4$ -Konzentration hat sich in der Atmosphäre seit Mitte des 18. Jahrhunderts um 150 % erhöht. Von 1000 bis 1800 war der Methangehalt in etwa konstant bei 700 ppb. 2009 betrug die durchschnittliche jährliche Konzentration 1794 ppb. Die jährlichen Konzentrationschwankungen haben ein Maximum in den nördlichsten Breitengraden und nehmen nach Süden ab (WMO 2010).

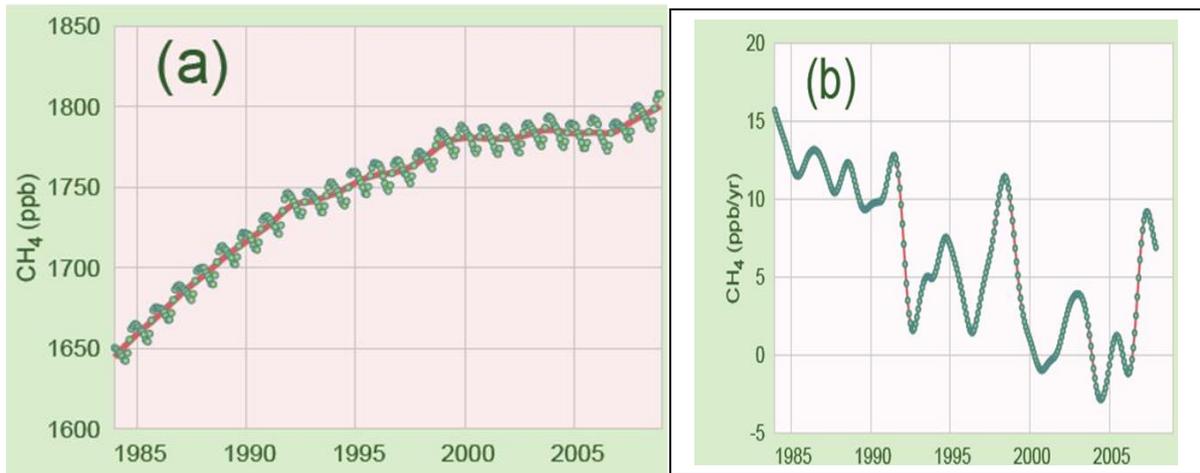


Abb. 5.11: links: Monatliche mittlere Konzentration von Methan (a) und jährliche Zuwachsrate (b) für die Jahre 1984 – 2008 (<http://gaw.kishou.go.jp/wdogg.html>), rechts: Atmosphärische Konzentration von Methan für die vergangenen 10 000 Jahre (großes Diagramm) und seit 1750 (kleines Diagramm) (IPCC 2007)

Die globale jährliche Zuwachsrate (Abb. 5.11) betrug für die Jahre 1984 - 2004 im Durchschnitt 7 ppb, für 1984 bis 1990 11 ppb/Jahr, mit 5 ppb/Jahr war sie 1991 bis 2002 deutlich geringer und 2007/2008 wieder bei 7 ppb – möglicherweise durch eine Abnahme der OH-Konzentration verursacht (Rigby 2008, WMO 2010). Im Jahre 2009 nahm global die durchschnittliche Methankonzentration um 6,5 ppb auf 1794 ppb zu (Arndt 2010). Dlugokencky 2009 vermutet als Ursache für den Wiederanstieg ab 2007 eine Zunahme der Temperatur in der Arktis und vermehrte Niederschläge in den Tropen.

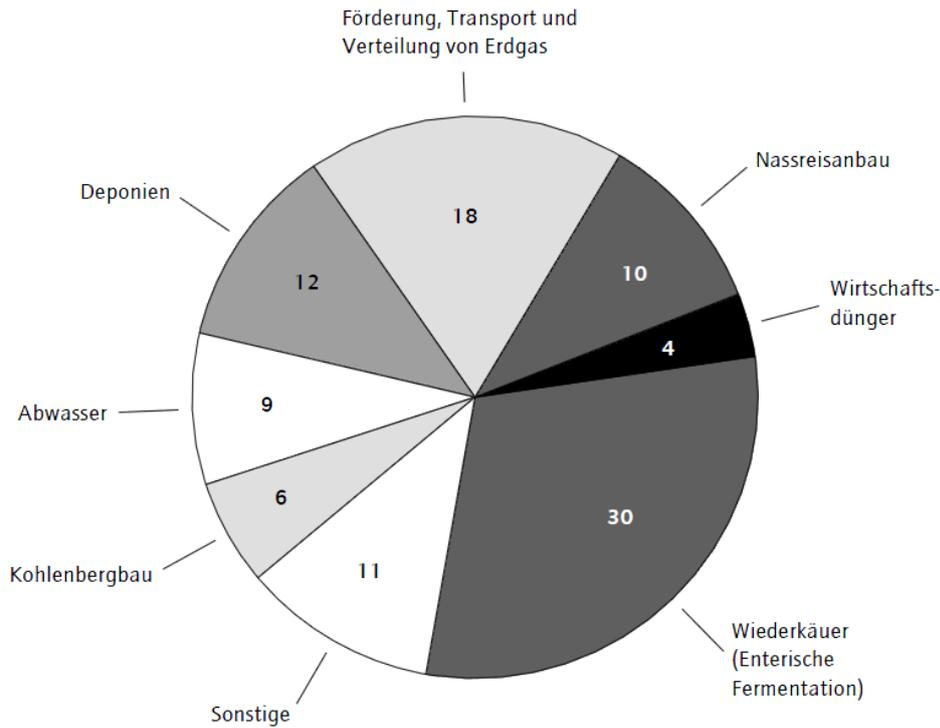
1998 war eine hohe Zuwachsrate zu verzeichnen bei einer gleichzeitigen, außergewöhnlichen hohen globalen Temperatur. Eine Stabilisierung der Methan-Konzentrationen auf dem heutigen Niveau würde die Reduktion der globalen anthropogenen Methan-Emissionen um 8 % voraussetzen.

Monatliche mittlere CH<sub>4</sub>-Konzentrationen zeigen eine saisonale Variation mit hohen Konzentrationen im Winter und niedrigen im Sommer. Hohe Temperaturanomalien ergeben eine verstärkte Methanemission aus Feuchtgebieten und eine verstärkte Entfernung durch erhöhte OH-Radikal-Konzentrationen. Wie Messungen ergaben, überwiegt global der erste Effekt.

### Methanemissionen

Während die Konzentrationsmessungen eindeutig sind, gestaltet sich die Bestimmung der Herkunft des Methans als äußerst schwierig. Die jährlichen Zuwachsraten in der Atmosphäre (Abb. 5.11 b) haben sich in den vergangenen Jahren bis 2007 deutlich verringert. Als Ursache werden Verringerungen der Methanemission beim Kohleabbau, beim Gastransport, bei den Deponien und beim Reisanbau diskutiert. Es ist aber auch möglich, dass sich aufgrund von Änderungen des atmosphärischen OH – Gehaltes die Lebensdauer des Methans in der Atmosphäre ändert, da OH die primäre Senke für Methan darstellt (Hansen 2004). Bousquet 2006 geht davon aus, dass sich seit 1999 die anthropogenen Methanemissionen wieder erhöht haben, aber durch geringere Emissionen aus Feuchtgebieten „maskiert“ wurden.

Weltweit werden etwa jährlich 566 (503 – 610) Mio. Tonnen CH<sub>4</sub> emittiert, der Mensch trägt mit ca. 60 – 70 % hierzu bei (EPA 2010). Zwischen 1970 und 2000 hat sich die globale Methanemission um 33 % erhöht (IEA 2005). Nach EDGAR hat sich die globale anthropogene Methanemission 1970 bis 2005 um ca. 30 % von 270 Mio. t auf 350 Mio. t erhöht ([http://edgar.irc.ec.europa.eu/part\\_CH4.php](http://edgar.irc.ec.europa.eu/part_CH4.php), s. auch Kap. 10.3). Der anthropogene Hauptanteil ist auf Rinderhaltung (30 %) und Reisanbau (10 %), Abwasser und Deponien (21 %) Bergbau (6 %), Öl- und Gasförderung (18 %) zurückzuführen (Abb. 5.12). In Deutschland hat sich die Methanemission im Zeitraum 1990 – 2008 um über 50 % von 4 919 t auf 2 274 t verringert (UBA 2010).



Quelle: United States Environmental Protection Agency 2006.

DIW Berlin 2009

Abb. 5.12: Herkunft der globalen anthropogen verursachten Methan-Emissionen (283 Mio. t (Tg)/Jahr) (nach EPA 2006) (Kempf 2009)

Natürliche Quellen sind Feuchtgebiete, Sümpfe (Tundren) und der tropische Regenwald sowie Termiten, Ozeane und Methanhydrate (Abb. 5.13). Im TAR wurde ein großer Unsicherheitsbereich bei den Abschätzungen der globalen Methanquellen dokumentiert; seitdem wurden keine signifikanten Verbesserungen veröffentlicht (IPCC 2007).

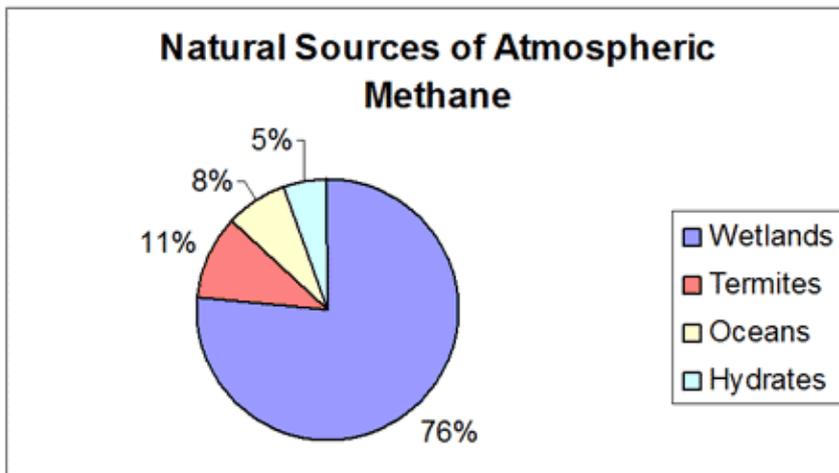


Abb. 5.13: Anteile der natürlichen Quellen (Feuchtgebiete, Termiten, Ozeane und Methanhydrate (190 Tg/Jahr)) der atmosphärischen Methankonzentration (EPA 2002, EPA 2006)

### 5.1.4 Distickstoffoxid, Lachgas ( $N_2O$ )

Distickstoffoxid ist ein relativ stabiles und langlebiges Treibhausgas mit einer mittleren Verweildauer von 114 Jahren. Als IR-absorbierendes Gas trägt das  $N_2O$  mit etwa 6 % (WMO 2010) direkt zum Treibhauseffekt bei (Treibhauspotential 310). Aufgrund seiner Langlebigkeit gelangt es auch in die Stratosphäre und trägt dort zum Ozonabbau bei.  $N_2O$  wird aus der Atmosphäre hauptsächlich durch Photodissoziation in der Stratosphäre entfernt

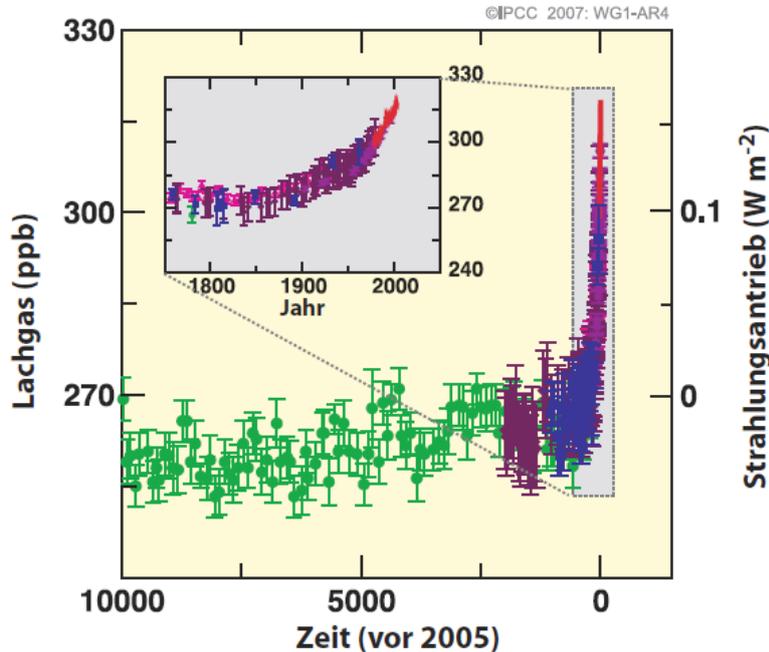


Abb. 5.14: Entwicklung der  $N_2O$ -Konzentration in den vergangenen zehntausend Jahren (großes Diagramm) und seit 1750 (kleines Diagramm), Messungen aus Eisbohrkerne (Symbole mit verschiedenen Farben – verschiedene Studien und atmosphärische Proben (rote Linie) (IPCC 2007)

Die Distickstoffoxidkonzentration ist seit 1750 (270 ppb) um etwa 17 % gestiegen (Abb. 5.14), die Konzentration von 322,5 ppb in 2009 (Arndt 2010) blieb in den vergangenen 1000 Jahren unerreicht. Während der Jahre 1991 - 1993 verringerte sich vorübergehend die Zuwachsrates, vermutlich infolge geringerer Verwendung von Düngemitteln, geringerer biogener Emissionen und größerer stratosphärischer Verluste durch vulkanisch induzierte Zirkulationsänderungen. Die jährliche Zuwachsrates von etwa 0,8 ppbv ist relativ gleichmäßig, auch in den beiden Hemisphären. Die Zuwachsrates lagen seit 1998 – 2008 etwa bei 0,78 ppb/Jahr (WMO 2010).

#### $N_2O$ -Emissionen

Eine Bilanzierung der  $N_2O$ -Emissionen ist nur mit erheblichen Unsicherheiten möglich (IEA 2006).  $N_2O$  wird von natürlichen (ca. 61 %) und anthropogenen Quellen (ca. 39 %) emittiert. Natürlichen Quellen von  $N_2O$  sind die tropischen Ozeane ( $\approx 1/3$ ) und Böden ( $\approx 2/3$ ), hat keine Senken in der Troposphäre und wird nur in der Stratosphäre durch UV-Photolyse oder angeregte Sauerstoffatome zerstört

Die wesentlichen anthropogenen Emissionen von  $N_2O$  (Abb. 5.15) stammen aus gedüngten Böden (76 %), der Tierhaltung (5 %) und aus der Industrie (Adipinsäureproduktion)

EPA 2010 gibt für 2000 einen Wert von 18,8 (8,5 – 27,7) Mio. t (Tg)  $N_2O$  für die globale Emission an, die natürliche Emission hat mit 12,1 Mio. t einen Anteil von 64 % (s. auch Kap.10.4). Die globale anthropogene  $N_2O$ -Emission hat sich nach EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) im Zeitraum 1970-2005 um fast 30 % von 7 Mio. t (Tg) auf 9 Mio. t erhöht ([http://edgar.jrc.ec.europa.eu/part\\_N2O.php#1overview](http://edgar.jrc.ec.europa.eu/part_N2O.php#1overview)). In Deutschland hat sich die  $N_2O$ -Emission von 1990 um ca. 25 % von 258 000 t auf 189 000 t in 2008 vermindert (UBA 2010).

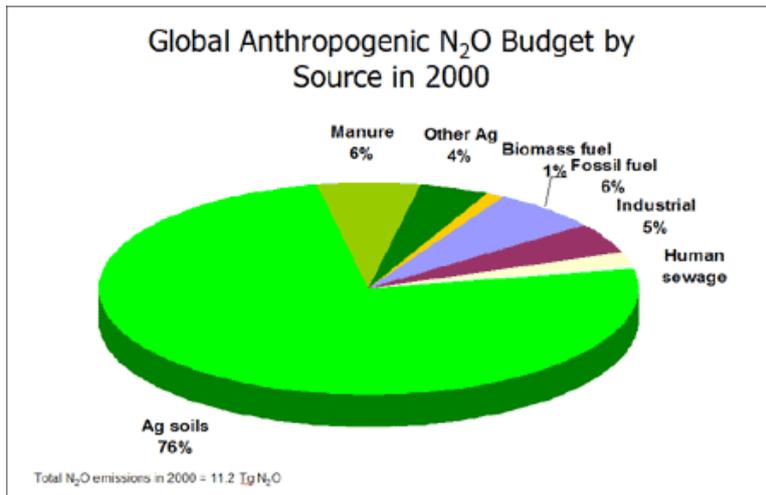


Abb. 5.15: Anteile an der globalen anthropogenen N<sub>2</sub>O-Emission 2000 von 11,2 Mio. t (Tg), landwirtschaftliche Böden (Ag soils) haben den größten Anteil mit 76 % (Quelle: EPA 2002, (<http://www.epa.gov/methane/intlanalyses.html>))

### 5.1.5 Ozon

Ozon ist ein äußerst klimawirksames, IR-absorbierendes Treibhausgas und wird nicht direkt aus natürlichen oder anthropogenen Quellen in die Atmosphäre abgegeben. Sein Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt ist unsicher und wird mit etwa 9 % angegeben (WMO 2010). Ozon ist ein dreiatomiges Sauerstoffmolekül und hat in der Troposphäre eine gesundheitsschädliche Wirkung, in der Stratosphäre dagegen absorbiert das Ozon die gesundheitsschädliche UV-B-Strahlung. Ozon (O<sub>3</sub>) ist ein Spurengas mit einer mittleren Konzentration von ca. 30 ppbv (=0,03 ppmv) in Bodennähe und 10 ppmv in der Stratosphäre. 90 % des Gesamt ozons befinden sich in der Stratosphäre und nur 10 % in der Troposphäre (Abb. 5.16).

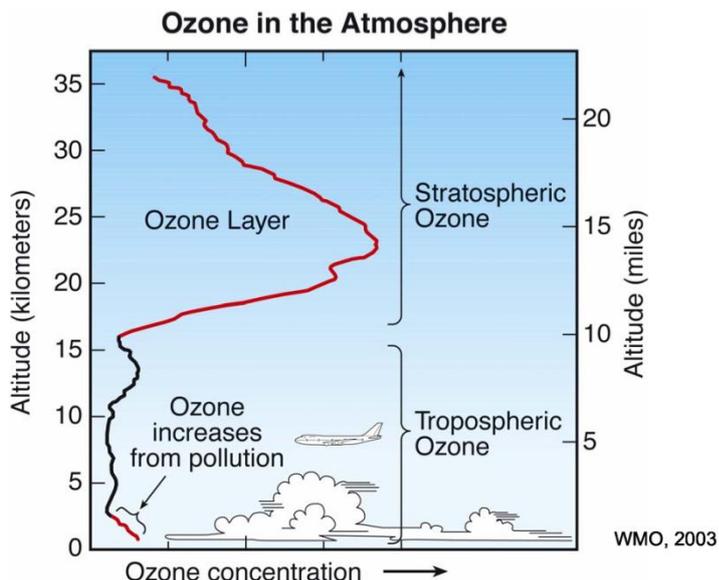


Abb. 5.16: Schematische Darstellung der vertikalen Verteilung des Ozons in der Tropo- und Stratosphäre (WMO 2003)

Ein Teil des troposphärischen Ozons (ca. 15 %) wird von der Stratosphäre hereingetragen, der Rest (60 – 85 %) wird durch chemische Reaktionen in der Troposphäre erzeugt (Isaksen 2009). Ozon entsteht durch photolytische Oxidation von Kohlendioxid, Methan und Kohlenwasserstoffen in Gegenwart von NO<sub>x</sub> und hat eine atmosphärische Lebensdauer in der Troposphäre von Stunden bis Tagen (22 Tage, Isaksen 2009). Die NO<sub>x</sub>-Konzentration in der Atmosphäre hat den größten Einfluss auf die Ozonbildung (Isaksen 2009). Bei diesen Reaktionen entsteht das für die Oxidationskraft der Atmosphäre („Selbstreinigung“) wichtige OH-Radikal.

Die globale jährliche Ozonbeladung der Troposphäre wird im AR4 (IPCC 2007) mit 340 Mio. t (Tg) angegeben. Die Ozonkonzentration hat sich nach Messungen an einigen Stationen in der Nordhemisphäre im 20. Jahrhundert gegenüber dem vorindustriellen Wert verdoppelt (Isaksen 2009), nach Lelieveld 2004 hat sie um mindestens 25 % zugenommen. Auch in den vergangenen 30 Jahren wurde in den Industriestaaten mit Ausnahme Kanadas eine Zunahme des Ozons gemessen. Ein nordhemisphärischer Ozon-Langzeittrend lässt aufgrund der starken saisonalen und regionalen Schwankungen kein einheitliches Bild erkennen. Nach Angaben des DWD haben Jahreswerte in der Nordhemisphäre zwischen 1975 und 1999 von 31 auf 40 ppb zugenommen (UBA 2003). In der Stratosphäre war dagegen eine deutliche Abnahme zu verzeichnen. Am Hohenpeißenberg wurde in der Stratosphäre eine Abnahme von 16 % seit 1967 gemessen (seit 1992 leichte Zunahme) und in der Troposphäre eine Zunahme von 30 % (jedoch leichter Rückgang seit ca. 1990) (Fricke 2001, Gilge 2007). In der Stratosphäre hat sich seit 1996 der Trend verlangsamt, bzw. ist an einigen Stationen ein Anstieg des Ozons gemessen worden (Steinbrecht 2006).

Das bodennahe Ozon hat über alle Messstationen in Deutschland im Zeitraum 1990-2007 leicht zugenommen. Ab 2000 war mit Ausnahme des Jahres 2003 mit dem Extremsommer praktisch nach Messungen des UBA kein Anstieg festzustellen (Abb. 5.17).

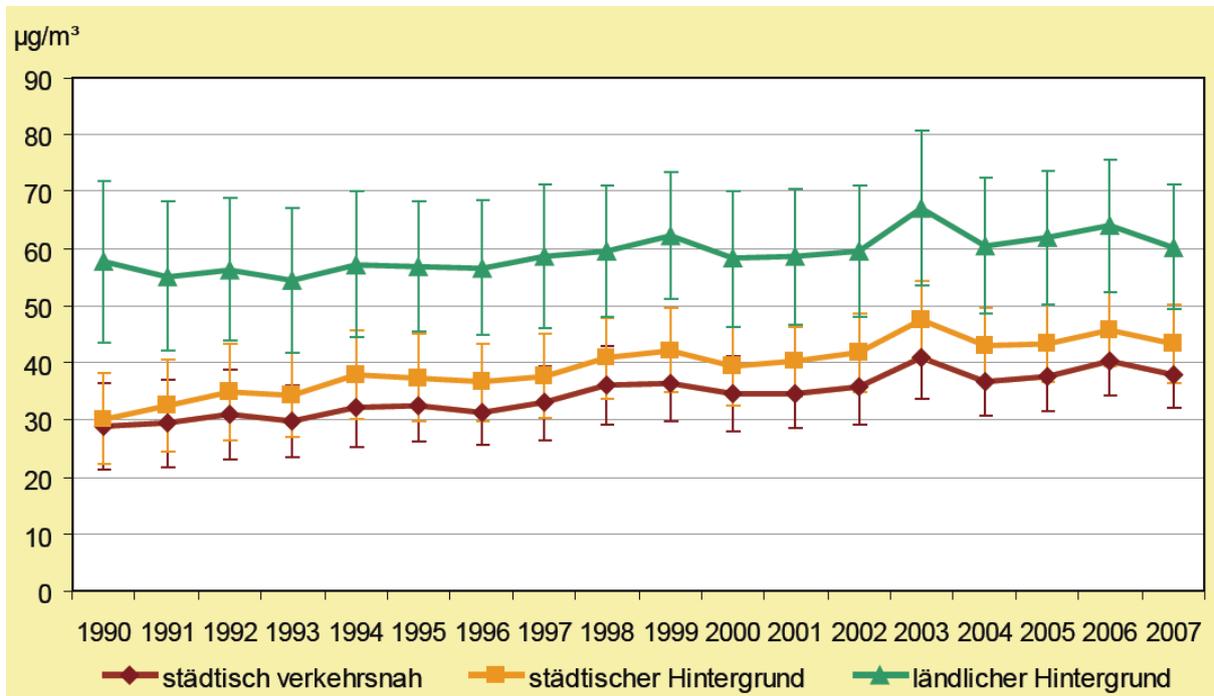


Abb. 5.17: Entwicklung der Ozonjahresmittelwerte in Deutschland im Zeitraum 1990 – 2007 an verschiedenen Messstationen in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Umweltdaten 2009, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3760.pdf>)

Die verschiedenen internationalen Abkommen von 1987 (Montreal) bis 1999 (Beijing) zur Verminderung der ozonerstörenden Substanzen haben erreicht, dass ein Rückgang der FCKW inzwischen gemessen werden kann. Damit kann auch erwartet werden, dass langfristig der Ozonabbau in der Stratosphäre gestoppt wird und sich die Ozonschicht bis 2050 erholt.

### 5.1.6 F-Gase und Halogenkohlenwasserstoffe (FKW, FCKW, HFKW)

F-Gase sind die im Kyoto-Protokoll aufgeführten fluorierten Treibhausgase, die die teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW, HCFC), die Stoffgruppe der voll- oder perfluorierten Kohlenwasserstoffe (FKW, PFC) und Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) (s. Kap. 5.1.8) umfassen. Als Ersatz für die ozonerstörenden FCKWs wurden diese chlorfreien Ersatzstoffe – HFKW und FKW - Anfang der 90'er Jahre eingeführt. Die HFKW und FKW sind Kohlenwasserstoffe mit Fluor (F) und „nur“ am Treibhauseffekt beteiligt.

Halokarbone ist ein Oberbegriff für Kohlenstoffhaltige Verbindungen, die Halogene (Cl, Br, F, J) und teilweise Wasserstoff enthalten. Halogenkohlenwasserstoffe (v.a. FCKW, HFCKW) ist ein Überbegriff für Kohlenstoffverbindungen, die eine oder mehrere Halogene enthalten, z.B. Fluor, Chlor, Brom, Jod. FCKW sind Kohlenwasserstoffe, bei denen Wasserstoffatome durch die Halogene Chlor beziehungsweise Fluor ersetzt wurden. Unter HFCKW versteht man teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe, deren Wasserstoffatome nur teilweise durch Chlor- und Fluoratome ersetzt sind. Sie besitzen ein weitaus geringeres Ozonabbaupotenzial als die FCKW, ihr Treibhauspotenzial liegt ebenfalls weit unter dem der FCKW. Sie haben trotz ihrer geringen Konzentration im ppt- Bereich zweierlei Wirkung: In der Stratosphäre schädigen sie die Ozonschicht (Ozon Depleting Substances, ODS), und in der Troposphäre tragen sie zur Erwärmung bei. Als einziges Treibhausgas sind sie ausschließlich anthropogenen Ursprungs und wurden in den vergangenen Jahrzehnten in der Industrie wegen ihrer Unbrennbarkeit und Ungiftigkeit zu verschiedenen Zwecken eingesetzt, z.B. als Treibgas in Sprühdosen, zum Aufblähen von Schäumen, als Kühlmittel in Eisschränken und in Klimaanlageanlagen, sowie als Reinigungsmittel für Textilien und in elektronischen Bauteilen. Aufgrund ihrer ozonzerstörenden Eigenschaften in der Stratosphäre wurde die Verwendung der Halogenkohlenwasserstoffe in mehreren internationalen Vereinbarungen (Montreal Protokoll 1987, London 1990, Kopenhagen 1993, Beijing 1997) immer stärker eingeschränkt.

Da die FCKWs chemisch inert sind - sie reagieren nicht mit anderen Stoffen - verbleiben sie sehr lange (teilweise mehr als 1000 Jahre) in der Atmosphäre. Die HFKW und FKW haben aufgrund ihrer relativ starken Infrarot-Absorption und ihrer langen atmosphärischen Lebensdauer von bis zu 14 000 Jahren ein extrem hohes Treibhauspotential. Es variiert für die wichtigsten fluorierten Gase zwischen 140 und 7 000 bei den HFKW und zwischen 6 000 und 9 000 bei den FKW. Damit sind sie nach  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  mit einem geschätzten Anteil von 12 % am anthropogenen Treibhauseffekt das dritt wichtigste Treibhausgas (WMO 2010). Neben dieser Erwärmungswirkung haben sie durch die Ozonzerstörung in der Stratosphäre einen indirekten abkühlenden Effekt. Die Ozonzerstörung führt in der Stratosphäre zu einer deutlichen Abkühlung, die auch die Troposphäre beeinflusst (s. Kap. 6.3).

In einem Special Report des IPCC 2005 wird der indirekte Strahlungsantrieb auf  $-0,15 \pm 0,10 \text{ W/m}^2$  geschätzt. Dieser negative Strahlungsantrieb ist kleiner als der positive direkte Strahlungsantrieb in Höhe von  $0,34 \pm 0,03 \text{ W/m}^2$  (IPCC 2007).

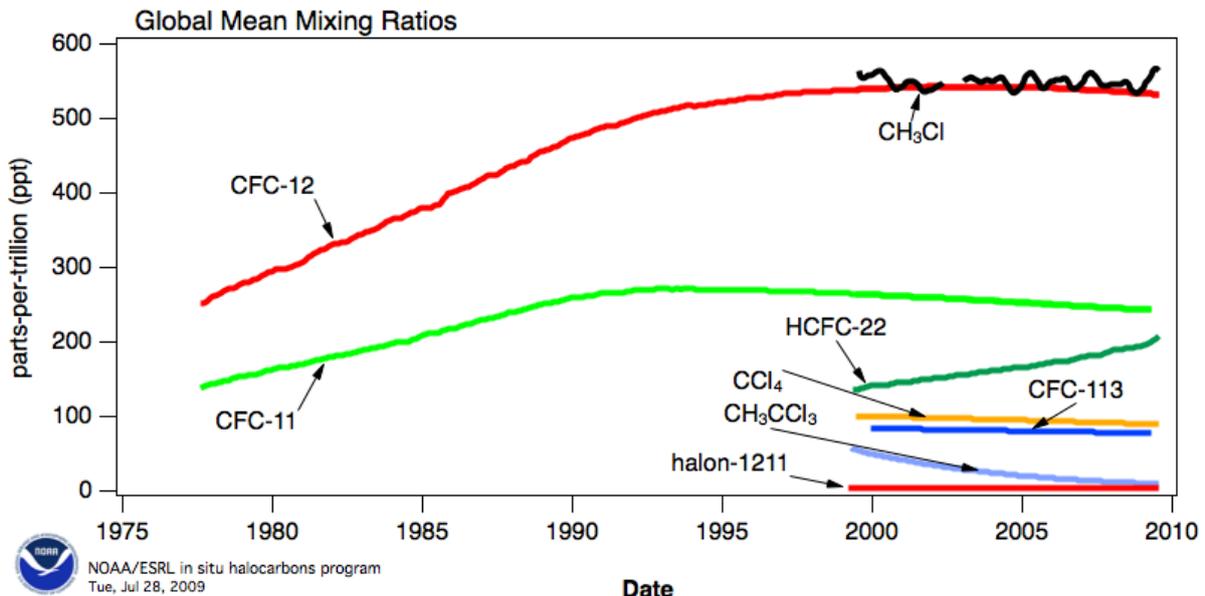


Abb. 5.18: Entwicklung der Halokarbone 1977 – 2008 (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/hats/>)

Seit Beginn der 40er Jahre wurde bis in die neunziger Jahre ein Anstieg der FCKWs in der Atmosphäre gemessen. Danach begann ein Rückgang bzw. eine Verlangsamung des Zuwachses der vollhalogenierten FCKWs (CFC-11,12) (Abb. 5.18), die weniger kritischen Er-

satzstoffe (HFKW – teilhalogenierte FCKWs (HCFC) mit einem geringeren Treibhauspotential) nehmen immer noch deutlich zu - seit 1997 um den Faktor 4 – 8 (*WMO 2010*).

Weltweit ging der Einsatz von FCKW um über 90 % zurück. In Deutschland werden praktisch keine FCKW mehr eingesetzt; die HFKW als Ersatz der FCKW in Treibmitteln für Schaumstoffe und Kältemittel haben von 1995 bis 2007 von 2 683 t auf 6 992 t (dies entspricht 11,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten) zugenommen. Die FCKW-Emission ging dagegen durch Emissionsminderungsmaßnahmen in der Aluminium-Produktion im gleichen Zeitraum von 256 t auf 74 t (0,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente) zurück (*Schwarz 2009*).

Die Kyoto F-Gase hatten 2006 einen Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen von 1,6 % (*UBA 2009*). Ihr Anteil an den Treibhausgasemissionen (CO<sub>2eq</sub>) in Deutschland beträgt ca. 1 %.

### 5.1.7 Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>)

SF<sub>6</sub> ist chemisch außerordentlich stabil, die mittlere atmosphärische Lebensdauer beträgt 3200 Jahre (*Arndt 2010*). Außerdem hat es ein sehr hohes Treibhausgaspotential von 23 900. Schwefelhexafluorid kommt praktisch nicht natürlich in der Atmosphäre vor. Weltweit steigen die Konzentrationen in der Atmosphäre an (1995: 3,5 ppt, 2008: 8,5 ppt; (*WMO 2010*)).

Emissionen gibt es nur aufgrund der industriellen Produktion. SF<sub>6</sub> wird v.a. als Funkenlöschgas in Hochspannungsschaltanlagen, als Autoreifenfüllungen, als Isoliergas bei Wärmeschutzfenstern und bei der Aluminium- und Elektronikproduktion verwendet. Aufgrund von Leckagen gelangen geringe Mengen in die Atmosphäre. Die SF<sub>6</sub>-Konzentration in der Atmosphäre betrug im Jahre 2009 6,76 ppt (*Arndt 2010*) und steigt seit einigen Jahren um 0,2 ppt pro Jahr an (<http://www.noaa.gov/stories/2005/s2512.htm>). Weltweit wurden im Jahr 2000 etwa 6 000 t emittiert. Nach EDGAR nahm die SF<sub>6</sub> Emission 1970 - 2005 um den Faktor 5 von 1 000 t auf 5 000 t zu ([http://edgar.jrc.ec.europa.eu/part\\_SF6.php](http://edgar.jrc.ec.europa.eu/part_SF6.php)). In Deutschland wurden die SF<sub>6</sub>-Emissionen 1995 – 2007 von 303 t auf 230 t (7 237 t CO<sub>2eq</sub> auf 5 533 t CO<sub>2eq</sub>) vermindert (*Schwarz 2009*, s. auch Kap. 10.9). Ihr Beitrag zu den Treibhausgasemissionen ist auch unter Berücksichtigung des hohen Treibhauspotentials mit ca. 0,4 % gering.

### 5.1.8 Indirekte, ozonbildende Treibhausgase

Nachfolgend werden solche Stoffe aufgeführt, deren Emissionen den atmosphärischen Ozon- und Methanhaushalt beeinflussen (indirekte Treibhausgase: NO<sub>x</sub>, NMVOC, CO). Die chemischen Wechselwirkungen in der Atmosphäre sind sehr komplex. So wirkt sich z.B. eine NO<sub>x</sub>-Abnahme allein anders auf den Strahlungshaushalt aus als ein Rückgang aller indirekten Treibhausgase (*Naik 2005*).

#### 5.1.8.1 Stickoxide (NO<sub>x</sub>) ohne Distickstoffoxid

Stickoxide (NO<sub>x</sub>, v.a. NO und NO<sub>2</sub>) sind keine direkten Treibhausgase, aber sie haben eine Schlüsselrolle in der komplexen Atmosphärenchemie (*Monks 2009*), die zur Oxidation des OH-Radikals führt, das wiederum die Konzentration von Methan, Kohlenmonoxid und FCKWs in der Atmosphäre beeinflusst. Außerdem trägt NO<sub>x</sub> durch photochemische Prozesse zur Ozonbildung in der Troposphäre bei. NO<sub>x</sub> wird durch Umwandlung in Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) und nasse Deposition aus der Atmosphäre entfernt. NO<sub>x</sub> hat eine kurze Lebensdauer von bis zu einem Tag. NO<sub>2</sub> absorbiert Solarstrahlung und trägt somit zum Strahlungsantrieb bei. Eine erste Abschätzung aufgrund der NO<sub>2</sub>-Änderung ergibt global einen Strahlungsantrieb von 0,04 W/m<sup>2</sup>. Regional in Industriegebieten werden höhere Werte beobachtet (*Kvalevåg 2007, Isaksen 2009*).

Die atmosphärische NO<sub>x</sub>-Konzentration ist weltweit sehr ungleich verteilt (0 – 40 ppb). Die räumliche Verteilung und zeitliche Entwicklung wurde im Rahmen des Forschungsprojektes GOME mit Hilfe von Satellitendaten untersucht. Hierbei wurde seit 1996 eine starke Zunahme der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre über den industrialisierten Regionen Chi-

nas, eine deutliche Abnahme über Europa und unterschiedliche Entwicklungen über verschiedenen Teilen der USA festgestellt (*IPCC 2007, Isaksen 2009*).

### NO<sub>x</sub>-Emissionen

Quellen für die NO<sub>x</sub>-Emissionen sind die Verbrennung fossiler Brennstoffe, die Biomasseverbrennung, Blitze und Böden. Der Anteil der Stickoxide aus Gewittern wird auf  $5 \pm 3$  Tg N geschätzt (*Monks 2009*). Satellitenmessungen ergaben global ca. 44 Blitze je Sekunde, die im Mittel durch die hohe Energie der Blitze aus dem Sauerstoff und Stickstoff der Luft  $15 \times 10^{25}$  NO Moleküle je Blitz erzeugen (*Monks 2009*). Anthropogene NO<sub>x</sub>-Emissionen bei der Energieumwandlung entstehen im Wesentlichen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, insbesondere aus Straßen- und Luftverkehr, sowie aus Feuerungen aller Art. Weiterhin sind Emissionen aus Salpetersäure-Anlagen (Verbrennung von Ammoniak) sowie aus der Produktion und der Anwendung von stickstoffhaltigen Düngemitteln von Bedeutung.

Im AR4 (*IPCC 2007*) wurden folgende Abschätzungen der globalen Emissionen zugrunde gelegt: 41.8 – 47.1 Mio. t (Tg) N/Jahr (89 – 100 Mio. t NO<sub>2</sub>), davon Verbrennung fossiler Brennstoffe 25,6, Biomasseverbrennung 5,9, Landwirtschaft 1,6, Böden 7,3, Blitze 1,1 – 6,4 Mio. t. Nach *Cofala 2009* betragen die anthropogenen NO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2007 81 Mio. t. Während die NO<sub>x</sub> Emission in Europa um ca. 40 % (EU-27, 1990:16 915 Gt, 2008: 10 333 Gt (*EEA 2010*)) zurückging, ist in Asien ein starker Anstieg zu verzeichnen (*Isaksen 2009*)(Abb.5.19)

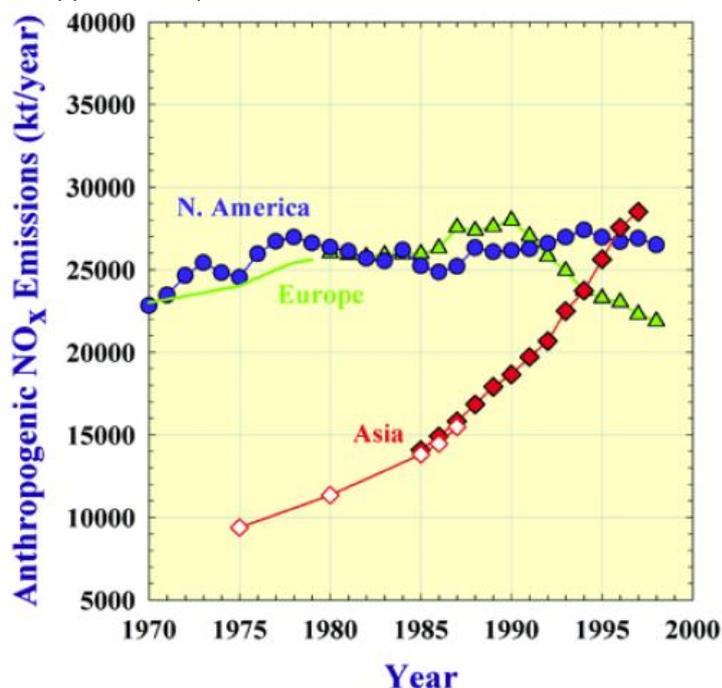


Abb.5.19 : Entwicklung der anthropogenen NO<sub>x</sub> Emissionen seit 1970. In Europa ist ein Rückgang zu verzeichnen und in Asien ein starker Anstieg (*Isaksen 2009*)

Die deutschen Gesamtfrachten an NO<sub>x</sub> betragen im Jahr 1990 ca. 6 % der weltweiten anthropogenen NO<sub>x</sub>-Emissionen. Im Zeitraum 1990 – 2008 wurden die Emissionen von 2,9 Mio. t auf 1,4 Mio. t um über die Hälfte verringert (*NIR 2010*)(Abb. 5.5) (s. auch Kap. 10.6).

#### 5.1.8.2 Organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC)<sup>1)</sup>

VOC sind flüchtige organische Verbindungen, wie z. B. Toluol oder Benzol. In der Atmosphäre bilden sie in Gegenwart von Stickoxiden und Sonnenlicht das Treibhausgas Ozon. Außerdem hemmen sie noch über ihre Reaktionen mit OH-Radikalen den Abbau der direkten Treibhausgase wie Methan und verringern damit die Selbstreinigungskraft der Atmosphäre. Bestimmte VOC bilden Aerosolpartikel, die wiederum Strahlung streuen oder absorbieren und die Wolkenbildung beeinflussen (*Plaß-Dülmer, 2005*).

<sup>1)</sup> NMVOC = Non Methane Volatile Organic Compounds

## NMVOC-Emissionen

NMVOC sind flüchtige Kohlenstoffverbindungen (ohne Methan), die insbesondere bei einer unvollständigen Verbrennung entstehen. Sie stammen aus Kraftfahrzeugverkehr, Industrie, Heizungsanlagen, chemischen Produktionsprozessen (Raffinerien, Chemieanlagen) und werden darüber hinaus auch bei der Verdampfung von Lösemitteln frei. Natürlich werden sie v.a. als Terpene und Isoprene von Laub- und Nadelbäumen in großen Mengen - 2/3 der globalen Emission - emittiert.

Für den TAR (*IPCC 2001*, keine Angaben im AR4) wurden folgende Abschätzungen der globalen Emissionen zugrunde gelegt: Gesamt 571 Mio. t (Tg) VOC/Jahr, davon aus fossiler Verbrennung 161, Biomasseverbrennung 33, Vegetation 377 (Isoprene, Terpene, Azeton). *Monks 2009* gibt für Isopren eine Gesamtemission von ca. 500 Mio. t (Tg) C pro Jahr an und weist auf die noch vorhandenen großen Unsicherheiten hin. Anthropogene und biogene Quellen tragen in Mitteleuropa zu etwa gleichen Teilen zum VOC-Vorkommen in der unteren Troposphäre bei (*Plaß-Dülmer 2005*). In Europa (EU-27) wurde 1990 – 2008 die NMVOC Emission von 18,3 Mio. t auf 9,3 Mio. t nahezu halbiert (*EEA 2010*). In Deutschland wurden die NMVOC Emissionen im Zeitraum 1990 – 2008 von 3,8 Mio. t auf 1,3 Mio. t um ca. 70 % verringert (*NIR 2010*)(s. auch Kap. 10.7). Dies ist v.a. auf den Einsatz des Katalysators in Kraftfahrzeugen und die Verringerung des Lösemittelanteils in Farben, Lacken und Klebstoffen, usw. zurückzuführen (*UBA 2009*).

### 5.1.8.3 Kohlenmonoxid (CO)

Kohlenmonoxid ist das bedeutendste indirekte Treibhausgas, da es in der Troposphäre zur Ozonbildung beiträgt. Hauptsenke ist die Oxidation des CO durch das OH-Radikal zu CO<sub>2</sub>, das OH-Radikal steht dann nicht mehr zum Abbau von Treibhausgasen wie Methan zur Verfügung. Die mittlere Verweilzeit in der Atmosphäre beträgt 3 – 4 Monate. CO mindert aufgrund der genannten Eigenschaften die Selbstreinigungskraft der Atmosphäre und trägt damit indirekt zum Treibhauseffekt bei.

Seit den 50'er Jahren wurde bis Mitte der 80'er Jahre eine Zunahme des atmosphärischen CO-Gehaltes von 0,3 bis 1 % pro Jahr beobachtet. Danach stagnierte er in etwa mit einer regional sehr unterschiedlichen Ausprägung und ging ab 1998 leicht zurück. Verschiedene Ursachen werden hierfür diskutiert: Abnahme der Biomasseverbrennung, Zunahme der OH-Radikalkonzentrationen infolge der Ausdünnung der Ozonschicht und der damit verbundenen Zunahme der UV-Strahlung sowie die Verminderung der anthropogenen Emissionen durch wirksame Emissionsminderungstechniken (*Gilge 2001*). Die mittlere globale Konzentration in der Atmosphäre betrug 2002 98 ppm und 2009 mit 80 ppb 18 ppb weniger (*WMO 2010*) (Abb.5.19). Jahre mit großen Waldbränden haben die CO Zunahme erhöht.

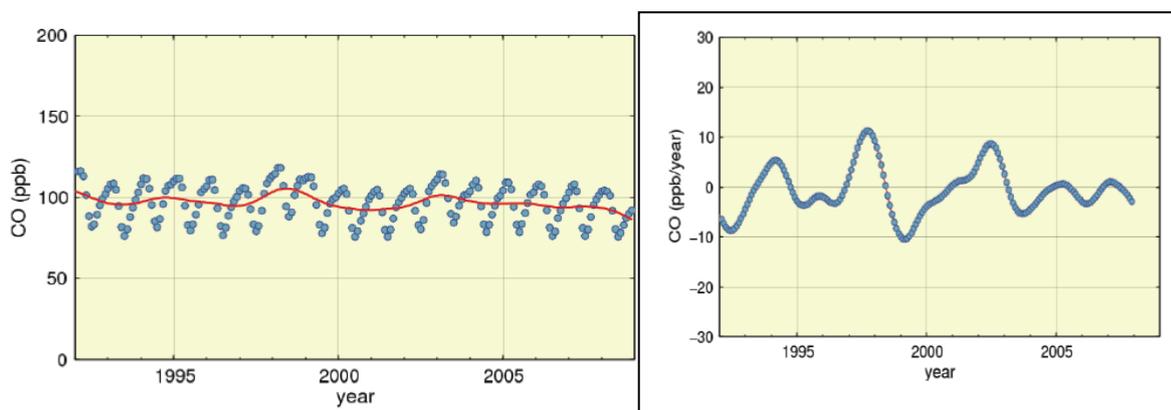


Abb. 5.19: Globale mittlere CO-Konzentration (98 ppb) und Zuwachsrate 1992 – 2008 (*WMO 2010*)

## CO-Emissionen

CO hat sowohl natürliche als auch anthropogene Quellen. Global sind die Oxidation von Methan und die Verbrennung von Biomasse wichtige direkte Quellen. Hierzu zählen auch die Wald- und Torfbrände, wie z.B. in Russland im August 2010. Die Abschätzungen des globalen CO-Budgets (in Tg CO/Jahr) nach *IPCC 2001* schwanken je nach Autor sehr stark; für den TAR wurden folgende Werte zugrunde gelegt: Gesamt 2,8 Mrd. t CO/Jahr, davon 1,2 Mrd. t CO/Jahr durch Oxidation in der Atmosphäre (Methan 800 Mio. t) Isoprene (270 Mio. t.), NMHC (140 Mio. t), Azeton (20 Mio. t)) und direkte Emission 1,55 Mrd. t CO/Jahr, davon Vegetation 150 Mio. t, Ozean 50 Mio. t, Biomasse-Verbrennung 700 Mio. t, Verbrennung fossiler Brennstoffe 650 Mio. t. Die *IIASA 2006* gibt für 2000 470 Mio. t CO-Emission durch Verbrennung fossiler Brennstoffe an.

Der Einsatz fossiler Brennstoffe (Verkehr, Industrie, Heizung) – insbesondere bei unvollständiger Verbrennung - ist in der Nordhemisphäre eine etwa gleich starke Quelle. In Europa (EU-27) wurde die CO-Emission 1990 – 2008 mehr als halbiert. In Deutschland wurde sie im gleichen Zeitraum um ca. 2/3 vermindert (*NIR 2010*) (Abb. 5.5) (s. auch Kap. 10.8).

## 5.2 Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)

Schwefeldioxid ist als Vorläufersubstanz der Sulfataerosole ein wichtiges troposphärisches Spurengas. Das Sulfataerosol bildet sich durch Oxidation von SO<sub>2</sub> während einer photochemischen Gas-Partikel-Umwandlung. Da das Sulfataerosol zu den „streuenden Aerosolen“ gehört, wirkt es dem Treibhauseffekt entgegen und hat deswegen einen erheblichen Einfluss auf die Klimaentwicklung.

Quellen von SO<sub>2</sub> (insgesamt 113 Mio. t) sind vor allem die Verbrennung fossiler Brennstoffe (65 %) und die Biomasseverbrennung (2 %), sowie in geringerem Maße Vulkane (8 %) und die Oxidation von Dimethylsulfid (DMS) aus den Ozeanen (26 %) (*Koch 2007*). Die anthropogenen Hauptemittenten sind die Kraftwerke, industrielle Großfeuerungsanlagen, Hausbrand und Verkehr (Abb. 5.20). Nach der Waldschadensdiskussion in den 80'er Jahren (Stichwort: saurer Regen) wurden die Emissionen sehr stark - in Deutschland um knapp 90% reduziert (*NIR 2010*) (s. auch Kap. 10.10). Die Immissionen sind entsprechend in den meisten Industriestaaten ebenfalls deutlich zurückgegangen. Auch in den Reinluft-Messstationen in Deutschland (z.B. Hohenpeißenberg) hat sich die SO<sub>2</sub>-Konzentration 1995 – 2008 nochmals halbiert ([www.dwd.de](http://www.dwd.de)). In den asiatischen Schwellenländern sind aufgrund der zunehmenden Industrialisierung deutliche Anstiege festzustellen.

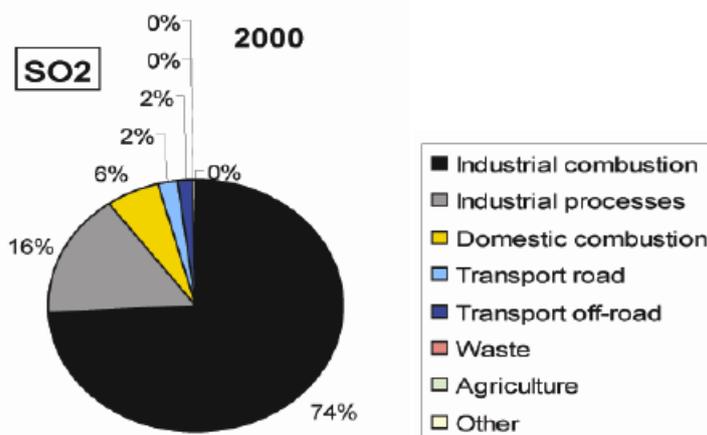


Abb. 5.20: Herkunft des anthropogenen SO<sub>2</sub> im Jahr 2000, Energieversorgung hat 90 % Anteil, Haushalt 6 % und 4 % der Verkehr (*Isaksen 2009*)

Das Nettoergebnis dieser regionalen Zu- und Abnahmen führt zu einer Unsicherheit, ob die globalen Emissionen zu- oder abgenommen haben (*Boucher 2002, IPCC 2007*). Nach *Koch 2007* wird nur ein Teil (1/3 bis 1/2) der SO<sub>2</sub> Emissionen von Südostasien und Europa zu Sulfat umgewandelt, da in der Atmosphäre nur eine begrenzte Menge von Oxidantien, die das SO<sub>2</sub> in Sulfat umwandeln kann, vorhanden ist.

### 5.3 Aerosole

In den vergangenen Jahren haben die Aerosole in der Klimadiskussion eine immer größere Bedeutung gewonnen. Während man noch vor 20 Jahren praktisch nur vom Einfluss der Treibhausgase auf das Klima gesprochen hat, sind im zweiten IPCC-Bericht 1995 die Sulfataerosole ins Spiel gebracht worden, die die nach der Theorie beobachtete zu geringe Erwärmung der Atmosphäre erklären sollten.

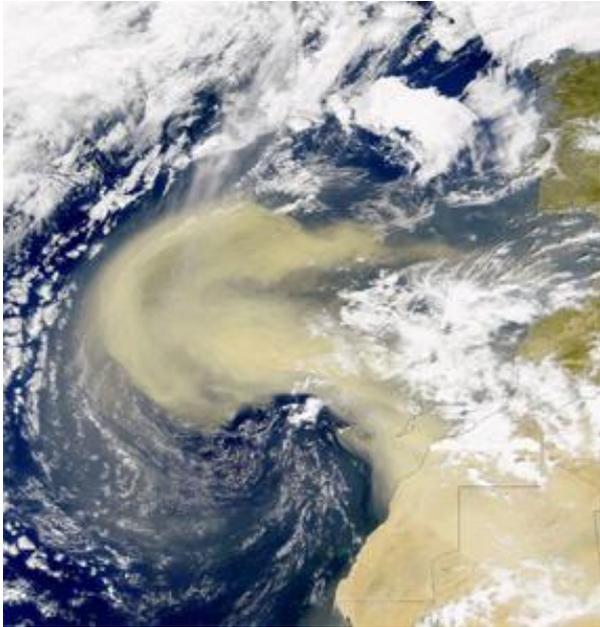


Abb. 5.21: Saharastaub über Nordwestafrika und dem Atlantik am 26.02.2000, beobachtet durch den SeaWiFS-Satellit (NASA) (<http://www.tropos.de/PHYSIK/fernerkundung/projekte/samum.html#samum1>). Jährlich werden bis zu 1,5 Mrd. t Wüstenstaub in die Troposphäre transportiert; 60 % davon stammen aus der Sahara.

Nach und nach wurden eine ganze Reihe weiterer natürlicher und anthropogener Aerosole entdeckt, die direkt oder indirekt einen Einfluss auf das Klima haben können. In Abb. 5.22 ist oben die gesamte Emission von Sulfat, Ruß (BC), Organische Partikel (POM), Staub und Meersalz, sowie die mittlere Verweilzeit in Atmosphäre (einige Tage) angegeben und unten die Emissionsmengen aus der Biomasse-, flüssiger Biobrennstoff- und fossile Brennstoffverbrennung für 1750 und 2000 angegeben. Die Unsicherheit bei den Abschätzungen über die Aerosolemissionen sind immer noch sehr hoch (*IPCC 2007*). Im Vergleich zum TAR wurden die Werte von Ruß und organisches Material aus fossiler Verbrennung deutlich reduziert (*Dentener 2006, Andreae 2008*).

Aerosol Type	Total source <sup>1</sup> (Tg/yr <sup>1</sup> )	Lifetime (day)	Mass loading <sup>1</sup> (Tg)	Optical depth @ 550 nm
	Median (Range)	Median (Range)	Median (Range)	Median (Range)
Sulfate <sup>2</sup>	190 (100-230)	4.1 (2.6-5.4)	2.0 (0.9-2.7)	0.034 (0.015-0.051)
BC	11 (8-20)	6.5 (5.3-15)	0.2 (0.05-0.5)	0.004 (0.002-0.009)
POM <sup>2</sup>	100 (50-140)	6.2 (4.3-11)	1.8 (0.5-2.6)	0.019 (0.006-0.030)
Dust	1600 (700-4000)	4.0 (1.3-7)	20 (5-30)	0.032 (0.012-0.054)
Sea salt	6000 (2000-120000)	0.4 (0.03-1.1)	6 (3-13)	0.030 (0.020-0.067)
<b>Total</b>				<b>0.13 (0.065-0.15)</b>

Source	Species*	Emission# 2000 (Tg/yr)	Emission 1750 (Tg/yr)
Biomass burning	BC	3.1	1.03
	POM	34.7	12.8
	S	4.1	1.46
Biofuel	BC	1.6	0.39
	POM	9.1	1.56
	S	9.6	0.12
Fossil fuel	BC	3.0	
	POM	3.2	
	S	98.9	

Abb.5.22: (oben) Geschätzte Quellstärke, Lebensdauer, Masseninhalt in der Atmosphäre und optische Dichte der wichtigsten Aerosoltypen. Die Statistiken basieren auf 16 Modellen, die im AeroCom Projekt überprüft wurden. BC = Ruß, POM = Organische Partikel, (unten) Anthropogene Emissionen von Aerosolen und Vorläufersubstanzen 2000 und 1750, \*S = Schwefel, (Quelle: <http://downloads.climate-science.gov/sap/sap2-3/sap2-3-final-report-all.pdf>)

Den größten Beitrag zu den Aerosolen in der Atmosphäre leisten die natürlichen Primärpartikel aus windgetriebenen Quellen (*Andreae 2008*), wie Seesalz und Mineralstaub (Abb. 5.21 - 5.22). Von den - neueren Angaben zufolge - 5 Mrd. t natürliche mineralische Aerosole sind 1,5 Mrd. t Wüstenstaub; 60 % davon stammen aus der Sahara (<http://www.dlr.de/ipa>). Bei der Aerosol optischen Dicke (AOD) - der atmosphärischen Trübung, - steht die organische Materie an erster Stelle, gefolgt von Meersalz, Staub und Sulfataerosolen (Abb. 5.23) (*Arndt 2010*). Obwohl Ruß nur eine relativ geringe optische Dicke hat, hat es einen erheblichen Einfluss auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre.

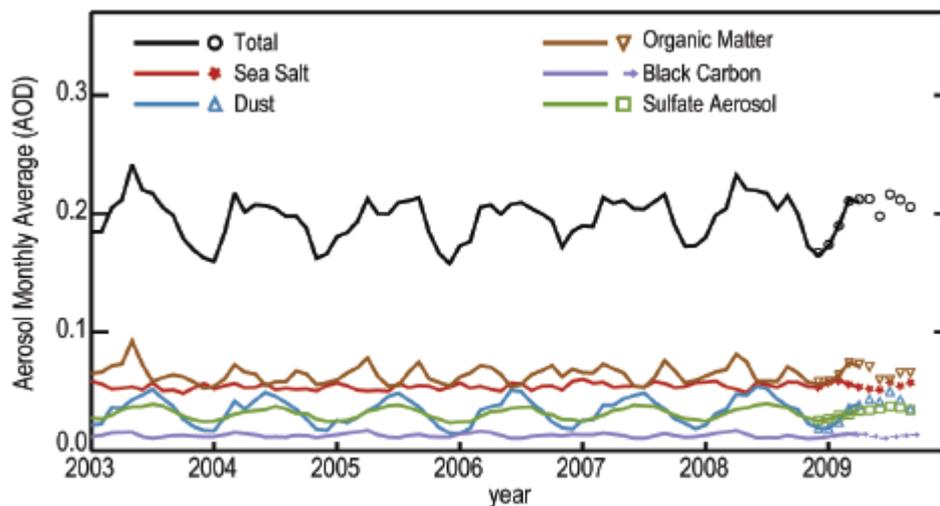


Abb.5.23: Entwicklung der Aerosolkonzentrationen in der Atmosphäre 2003 – 2009, gemessen als optische Dicke bei 550 nm, Gesamtmenge und Einzelbeiträge von Meersalz, Staub, organische Materie, Schwarzer Kohlenstoff (Ruß) und Sulfat-Aerosole (*Arndt 2010*)

Mit satellitengestützten Sensoren lässt sich die globale Verteilung von anthropogen verursachten Aerosolen anhand der Messung der optischen Dicke (AOD) heute sehr gut bestimmen (Abb. 5.24).

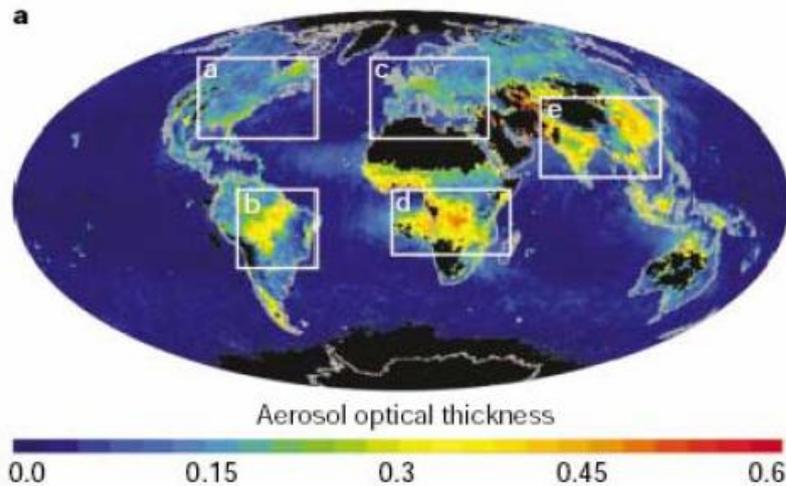


Abb. 5.24: Globale Verteilung von anthropogenen Aerosolen, Messung der optischen Dicke durch Satellitenaufnahmen; a, c, e: v.a. städtische Gebiete, b, d: Gebiete mit Biomasseverbrennung (Solomon 2005)

Mit großen, international angelegten Forschungsprogrammen, wie dem Indoex-Experiment im indischen Ozean, wurden die regionalen Auswirkungen der Aerosole auf das Klima untersucht (Ramanathan 2001, 2005, 2007).

### Entstehung wichtiger direkter und indirekter Aerosole

**Staubaerosole:** Primäraerosole  
**Sulfataerosole:** Sekundäraerosole  
**Schwefeldioxid:** Vorläuferstoffe

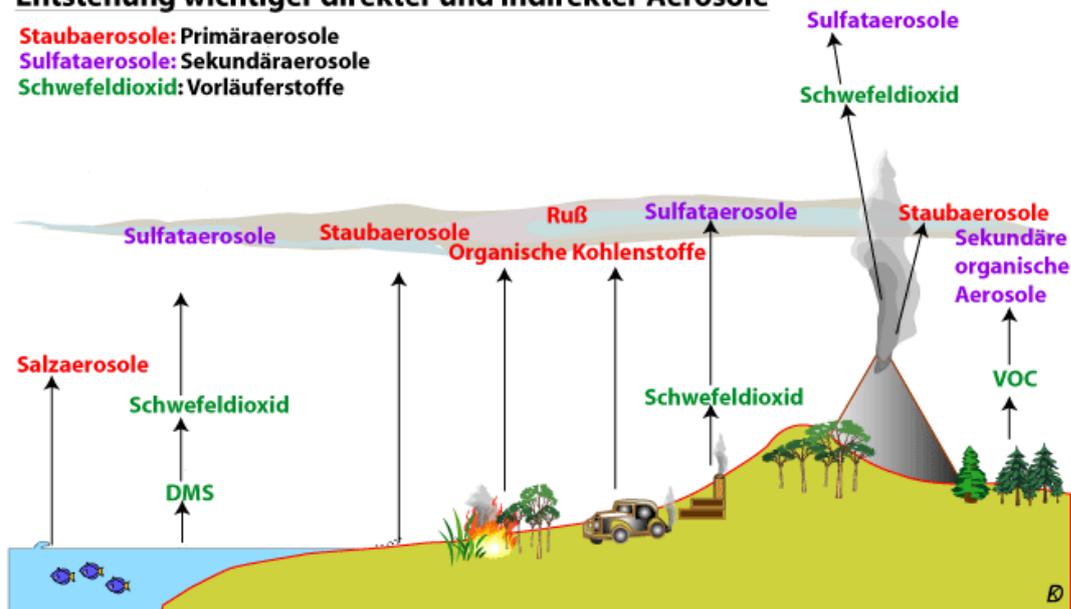


Abb. 5.25: Aerosole: wichtige Prozesse der Entstehung, Umwandlung und Entfernung aus der Atmosphäre (Kasang, HBS 2005)

**Entstehung der Aerosole:** Aerosole werden entweder direkt in die Atmosphäre eingetragen (Primäraerosole) oder entstehen durch chemische Prozesse aus Vorläuferstoffen (Sekundäraerosole) (Abb. 5.25). Aerosole sind kleine, in der Luft schwebende feste oder flüssige Teilchen mit einem Durchmesser von kleiner  $10\ \mu\text{m}$  (jedoch kein Wasser oder Eis) und können durch natürliche Vorgänge wie Wind oder Vulkanausbrüche bzw. Verbrennung fossiler Brennstoffe oder Biomasse in die Atmosphäre gelangen. Die Aerosole verändern sich in der Atmosphäre, lagern sich zusammen (koagulieren), wandeln sich chemisch um und bilden Kondensationskeime von Wolkentröpfchen und Eiskristallen. Die atmosphärische Verweilzeit ist kurz und beträgt Stunden bis zu einigen Tagen. Dann werden sie ausgewaschen bzw.

trocken abgelagert. Wenn diese Partikel durch Flugzeugabgase oder Vulkanausbrüche in die Stratosphäre gelangen, ist ihre Lebensdauer mit 1 bis 3 Jahren deutlich länger. Die schnellen Änderungen der Aerosole in der Troposphäre machen ihre Erforschung besonders schwierig.

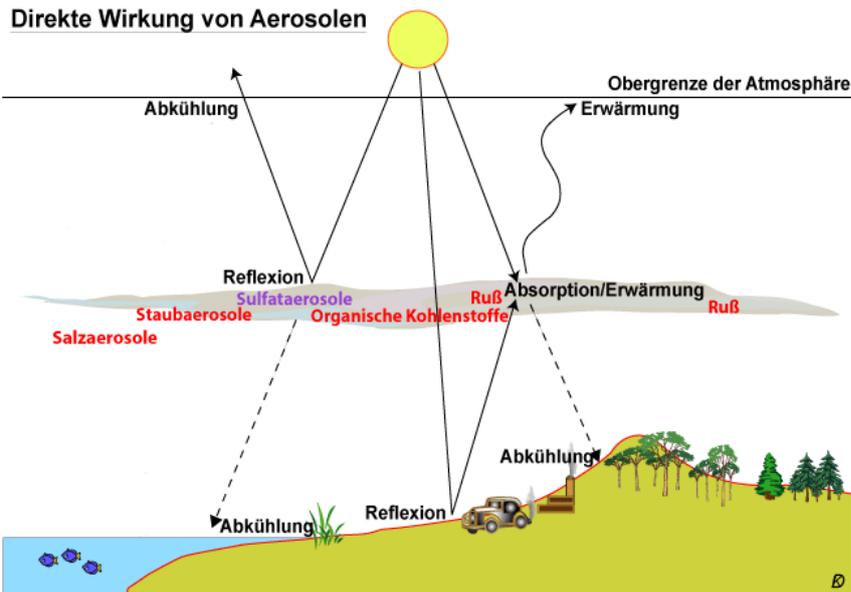


Abb. 5.26 : Die direkte Wirkung von Aerosolen durch Reflexion und Absorption (Kasang, HBS 2005)

**Wirkung der Aerosole:** Grundsätzlich wird ein direkter und indirekter Einfluss von Aerosolen auf den Strahlungshaushalt und das Klima unterschieden. Die direkte Wirkung ergibt sich aus der Streuung und Absorption der einfallenden Solarstrahlung an den Aerosolen (vor allem den Sulfatpartikeln) in den Weltraum und der damit verbundenen abkühlenden Wirkung (Abb. 5.26).

Boucher 2002 hat die direkte Strahlungswirkung für Sulfataerosole für das Jahr 1990 berechnet und für die Industriezentren in Mitteleuropa, China und USA einen negativen Strahlungsantrieb von bis zu  $3 \text{ W/m}^2$  gefunden (Abb. 5.27).

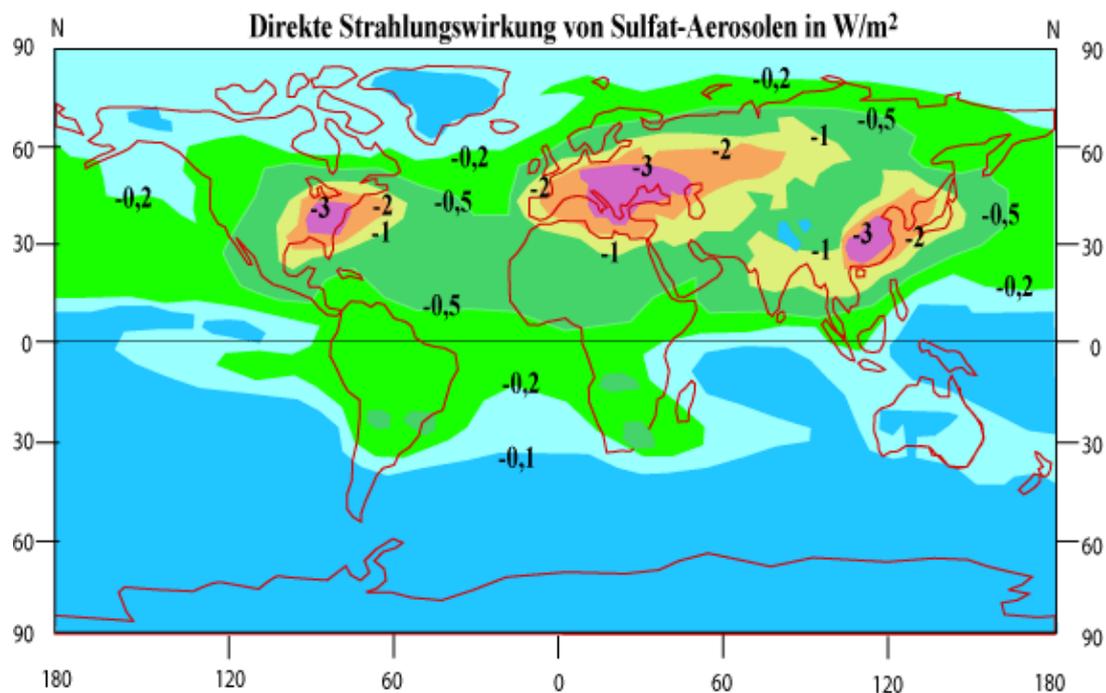


Abb. 5.27: Die direkte Strahlungswirkung von Sulfat-Aerosolen für das Jahr 1990 gegenüber 1850 (Kasang, HBS 2005, verändert nach Boucher 2002)

Auch Rußpartikel und einige andere Aerosole haben eine abkühlende Wirkung, da sie die solare Strahlung absorbieren und damit zwar die umgebende Luft erwärmen, aber die bodennahen Luftschichten abkühlen. Der Strahlungsantrieb für Rußpartikel (BC) wird von *Ramanathan 2009* mit  $0,9 \text{ W/m}^2$  angegeben und ergibt sich aus der Differenz der solaren Erwärmung in der Atmosphäre ( $2,6 \text{ W/m}^2$ ) und der verminderten Strahlung an der Erdoberfläche ( $-1,7 \text{ W/m}^2$ ).

Nach *IPCC 2007* beträgt der direkte anthropogene Beitrag zum Strahlungsantrieb  $-0,5$  ( $-0,9$  -  $-0,1$ )  $\text{W/m}^2$ . Der große Unsicherheitsbereich zeigt die noch vorhandenen großen Unsicherheiten bei der Berechnung des Strahlungsantriebs der Aerosole. Auch die nicht ausreichend bekannte dreidimensionale Verteilung jeder Aerosolart in der Atmosphäre und ihre zeitliche Entwicklung ist eine weitere Unsicherheitsquelle.

Die indirekte Wirkung der Aerosole (Abb. 5.28) ergibt sich aus ihrem Einfluss auf die Wolkenbildung und den Niederschlag. Insbesondere bilden sie Kondensationskeime für die Bildung von Wolkenröpfchen und Eiskristallen (Effekt: Abkühlung, z. T. Erwärmung). Dadurch kommt es zu einer Veränderung der mikrophysikalischen und optischen Eigenschaften der Wolken. Außerdem wird bei einer höheren Anzahl von Kondensationskeimen die Tröpfchengröße verringert, was eine Verringerung der Niederschläge und Verlängerung der Wolkenlebensdauer zur Folge hat. Hinzu kommt noch eine semidirekte Wirkung durch die Wolkenauflösung infolge der Aufheizung der absorbierenden Rußpartikel; damit wird eine größere Durchlässigkeit der Atmosphäre für die Solarstrahlung erreicht (Erwärmung). Die Unsicherheiten sind bei diesen Effekten noch sehr groß, deswegen werden auch für ihren Strahlungsantrieb sehr große Bandbreiten angegeben. Die Wolkenauflösung durch Rußpartikel wurde z. B. über dem indischen Ozean und auch bei Waldbränden am Amazonas beobachtet (*IPCC 2007*). Nach *Isaksen 2009* sind in den vergangenen Jahren einige Fortschritte bei der Bestimmung des Strahlungsantriebs der Aerosole gemacht worden und einige Unsicherheiten konnten reduziert werden. Andererseits wurden auch neue Effekte, wie der indirekte Aerosoleffekt in warmen bzw. kalten Wolken identifiziert, die jedoch noch hohe Unsicherheiten aufweisen.

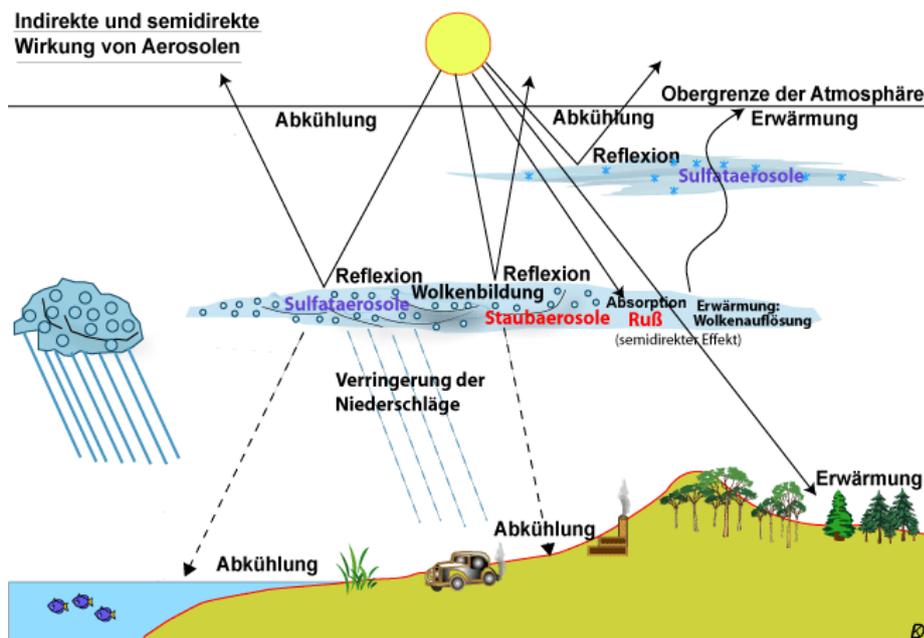


Abb. 5.28: Indirekte und semiindirekte Wirkung von Aerosolen und ihr Einfluss auf die Wolkenbildung ( HBS 2005)

Eine eindeutige Wirkung hat Ruß (BC = Black Carbon) bei Ablagerungen auf Schnee und Eisflächen. Ruß absorbiert die Solarstrahlung und heizt sich dabei auf, die Reflexion der – ursprünglich – hellen Flächen vermindert sich. Dieser Effekt lässt Gletscher und Schnee schneller abschmelzen. Im *IPCC 2007* wird dieser Effekt mit einem Strahlungsantrieb (RF) auf Schnee von  $+0,10 \pm 0,10 \text{ W m}^{-2}$ , mit einem „geringen Grad des Verständnisses“ angenommen. *Shindell 2009* hat berechnet, dass etwa 45 % des Temperaturanstiegs in der Arktis

(ca. 1,5° C) auf diesen Effekt zurückzuführen ist. Angaben über den indirekten Effekt durch Aerosole schwanken in der Fachliteratur (*IPCC 2007*) sehr stark zwischen -1,8 und -0,3 W/m<sup>2</sup>, (Mittelwert -0,5 W/m<sup>2</sup>).

Die Unsicherheit bezüglich des indirekten Aerosol-Effektes ist damit um Mehrfaches größer als die vieler anderer Effekte zusammen. Diese Ergebnisse beruhen im Wesentlichen auf Simulationen mit globalen Modellen, so dass versucht wird, mit Daten globaler Fernerkundung die größeren Unsicherheiten einzugrenzen. In der Tat hat die Fernerkundung mit Hilfe von Satelliten von Wolken- und Aerosoleigenschaften im letzten Jahrzehnt erhebliche Fortschritte gemacht. Neue Satelliten mit verbesserten Sensoren und innovativen Messmethoden ergeben genauere Werte der Zusammensetzung der Atmosphäre. Allerdings müssen die bei der Interpretation dieser Daten zu Grunde gelegten Annahmen und Einschränkungen genau überprüft und berücksichtigt werden.

Unabhängige Berechnungen vom Hamburger MPI (*Kinne 2008*) mit einem neuen Aerosol-Datensatz, der sich an genaue Beobachtungsdaten bodengestützter Messungen anlehnt, zusätzlichen Satellitendaten für Wolken und Erdoberflächenreflektivität und Modellabschätzungen für Höhe und anthropogenen Anteil kleiner Aerosole resultieren in einem globalen jährlichen Mittel von -0,2 W/m<sup>2</sup> für den direkten Effekt. Dieser stimmt mit dem Mittel in der globalen Modellierung recht gut überein. Der Unsicherheitsbereich konnte auf -0,4 W/m<sup>2</sup> bis -0,0 W/m<sup>2</sup> abgeschätzt werden. Allerdings darf der relative kleine Wert nicht darüber hinwegtäuschen, dass es auf regionaler Basis sehr viel größere Aerosol-Effekte gibt, und dieser relative kleine Globalwert nur durch Aufsummierung großer Werte unterschiedlichen Vorzeichens entsteht. Die globale klimatische Wirkung wird durch Modellrechnungen, u.a. vom Hamburger Max-Planck-Institut, zu bestimmen versucht. Danach sollen im Zeitraum 1860 bis 1985 die Aerosole eine mittlere globale Abkühlung von 0,9 °C hervorgerufen haben. Abb. 5.29 zeigt die berechnete räumliche Verteilung für Mitte der 80er Jahre im Vergleich zum vorindustriellen Wert. Die Abkühlung ist am stärksten auf der Nordhalbkugel. Die deutlichen Effekte in den Polargebieten und Sibirien sind durch den Schnee-Albedo-Effekt verursacht (*IPCC 2007*).

Die Rolle der Aerosole mit einem regional extrem hohen negativen Strahlungsantrieb von -20 ± 4 W/m<sup>2</sup> an der Erdoberfläche und einer Erwärmung der unteren Atmosphäre wurde auch in dem internationalen INDOEX-Experiment (*Ramanathan 2001, 2005*) nachgewiesen. Mit drei unbemannten, etwa zwei Meter großen Messflugzeugen analysierte *Ramanathan 2007* auf 18 Flügen im Frühjahr 2006 über dem Indischen Ozean den Einfluss der Aerosole, darunter vor allem Ruß, auf die Erwärmung dieser Schichten. Stärker als bisher gedacht, absorbiert Ruß dabei Sonnenlicht und gibt daraufhin Wärme an die Luft ab. Der direkte Vergleich zwischen einem wolkenfreien und einem mit dunklen Abgaswolken bedeckten Himmel lässt deutliche Schlüsse auf den wärmenden Einfluss der so genannten „atmosphärischen dunklen Wolken“ (ABC = Atmospheric Brown Clouds, Wolken mit Ruß, Sulfat und anderen Aerosolen) zu. Mit ihren Messdaten wurden die Klimasimulation für die Region (CCM3) verfeinert. Diese zeigte, dass die Aerosol-reichen Wolken in etwa genauso viel zum Temperaturanstieg der unteren Atmosphäre in der Region betrogen wie der klassische Treibhauseffekt durch Kohlendioxid. Beide Effekte zusammen seien für eine Erwärmung von 0,25 Kelvin pro Dekade verantwortlich. Diese „ABC“ Wolken bedecken dabei weite Teile des nördlichen Indischen Ozeans, des Golf von Bengalens und des Arabischen Meers und verstärken auch die Gletscherschmelze am Himalaya. Folge hiervon ist eine Abschwächung des Monsuns in Indien und Verschiebung der Regengebiete in Südasien.

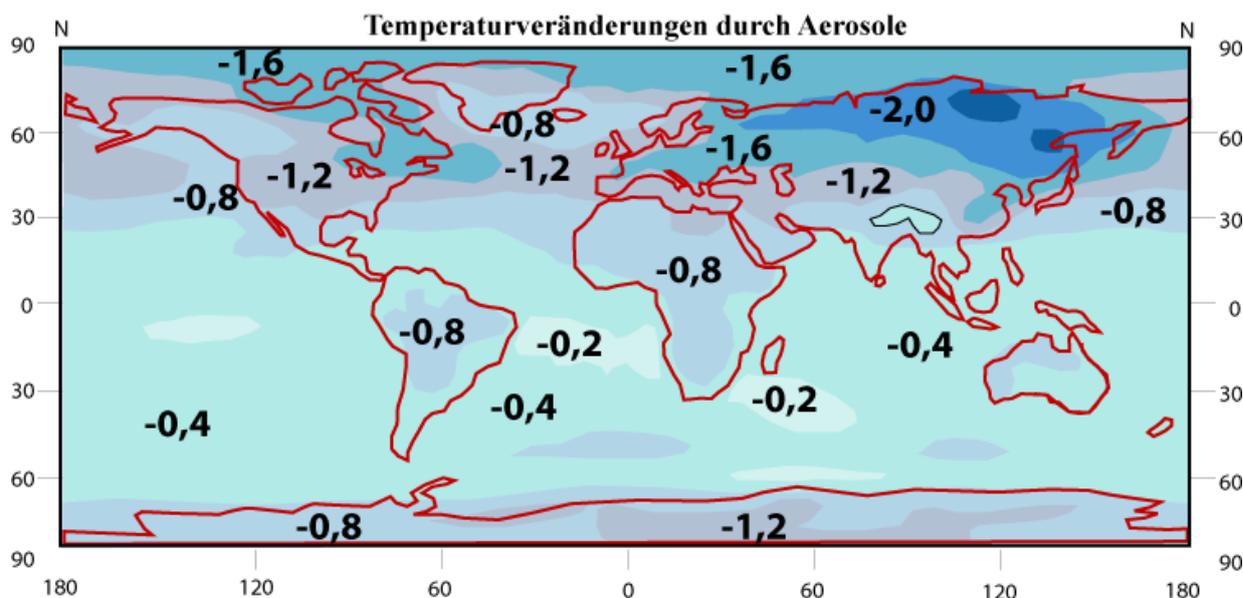


Abb. 5.29: Veränderung der mittleren bodennahen Temperatur Mitte der 80er Jahre im Vergleich zum vorindustriellen Wert durch anthropogene Aerosole (direkter und indirekter Effekt) nach einer Modellrechnung des Hamburger MPI (verändert nach Feichter 2004, HBS, Kasang 2005)

Ein weiteres Phänomen war die vor einigen Jahren entdeckte Abnahme der Sonneneinstrahlung am Boden („**global dimming**“) von den 60er zu den 80er Jahren um etwa  $7 \text{ W/m}^2$  oder 4 % - 6 % im globalen Mittel. Inzwischen ist seit den 90er Jahren in einigen Teilen der Erde wie Europa und USA wieder eine Erhöhung der solaren Einstrahlung gemessen worden (**global brightening**) (IPCC 2007). Wang 2009 berichtet, dass die Sichtbarkeit bei klarem Himmel beinahe überall im Zeitraum 1973 – 2007 zurückgegangen ist, mit Ausnahme von Europa, wo sie wieder zugenommen hat. Der Trend von Nordamerikanischen Stationen ist relativ flach. Im gleichen Zeitraum konnte nach Satellitenauswertungen ein Anstieg der Aerosole in der Atmosphäre gemessen werden. Der stärkste Verdunkelungseffekt wurde über Ost- und Südasiens festgestellt, was sich auf die rasante regionale Industrialisierung zurückführen lässt, die weitgehend auf fossilen Energieträgern wie Kohle und Erdöl beruht. Ruckstuhl 2008 zeigt, dass in Europa die Aerosolkonzentrationen seit 1980 um ca. 60 % abgenommen haben. Wild 2009 zeigt in einem Übersichtsartikel den Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse hierzu auf. Danach war bereits 1920 – 1940 eine Erhöhung der solaren Einstrahlung festzustellen, was zu einer globalen Temperaturerhöhung geführt hat. Nach von Andreae 2005 durchgeführten Modellrechnungen würde die Klimaerwärmung im 21. Jahrhundert noch viel stärker ausfallen, wenn die anthropogenen Aerosole nicht mehr emittiert würden. Brasseur 2005 zeigt auf, dass nach einem hypothetischen Stopp der Verbrennung fossiler Brennstoffe aufgrund des Wegfalls der Maskierung des Treibhauseffekts durch die kühlenden Aerosol-Effekte die globale Mitteltemperatur innerhalb weniger Jahre um bis zu 1 K ansteigen würde. Ruckstuhl 2009 weist nach, dass Modellrechnungen die Änderung der Solareinstrahlung über Europa nachvollziehen können, wenn auch der Zeitraum aufgrund ungenügender Angaben zur zeitlichen Entwicklung der Aerosolkonzentrationen nicht korrekt dargestellt wird.

#### 5.4 Landnutzungsänderungen

Landnutzungsänderungen werden durch Entwaldung, Aufforstung, Bewässerung und Verstädterung verursacht. Knapp ein Drittel (31 %) der Landoberfläche ist mit Wäldern bedeckt. Der Nettoverlust der Waldfläche durch Abholzung und Wiederaufforstung wird für 2000 – 2009 auf 13 Mio. ha/Jahr geschätzt gegenüber 16 Mio. ha/Jahr in den 1990er Jahren (FRA 2010). Die größten Abholzungen finden in Brasilien, Afrika und Indonesien statt, jedoch deutlich weniger als in den 1990er Jahren. Die hohen Verluste in Australien sind auf die extreme Trockenheit und Waldbrände zurückzuführen. Die Nettoverluste an Waldfläche wurden durch Aufforstung (v.a. in China) und natürliche Ausdehnung von Wäldern von - 8,3 Mio. ha/Jahr in den 1990er Jahren auf -5,2 Mio. ha/Jahr seit 2000 reduziert. (FRA 2010)(Abb. 5.30).

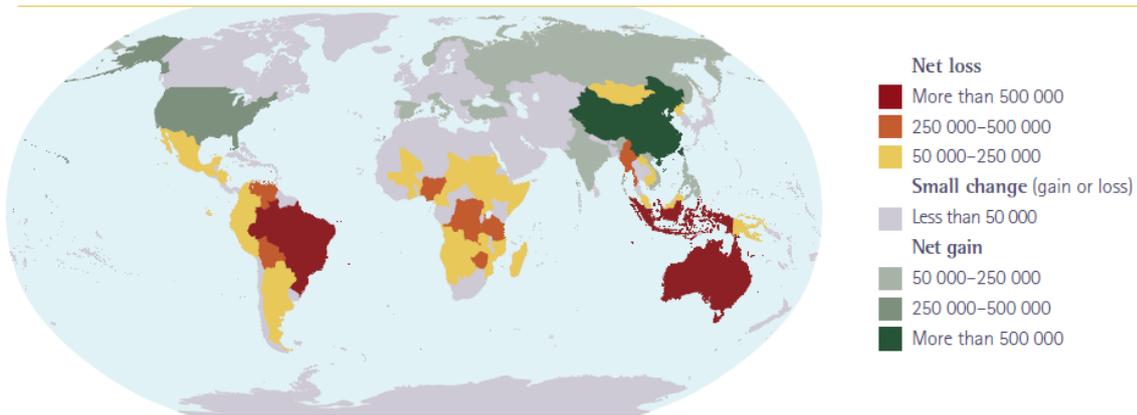
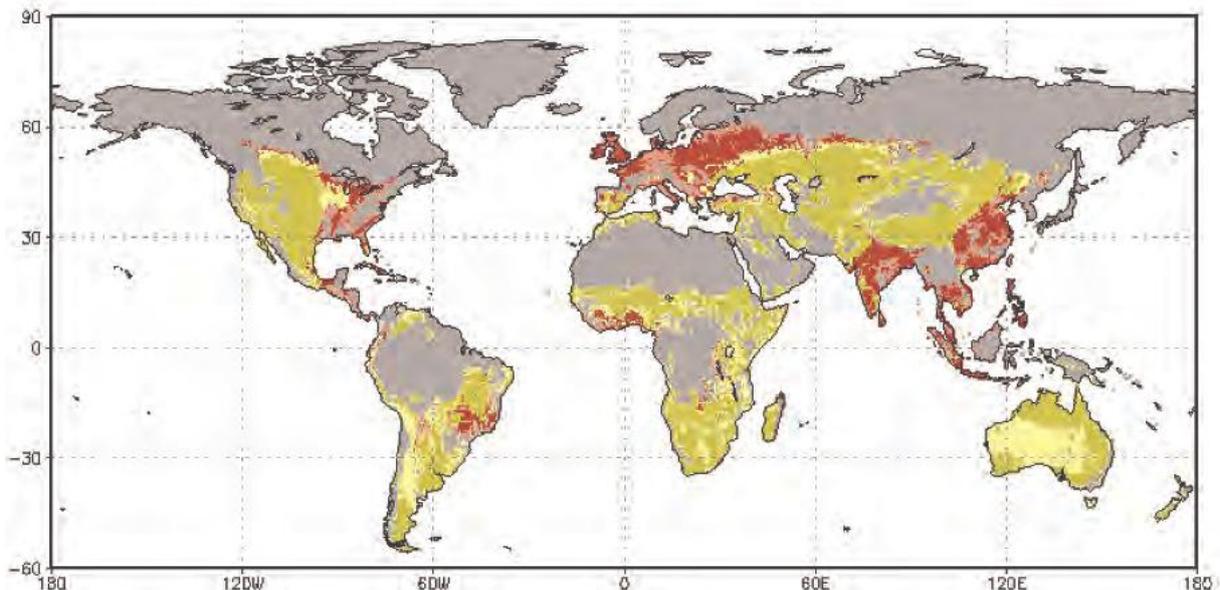


Abb.5.30: Nettoänderung der Waldflächen der Länder, 2005 – 2010 (ha/Jahr), starke Verluste in Südamerika und Ozeanien (Indonesien, Australien), Zuwächse in Asien (China durch Aufforstung) und USA (FRA 2010)

In den vergangenen Jahren wurde verstärkt diskutiert, inwieweit die seit Jahrtausenden vorgenommenen Landnutzungsänderungen einen Einfluss auf unser Klima haben (Pielke 2005, Liess 2004, Pongratz 2008, 2009) (Abb. 5.31). Am bekanntesten ist das großflächige Abholzen oder Abbrennen von Waldbeständen. Rund 1/3 bis die Hälfte unserer Erdoberfläche sind Abschätzungen zufolge hiervon betroffen (Claussen 2003). Nach Pongratz 2009 entstanden ein Drittel des bis heute durch Landnutzung freigesetzten Kohlenstoffs bereits in den Jahren 800 bis 1850. Diese 53 Gt der bis heute 161 Gigatonnen Kohlenstoff, die durch Ackerbau und Rodung freigesetzt wurden, konnten schon damals die Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflussen und haben den  $\text{CO}_2$ -Gehalt um 5–6 ppm (netto) erhöht.



### Reduktion der natürlichen Vegetation der letzten 1200 Jahre



Abb. 5.30: Änderung der Landnutzung (Wald, Gras- und Strauchland) seit 1800, (Pongratz 2008, Vortrag Claussen 2008)

Die Landnutzung verändert auch die Struktur der Oberfläche; landwirtschaftliche Flächen sind in vielen Fällen heller als Waldflächen und zeigen auch ein anderes Verdunstungsverhalten. Nach Claussen 2003, ergibt sich im globalen Mittel eine leichte Abkühlung, und zwar vor allem aufgrund der Zunahme des Reflexionsvermögens solarer Strahlung. Das wird auch durch Modellrechnungen von Pongratz 2008 bestätigt. Die Änderung des Strahlungsantriebs durch Änderung der Albedo wird für die vorindustrielle Zeit auf  $0,05 \text{ W/m}^2$  berechnet.

Neben der Änderung der Struktur der Landoberfläche trägt die Landnutzung durch die Brandrodung auch zur CO<sub>2</sub>- und Rußemission bei. Landnutzungsänderungen können auf zahlreiche klimarelevante Faktoren wie Emissionen von Staub, Ruß und Treibhausgasen, Albedo- und Strahlungsbilanzänderung an der Erdoberfläche, sowie die Änderung des Verdunstungsverhaltens einen Einfluss haben und sind deswegen noch nicht im Detail in den Klimamodellen berücksichtigt (*BASC 2005*). Global gesehen gleicht sich die Verringerung der Verdunstung durch die Entwaldung mit der Verdunstungszunahme durch Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen in etwa aus. Regionale Unterschiede haben jedoch einen erheblichen Klimaeinfluss (*Gordon 2005*).

Durch Modellrechnungen konnten die großräumigen Auswirkungen der Abholzungen im Mittelmeerraum und im Amazonasgebiet nachvollzogen werden. Als Extremfolge entsteht eine Wüstenlandschaft im Mittelmeerraum und eine Steppenlandschaft im Amazonasgebiet (*Liess 2004*).

Wie *Rotenberg 2010* nachweist, können Aufforstungen auch zu einer Temperaturerhöhung führen, da Waldflächen eine geringere Albedo haben als abgeholzte Flächen. Statt der vorherigen hellen Flächen, die einen großen Teil des eingestrahnten Sonnenlichts wieder reflektieren, dominieren dunklere Flächen, welche die Strahlung in Form von Wärmeenergie speichern und damit zumindest regional die Durchschnittstemperaturen erhöhen. Umgekehrt hat nach *Rotenberg 2010* die Entwaldung die verstärkte Albedo der Solarstrahlung umgerechnet um etwa ein Fünftel unserer CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgewogen und damit die anthropogene Erwärmung entsprechend vermindert.

## 6 Klimabeobachtungen

Seit etwa 1850 gibt es für große Teile der Erdoberfläche Messungen des Luftdrucks und der Temperatur. Die Zahl der Messstellen wurde ständig erweitert und mit Hilfe von Schiffen und Bojen auch auf die Meeresoberfläche ausgedehnt (Abb. 6.1). Seit Beginn der Satellitenmessungen hat sich die Datenflut gewaltig erhöht. In einem globalen Messverbund der meteorologischen, hydrologischen und ozeanographischen Dienste stehen lange Zeitreihen allen Interessierten zur Verfügung. Das GCOS, Global Climate Observing System wurde hierfür von der WMO eingerichtet (<http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/>).

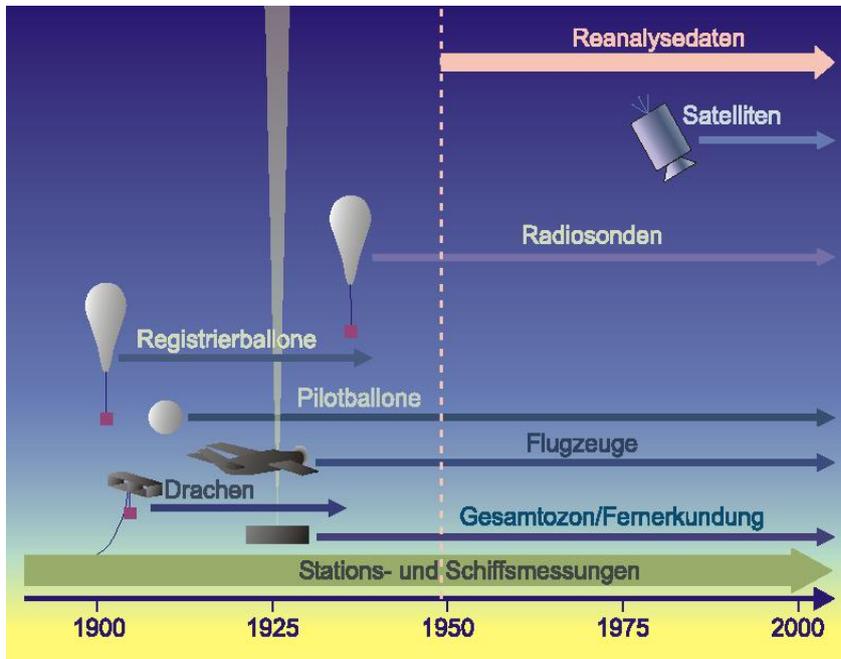


Abb. 6.1: Entwicklung der Erfassung meteorologischer Daten seit Beginn der Instrumentenmessung (Brönnimann 2005)

Die Satellitenklimatologie hat einen rasanten Aufstieg genommen. 1959 wurde der erste Satellit mit einem Radiometer an Bord gestartet. Inzwischen sind rund 20 000 Satelliten auf verschiedene Erdumlaufbahnen gebracht worden. Neben in ca. 850 km Höhe polarumlaufenden Wettersatelliten umkreisen zahlreiche geostationäre Satelliten (z.B. der europäische Meteosat) in 36 000 km Höhe die Erde und erfassen dabei regelmäßig jeden Punkt der Erde. Anfang 2010 waren etwa 943 Nutzsatelliten die Erde (<http://www.ucsusa.org/>).

Satelliten werden etwa seit Anfang der 70er Jahre im größeren Umfang als Plattform für verschiedenste Instrumente – je nach Fragestellung – zur Erdbeobachtung eingesetzt. Abb. 6.2 zeigt das globale Satellitenbeobachtungssystem der WMO 2009. Satelliten messen das Strahlungsfeld der Erde mit Hilfe von hochauflösenden Sensoren, die das elektromagnetische Spektrum analysieren. Gemessen wird die von der Erde und Atmosphäre absorbierte, reflektierte oder emittierte Strahlung. Neben der emittierten und reflektierten Sonnenstrahlung werden Niederschlag, Aerosole, Feuchte, Solarkonstante, Temperatur am Boden und in der Atmosphäre, Ozonsäule, Luftzusammensetzung, Bewölkung, Schnee- und Eisbedeckung mit immer größerer Genauigkeit gemessen. Das gilt auch für die globale Verteilung und den Transport von Spurengasen und Aerosolen in der Atmosphäre. So überwacht seit 2002 SCIAMACHY – ein Absorptionsspektrometer an Bord des europäischen ENVISAT-Satelliten – die Konzentration und die räumliche Verteilung von Spurengasen wie  $\text{NO}_x$ , Ozon,  $\text{CH}_4$ , CO und  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre (<http://www.sciamachy.de/>).

Je nachdem, ob beispielsweise die Beobachtung der Vegetation, der Verteilung der Wolken, der Gase in der Atmosphäre oder aber die Bestimmung der Temperatur der Meeresoberfläche von Interesse ist, werden verschiedene Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums verwendet und die Instrumente entsprechend ausgelegt und geeicht. So wird der für das menschliche Auge sichtbare Bereich des Lichts (etwa 0,4 Mikrometer (violett) – 0,7 Mikrometer (rot)) häufig zur Analyse des globalen Wettergeschehens verwendet. Messungen

im kürzerwelligen ultravioletten und längerwelligen infraroten Spektrum dienen häufig zur Beobachtung von atmosphärischen Spurengasen. Sehr viel größere Wellenlängen im Bereich von etwa 3 Zentimeter – 25 Zentimeter werden von Radarsensoren in Satelliten (z.B. TerraSAR-X) zur Abtastung etwa des Reliefs der Erdoberfläche benutzt. ([http://wdc.dlr.de/news\\_features/docs/aspekte\\_der\\_satellitengestuetzten\\_umweltbeobachtung.pdf](http://wdc.dlr.de/news_features/docs/aspekte_der_satellitengestuetzten_umweltbeobachtung.pdf))



Abb. 6.2: Das globale WMO Satellitenbeobachtungssystem 2009. Die geostationären Satelliten in 36 000 km Höhe und die Satelliten mit polarer Umlaufbahn in ca. 800 km Höhe, dienen der Umwelt- und Klimabeobachtung ([http://www.wmo.int/pages/publications/bulletin\\_en/59\\_1\\_mohren.html](http://www.wmo.int/pages/publications/bulletin_en/59_1_mohren.html))

Hochauflösende Radarsatelliten (CryoSat 2), die z.B. die Eisdicke mit einer Genauigkeit von 1 – 3 cm messen können, bestimmen heute präzise die Veränderungen der Eisflächen der Erde (<http://www.cryosat.de/>). Seit 2002 kartiert das Satellitenpaar GRACE das Schwerfeld der Erde mit nie dagewesener Präzision, so werden damit auch Eismassenbilanzen z.B. Grönlands erstellt (<http://www.csr.utexas.edu/grace/>). 2010 wurde die erfolgreiche, gemeinsame Mission der NASA und der DLR bis 2015 verlängert.

Anhand der Satellitenbeobachtungen (Abb. 6.2) wurden in den letzten Jahrzehnten eine Reihe grundlegender Klimaeigenschaften der Erde und auch Hinweise auf Klimatrends gefunden. Satellitendaten dienen inzwischen auch dazu, Aussagen von Klimamodellen zu überprüfen. Die Auswertung von Satellitendaten mithilfe zahlreicher Messinstrumente gehört heute zu den wichtigsten Hilfsmitteln der Wettervorhersage, Umweltüberwachung und Klimaforschung ([http://www.esa.int/esaCP/SEM09Q11ZE\\_Germany\\_0.html](http://www.esa.int/esaCP/SEM09Q11ZE_Germany_0.html)).

## 6.1 Temperaturentwicklung in Bodennähe

Die Berechnung der globalen mittleren Temperatur wird nach einem aufwändigen, statistischen Verfahren vorgenommen (Brohan 2006). Ausgewertet werden homogenisierte, qualitätskontrollierte, monatliche Durchschnittsdaten von Verwendet werden Beobachtungen von 2 000 Landstationen, 1200 driftende Bojen im Meer und ungefähr 4 000 Schiffen. Jeden Monat werden ca. 1,5 Mio. Daten erfasst und durch Computer überprüft. (<http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/science/explained/explained5.html>). Nach Arndt

2010 werden von den verschiedenen Auswertegruppen zwischen 4000 und 6000 Landstationen ausgewertet.

Die Daten werden auf ein reguläres Netz über die ganze Erdoberfläche interpoliert. Unsicherheitsbereiche und Fehlergrenzen werden angegeben. Die Ergebnisse der drei Auswertegruppen in USA (NASA/GISS (Hansen 2010), NCDC/NOAA (Smith 2008)) und Großbritannien (Hadley Centre) unterscheiden sich nur geringfügig (Abb. 6.2) (Hansen 2010).

### 6.1.1 Entwicklung der Temperatur im globalen Mittel

Seit Beginn der Industrialisierung – Mitte des 19. Jahrhunderts – ist die mittlere Temperatur der Erde um rund  $0,74\text{ °C}$  gestiegen (IPCC 2007). Der Hauptanstieg war 1910 bis etwa 1945 und dann ab 1975 bis heute (Abb.6.2, 6.3).

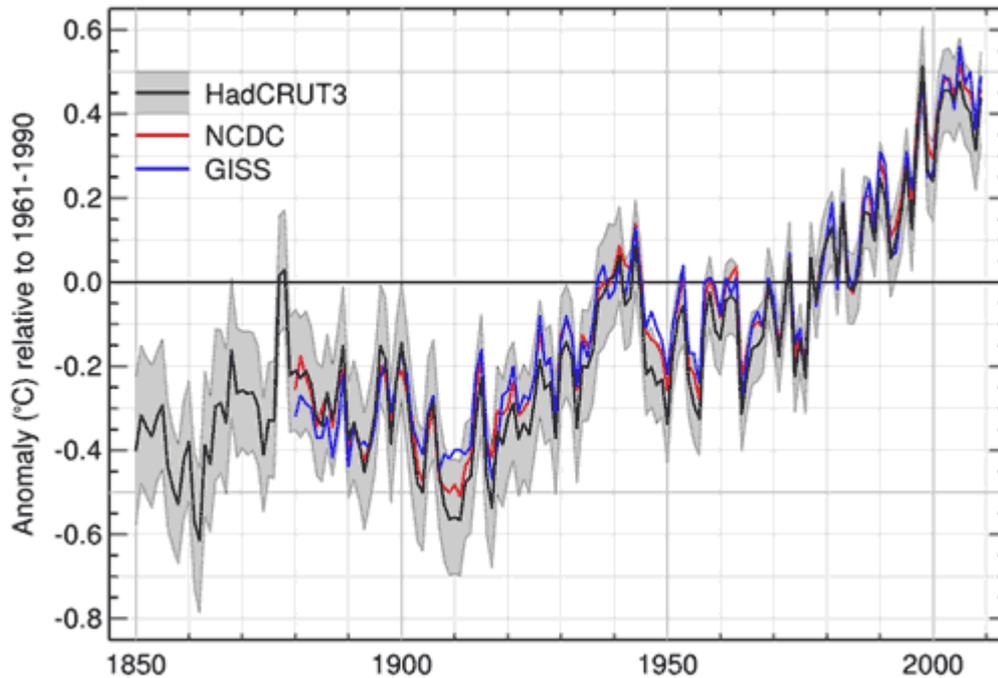


Abb. 6.2: globale mittlere Temperaturentwicklung 1850 – 2009 der 3 Auswertegruppen HadCRUT3(GB), NCDC (USA), GISS(USA). Alle zeigen einen deutlichen Erwärmungstrend, insbesondere in den vergangenen 30 Jahren. Die Unterschiede der unabhängig arbeitenden Auswertegruppen sind gering (<http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/science/explained/explained5.html>).

Nach IPCC 2007 reihen sich elf der vergangenen zwölf Jahre (1995 – 2006) ein unter die 12 wärmsten Jahre seit Beginn der instrumentellen Messungen (seit ca. 1850). Die Anomalien waren auf der Landoberfläche höher als auf dem Meer. Der lineare Trend betrug im 20. Jahrhundert  $0,7\text{ °C}$  und lag 2005 bei  $0,8\text{ °C}$ ; in den letzten 30 Jahren hat er sich auf  $0,2\text{ °C}$  pro Jahrzehnt erhöht (IPCC 2007). 1998 war nach WMO 2009 das wärmste Jahr mit einer Anomalie von  $0,63\text{ °C}$  und 2005 das zweitwärmste Jahr seit 1861. Nach Auswertungen der NASA, GISS (Hansen 2010), die den polaren Bereich durch Interpolation stärker berücksichtigen, war 2005 das wärmste und 2009 das 2. wärmste Jahr.

Die Dekade 2000 – 2009 war die wärmste seit Beginn der instrumentellen Aufzeichnungen. Das Jahr 2009 war  $0,1\text{ °C}$  wärmer als 2008 (Arndt 2010). Nach den bisherigen Auswertungen der Monate Januar – Oktober 2010 kann erwartet werden, dass dieses Jahr wiederum zu den wärmsten Jahren zählen wird. Möglicherweise wird sogar ein neuer Rekordwert erreicht.

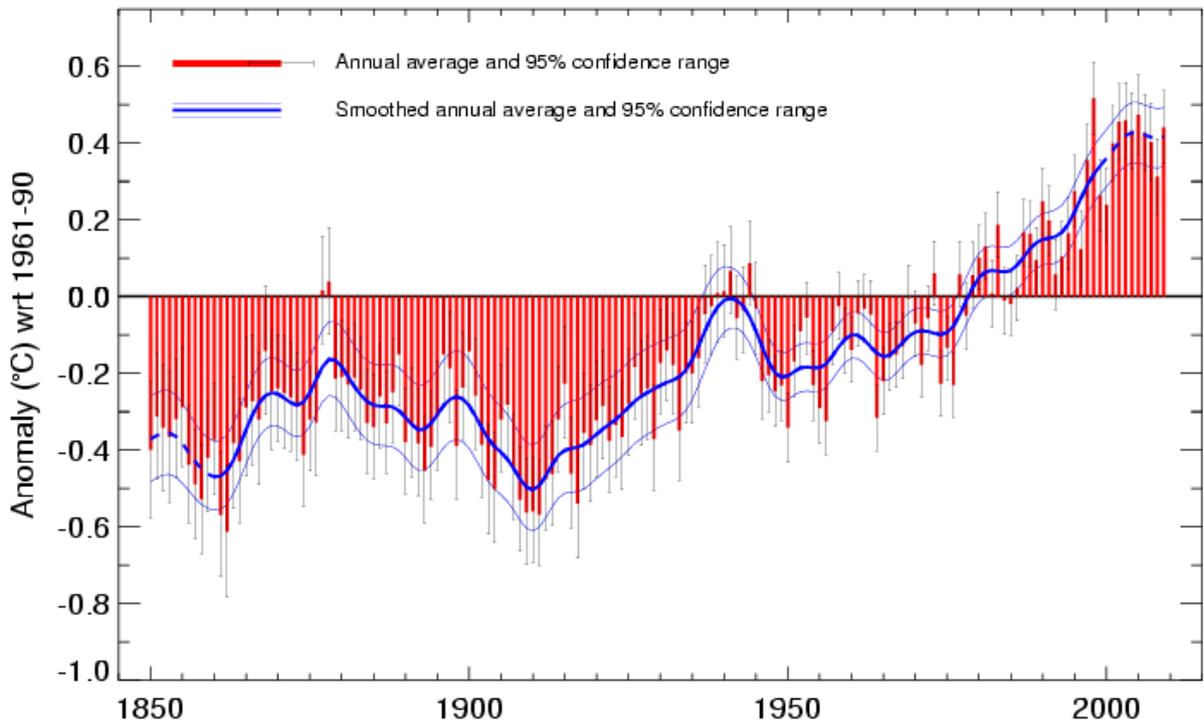
(<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/taledata/GLB.Ts.txt>,

[ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/anomalies/monthly.land\\_ocean.90S.90N.df\\_1901-2000mean.dat](ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/anomalies/monthly.land_ocean.90S.90N.df_1901-2000mean.dat)).



## Global average temperature 1850-2009

Based on Brohan et al. 2006



Met Office Hadley Centre

Source: [www.metoffice.gov.uk/hadobs](http://www.metoffice.gov.uk/hadobs)

Crown Copyright 2010

Abb. 6.3: Globale mittlere Temperaturentwicklung 1850 – 2009. Der rote Balken zeigt die jährliche globale mittlere Temperatur-anomalien. Die grauen Fehlerbalken geben den 95 % Unsicherheitsbereich an. Die dicke blaue Linie gibt die geglätteten jährlichen Werte an (21 point binominal filter). Die dünne blaue Linie gibt den 95 % Unsicherheitsbereich der geglätteten Kurve an (<http://hadobs.metoffice.com/hadcrut3/diagnostics/comparison.html>).

*Schönwiese 2008* sieht ebenfalls eine deutliche Trendverstärkung, insbesondere in den letzten Jahrzehnten. Allerdings sind Trends nie zeitlich stabil, vgl. Abb. 6.5, wo sich die Erwärmungstrends auf die Zeitintervalle 1911-1944 und in etwa seit ca. 1956, 1976 konzentrieren. Auf der Südhalbkugel setzte er sich mit vermindertem Ausmaß über den gesamten Zeitraum fort (Abb. 6.5). Regional und jahreszeitlich gibt es bei den beobachteten Klimaänderungen große Unterschiede. So ergibt sich bei einer Betrachtung des Zeitraums 1891 – 1990 global zwar eine Erwärmung, aber sie geht auch mit regionalen Abkühlungen, z. B. über dem Nordatlantik und Zentralafrika, einher (Abb. 6.9) (*Schönwiese 2008*).

Neben dem Anstieg der bodennahen Lufttemperatur wurde seit 1950 bis in die 90er Jahre ein doppelt so starker Anstieg der Nachttemperatur beobachtet. Seitdem steigen die Werte – regional unterschiedlich – im gleichen Maße. Die globale Meeresoberflächentemperatur stieg im 20. Jahrhundert um 0,6 °C - mit großen regionalen Unterschieden - an.

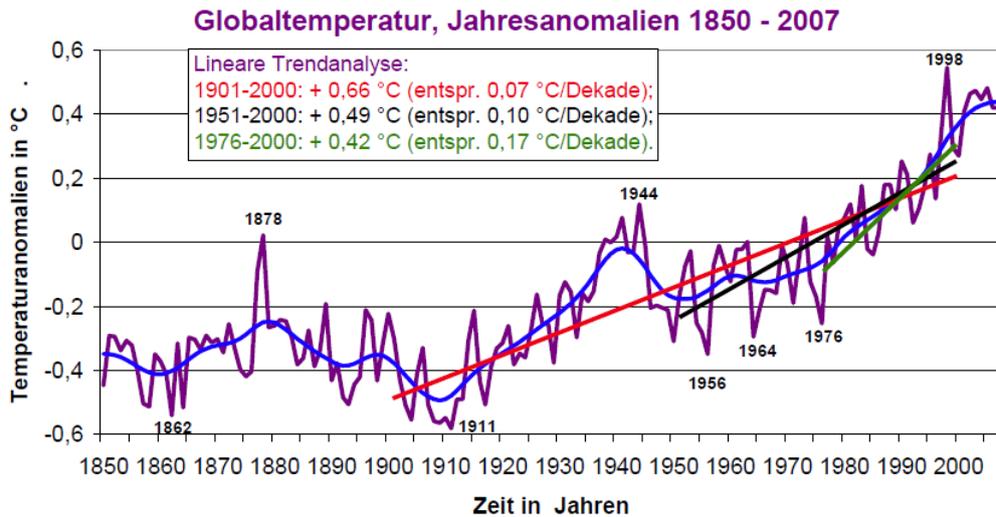


Abb.6.4: Global gemittelte Jahresanomalien 1850-2007 (relativ zu 1961-1990) der bodennahen Lufttemperatur, lila, mit 20-jährig geglätteten Daten, blau, und Trendanalysen (mit Trendverstärkung in jüngerer Zeit); Datenquelle: Jones 1999; CRU, 2008; bearbeitet, Schönwiese 2008)

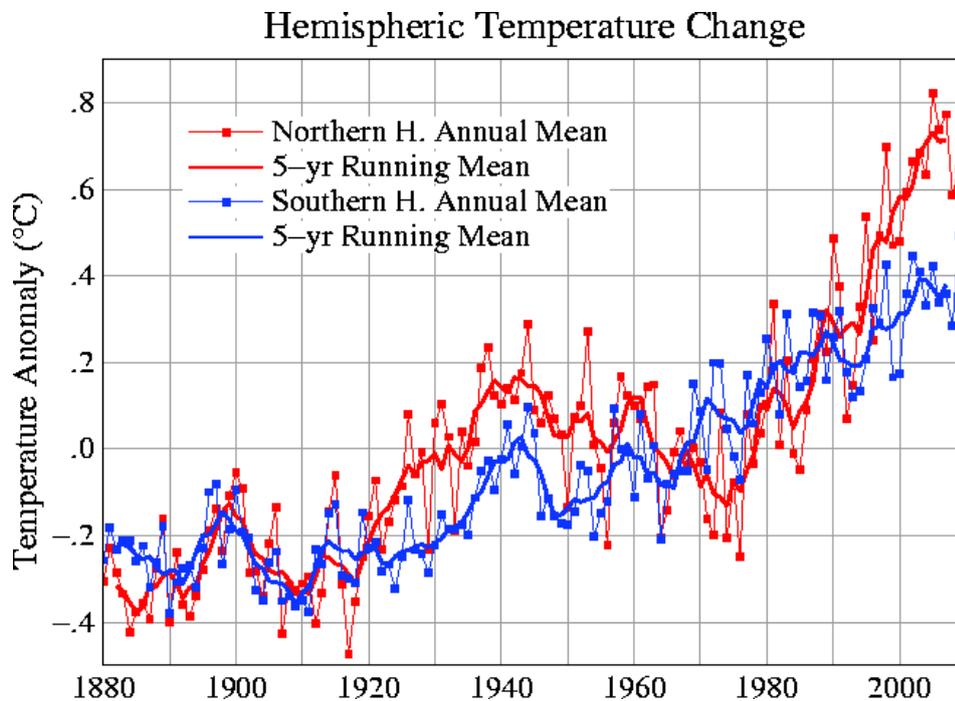


Abb.6.5: Temperaturentwicklung 1880 – 2009 getrennt für nördliche und südliche Hemisphäre. Der Anstieg in der Südhemisphäre ist 2009 deutlich höher als in der Nordhemisphäre (Sato, Hansen 2006 ergänzt. <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>)

Für den größten Teil des globalen mittleren Temperaturanstiegs der letzten 50 Jahre ist nach *IPCC 2007* sehr wahrscheinlich der beobachtete Anstieg der anthropogenen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Diese Änderung der Bewertung von ‚wahrscheinlich‘ in ‚sehr wahrscheinlich‘ ist eine Verstärkung gegenüber der Aussage im TAR. Erkennbare menschliche Einflüsse sind jetzt auch in anderen Aspekten des Klimas, wie Erwärmung des Ozeans, mittlere Erwärmung der Landoberfläche, Temperaturextreme und Windverteilung, festzustellen (*IPCC 2007*).

Die Erwärmung am Anfang des 20. Jahrhunderts könnte nach *Delworth 2000* durch eine Kombination anthropogen induzierten Strahlungsantriebs und einer ungewöhnlich lang andauernden multi-dekadischen Variabilität des gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Systems verursacht sein. Eine von *Thompson 2008* veröffentlichte Studie hat gezeigt, dass die Temperaturabnahme von etwa 0,3 °C um 1945, möglicherweise auf eine nicht korrigierte Abweichung bei der Messung der Meerestemperaturen zurückzuführen ist.

McKittrick 2007 hat mit einer statistischen Analyse mit sozioökonomischen Faktoren versucht nachzuweisen, dass die Erwärmung 1979 – 2002 nur zur Hälfte auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist. Schmidt 2009 hat diese statistischen Berechnungen überprüft und kommt zu dem Schluss, dass diese Korrelation nicht signifikant ist bzw. in weiten Bereichen eine räumliche Autokorrelation darstellt. Mithilfe der so genannten mathematischen „Monte-Carlo-Simulation“ haben die Küsten- und Klimaforscher Zorita und von Storch des GKSS-Forschungszentrums gemeinsam mit Stocker von der Universität Bern berechnet, dass es extrem unwahrscheinlich ist, dass die Häufigkeit von warmen Rekordjahren nach 1990 ein Zufall ist, sondern dass sie von bestimmten externen Antrieben beeinflusst wird. Dass die 13 wärmsten Jahre seit 1880 nach 1990 zufällig stattgefunden haben, entspräche einer Wahrscheinlichkeit von nicht mehr als 1:10 000 (Zorita 2008).

Abb.6.6 zeigt den linearen Erwärmungstrend der vergangenen 30 Jahre nach der Auswertung von NASA GISS. Die Darstellung kürzerer Zeiträume – wie z.B. 10 Jahre, wie sie häufig von sog. Klimaskeptikern vorgenommen wird – ist für den Nachweis von Klimaänderungen nicht zulässig, da diese auf einen Zeitraum von Jahren 30 Jahren definiert werden.

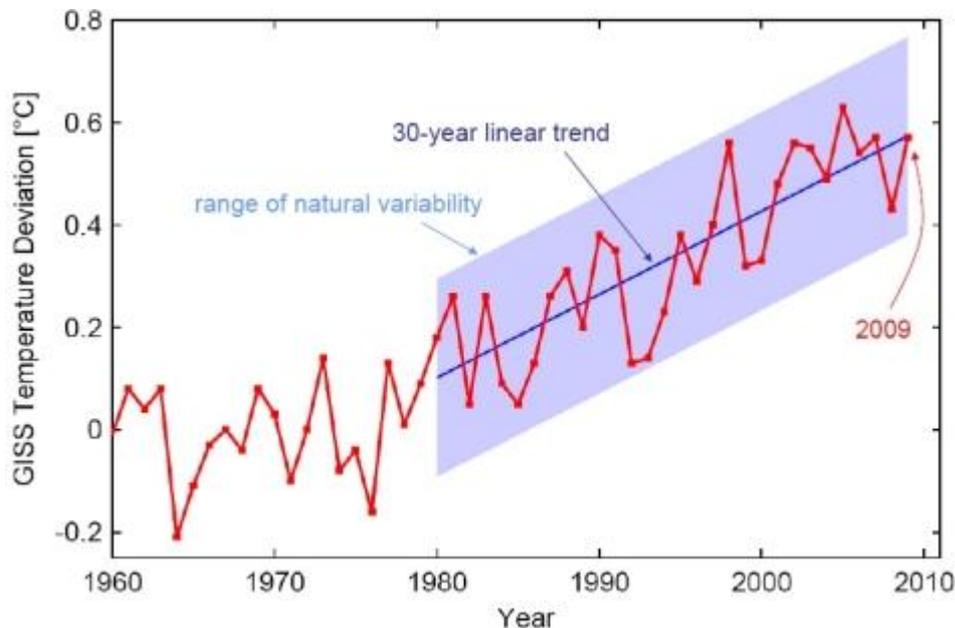


Abb. 6.6: linearer Temperaturtrend der vergangenen 30 Jahre nach GISS NASA (Rahmstorf 2010)

### 6.1.2 Erwärmungstrends der Landoberflächentemperatur aus Satellitendaten

Jin 2004 hat anhand von Satellitendaten der NASA/NOAA die Landoberflächentemperatur für die Jahre 1981 bis 1998 ausgewertet. Danach ergab sich eine stärkere Temperaturerhöhung von  $0,43\text{ °C}$  pro Jahrzehnt als bei den Lufttemperaturmessungen in 2 m ( $0,34\text{ °C/Dekade}$ ) Höhe ermittelt wurden. Ein Problem ist jedoch neben der relativ hohen Messgenauigkeit (Trigo 2008), die Wolkenbedeckung und die Emissivität (Emissionsgrad) der jeweiligen Erdoberfläche. Nach Sun 2008 können aufgrund zu vieler Unsicherheiten derzeit keine globalen Werte angegeben werden. Ebenfalls mit Hilfe von Satellitenbeobachtungen wurde eine verstärkte Vegetationsaktivität in der borealen Region der Erde (Taigawälder und Tundra) festgestellt (IPCC 2007). Der Frühling setzt dort inzwischen 1 Woche früher als vor 20 Jahren ein. Das verstärkte Wachstum der Vegetation war eindeutig durch die höhere Temperatur hervorgerufen, die sich in den nördlichen Ländern um  $0,4\text{ °C}$  pro Jahrzehnt erhöht.

### 6.1.3 Die vergangenen 650 000 Jahre – Klimageschichte

Die Auswertungen von Eisbohrkernen geben uns Auskunft über die Klimageschichte der vergangenen 650 000 Jahre, bzw. nach neuesten Auswertungen bis 800 000 Jahre. Die durch Schwankungen in der Exzentrizität (Ellipsenförmigkeit) (s. Kap. 4.1) der Erdbahn her-

vorgerufene Periode von 100 000 Jahren ist klar an den Temperaturschwankungen erkennbar (Abb.6.4).

Nach *Stocker 2007* gehören polare Eisbohrkerne zu den Eckpfeilern der Paläoklimaforschung, weil sie neben einer Fülle von Proxydaten einige wichtige Daten des Klimasystems „direkt“ aufzeichnen. Anhand der über 3000 m dicken EPICA-Eisbohrkerne (European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA)) können die Konzentration der drei wichtigsten Treibhausgase der Luft, die Temperatur- und Niederschlagsrate, die Aerosolzusammensetzung der Atmosphäre, die Zusammensetzung des Meerwassers die Aktivität der Sonne und Vulkane sowie der Fluss von extraterrestrischem Staub auf die Erde in den vergangenen 800 000 Jahren gemessen werden (*Wolff 2010*).

Messungen der Luftzusammensetzung der Gasblasen in Eisbohrkernen der Antarktis haben den Beweis erbracht (Abb. 6.6), dass die Konzentration der beiden wichtigsten Treibhausgase, Methan und Kohlendioxid, über Eiszeitzyklen innerhalb enger Grenzen schwanken und dass sie heute um über 250 % bzw. 27 % höher sind als je zuvor in den letzten 650 000 Jahren. Die Temperaturdifferenzen können in den Eisbohrkernen mit mehreren Isotopenpaaren (N, Ar, D, H<sub>2</sub>O) bestimmt werden.

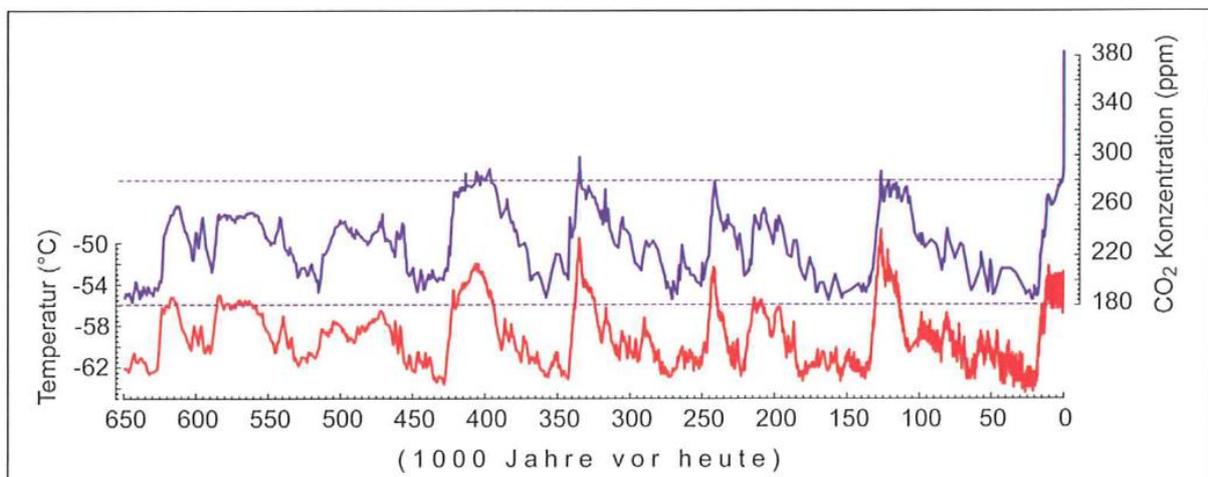


Abb. 6.7: Rekonstruktion des atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Gehaltes (blau) sowie Temperaturschwankungen aus Variation des Deuteriumgehaltes (rot) in antarktischen Eisbohrkernen der vergangenen 650 000 Jahre, der Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der vergangenen 50 Jahre ist aus direkten Messungen in der Atmosphäre ermittelt, *Stocker 2007*, <http://www.climate.unibe.ch/~stocker/papers/stocker07rund.pdf>

Die neueren Eisbohrkernauswertungen in der Antarktis im Rahmen des EPICA-Projektes, die 650 000 Jahre zurückreichen (Abb. 6.7), zeigen ebenfalls, dass geringere Treibhausgaskonzentrationen mit kühleren Temperaturen verknüpft waren (*IPCC 2007*).

Die Auswertung der Daten aus Eisbohrkernen zeigen die Eiszeitzyklen mit Temperaturschwankungen um 10° C, die sehr wahrscheinlich durch Änderungen der Erdumlaufbahn ausgelöst wurden. Durch den dadurch verursachten Klimawandel haben sich die Methan- und Kohlendioxidkonzentrationen weitgehend parallel den Temperaturänderungen entwickelt (*Köhler 2010*). *IPCC 2007* geht davon aus, dass jetzt der Mensch die Spurengaskonzentrationen der Atmosphäre und die Erdoberfläche ändert und damit die Temperatur der Erde erhöht.

#### 6.1.4 Die vergangenen 10 000 Jahre – Klimageschichte

Das Klima seit der letzten Eiszeit vor 10 000 Jahren gilt als relativ stabil mit Temperaturschwankungen von etwa ± 1 °C. Die mittlere Temperatur der letzten Eiszeit lag etwa 5 – 6 °C unter dem heutigen Wert (*Schneider 2004*) (Abb. 6.8). *Mayewski 2004* fand im Holozän in den vergangenen 11500 Jahren 6 signifikante Perioden mit schnellen Klimaänderungen. Die letzte Periode fand vor 600 Jahren statt und dauerte von 1400 – 1850 („kleine Eiszeit“).

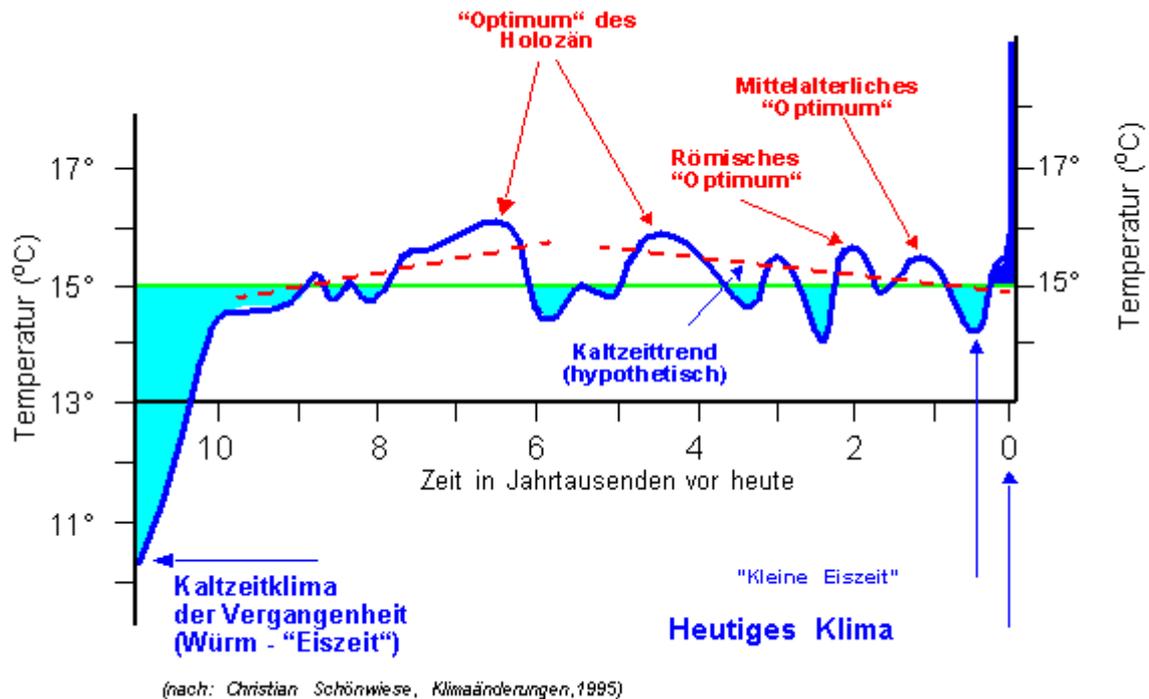


Abb. 6.8: Klimaentwicklung im Holozän seit Ende der letzten Eiszeit vor 10 000 Jahren (Kasang, HBS 2005 nach Schönwiese)

### 6.1.5 Die vergangenen 1000 Jahre - Die Hockeyschläger-Diskussion

Die Bestimmung der mittleren globalen Temperatur vor Beginn der Instrumentenmessungen hat nach einer Veröffentlichung von Mann 1998, 1999 aufgrund der so genannten Hockeyschläger-Kurve, die den Temperaturverlauf der vergangenen 1 000 Jahre zeigt (Abb. 6.9), eine intensive Diskussion ausgelöst.

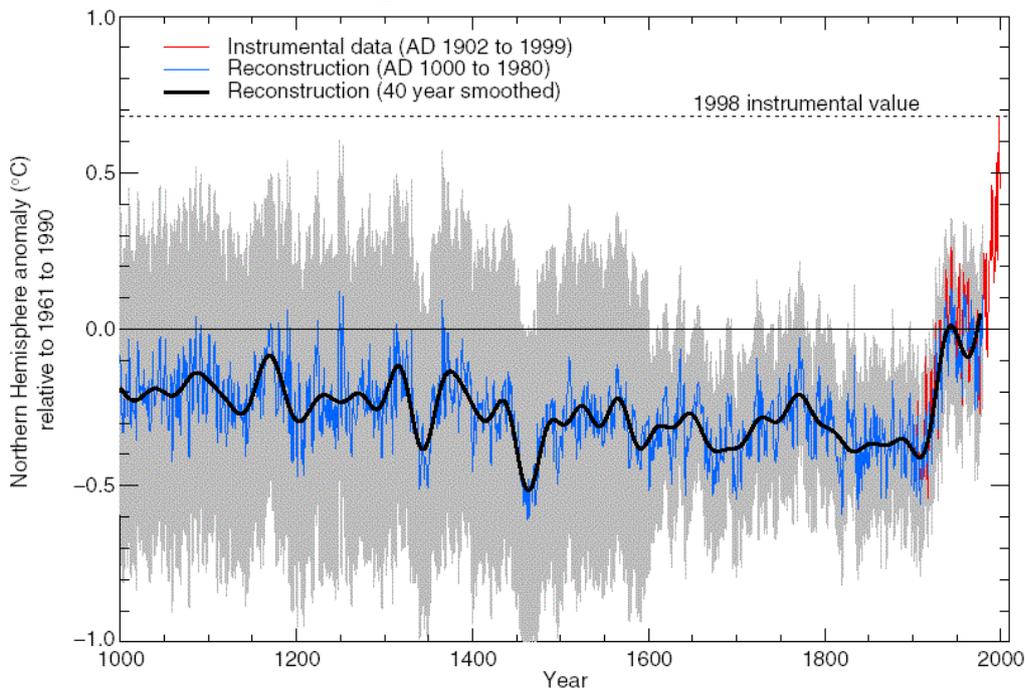


Abb. 6.9: Variation der Oberflächendurchschnittstemperatur der Erde über die letzten tausend Jahre. Blaue Kurve: Temperaturvariation Jahr für Jahr. Graue Kurve: Unsicherheiten der Jahreswerte. Schwarze Kurve: Über 40 Jahre geglättete Kurve. Die Unsicherheit der Daten wächst von rechts nach links (Mann 1999).

Die Temperaturbestimmung über so genannte Proxydaten (indirekte Anzeiger) ist eine durchaus übliche Methode. Bei den historischen Quellen wird zwischen direkten und indirek-

ten Angaben zum Klima unterschieden. Direkte Angaben sind: Witterungstagebücher, Wolkenbeobachtungen, Pegelstände etc.. Indirekte Angaben (Proxy) messen klimatische Auswirkungen, von welchen auf die Klimaverhältnisse zurück geschlossen wird (zum Beispiel Phänologie, also der Zustand der Vegetation, Erntedaten, Getreidepreise, Bittprozessionen, Segelzeiten über den Atlantik usw.) (*Düwel-Hösselbarth 2002, Glaser 2001*). Probleme bei der Umwandlung dieser Daten in verwertbare Klimagrößen ergeben sich z.B. bei der Annahme von Stationarität. Es wird also z.B. postuliert, dass die statistische Beziehung zwischen dem Weinlesedatum und dem Klima sich mit der Zeit nicht verändert hat. Weiterhin werden Extremereignisse in den Chroniken häufig überschätzt. Maßstäbe wie „seit Menschengedenken“ oder Ähnliches sind kaum quantifizierbar. Trotzdem können historische Quellen wichtige und präzise Informationen zur Klimageschichte beitragen. Sie sind zeitlich und räumlich hoch aufgelöst und zumindest für Europa (aber auch beispielsweise China) in großem Umfang vorhanden.

Neben den historischen Quellen gibt es natürliche Archive, welche stark vom Klima abhängig sind und diese Information in hoher zeitlicher Auflösung speichern. Beispiele für diese Proxydaten sind: Baumringe, Korallen, Pollen, See- oder Ozeansedimente und Eisbohrkerne (Abb. 6.10). Verwendete Größen sind beispielsweise Ringwachstum, Eisakkumulation, Verhältnisse stabiler Isotope, Häufigkeit bestimmter indikativer Pollen oder Plankton und andere. Um aus diesen Größen eine Klimazeitreihe zu erhalten, sind verschiedene Zwischenschritte notwendig: Korrekturfunktionen, Datierung und schließlich die nicht unproblematische Kalibration mit Klimadaten. Bei den Baumringen ist entscheidend, worauf das Baumwachstum an diesem Standort sensitiv ist und war (Temperatur, Niederschlag, Jahreszeit) oder inwiefern der Baum oder die Baumgruppe repräsentativ für das regionale Klima ist.

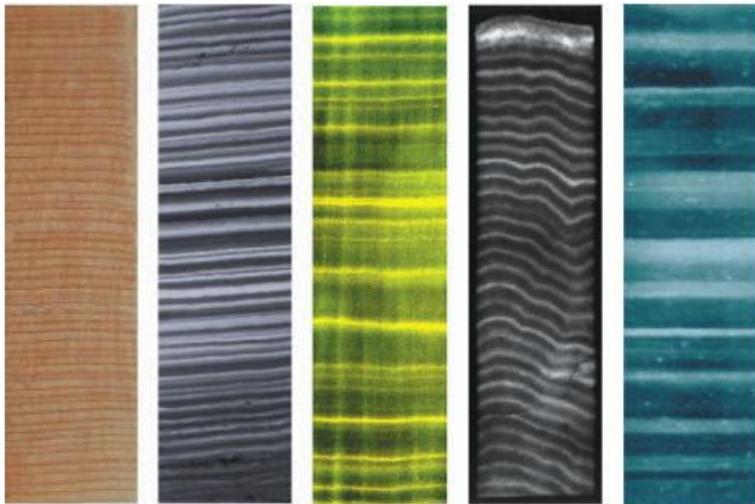


Abb. 6.10: Kontinentale und marine Klimaarchive mit Jahresschichtung oder –wachstum. Von links nach rechts: Baumringe (Pine Tasmanien, E. Cook), Laminierte Seesedimente (Maarsee Eifel, B. Zolitschka), Speleotheme (Stalagmit Norwegen, J. Kihle), Korallen- (Papua Guinea, S. Thudhope) und Eisbohrkern (GISP Grönland, A. Gow). (Quelle: PAGES Newsletter Oktober 2003, Abbildung zusammengestellt durch ESF HOLIVAR Projekt <http://www.esf.org/holivar>, Schneider R. 2004))

Alle Klimaproxies können nur anhand der Instrumentenperiode kalibriert werden; je nach Standort kann also nicht viel weiter als bis 1900 zurückgegangen werden. Deswegen muss auch geklärt werden, ob eine im 20. Jahrhundert abgeleitete Transferfunktion tatsächlich auf frühere Jahrhunderte anwendbar ist. Bei den Baumringen kommt als weiteres Problem hinzu, dass die heutige CO<sub>2</sub>-angereicherte Atmosphäre die Kalibration von Baumringdaten über die C-14 Altersbestimmung beeinflussen haben könnte. Trotz all dieser Schwierigkeiten hat sich immer wieder gezeigt, dass Klimarekonstruktionen gemacht werden können, da unabhängige Archive (Eisbohrkerne, Sedimente, Baumringe) oft eine gute Übereinstimmung zeigen (Abb. 6.11).

Die kalibrierten Zeitreihen alleine geben nur ein unvollständiges Bild des Klimas wieder, da sie jeweils nur für einen Standort gelten. Liegt eine Vielzahl solcher Reihen über einen bestimmten Raum vor, wird versucht, mit Rekonstruktionsmethoden die interessierende Infor-

mation wie z.B. die nordhemisphärische Mitteltemperatur zu erhalten. Das Standardverfahren ist die multiple Regression, wobei zunächst die Anzahl der Variablen durch eine Hauptkomponentenanalyse (PCA, Principal Component Analysis), eine statistische Standardmethode, reduziert wird. So wird vermieden, dass unpräzise, unbedeutende oder fehlerhafte Informationen in die Rekonstruktion einfließen. Die Prädiktordaten (z. B. Baumringreihen) müssen nicht nur für die zu rekonstruierende Periode vorhanden sein, sondern auch für eine möglichst lange „Kalibrationsperiode“, für welche die zu rekonstruierende Variable vorhanden ist (z. B. 1900 - 2000). Hauptkomponentenanalyse und Regressionsmodell werden statistisch angepasst und die gewonnenen Parameter dann verwendet, um in der Vergangenheit den umgekehrten Weg zu gehen (*Brönnimann 2005*). *Jones 2009* hat in einem ausführlichen Beitrag gemeinsam mit Kollegen den derzeitigen Stand der paläoklimatischen Forschung dargestellt und die Fortschritte bei den Auswertemethoden deutlich gemacht.

Das von *Mann 1999* rekonstruierte Temperaturdiagramm der vergangenen 1000 Jahre wies die Form eines Hockeyschlägers auf – leichter Rückgang der Temperaturen bis etwa 1900, danach ein steiler Anstieg (Abb.6.9). Zur Rekonstruktion wurde eine große Anzahl verfügbarer Klimadaten der letzten Jahrhunderte, unter anderen Messdaten von Wetterstationen, aber auch indirekt bestimmte Klimadaten, so genannte Proxydaten, Klimadaten aus Sedimenten, Bohrkernuntersuchungen des Polareises, Baumringanalysen, Korallen und weitere Daten verwendet. Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse wurde die Temperaturentwicklung aus mehr als 70 verschiedenen Klimaaufzeichnungen bestimmt.

Dieses Diagramm wurde vom IPCC in seinem 3. Sachstandsbericht (TAR) 2001 als ein Hinweis für den anthropogenen Treibhauseffekt genommen, da der Temperaturanstieg mit der Zunahme der Verbrennung fossiler Brennstoffe zusammenfiel.

### **Die Hockeyschläger-Diskussion**

Das so genannte Hockeyschläger-Diagramm – der von *Mann 1999* rekonstruierte Temperaturverlauf - war der Auslöser heftiger Debatten (*Mann 2002, 2003, 2006, McIntyre 2003, 2005*), da den Forschern systematische statistische Fehler vorgeworfen wurden. An dieser Diskussion beteiligten sich auch deutsche Klimawissenschaftler wie *von Storch 2006, Rahmstorf 2006* und *Zorita 2003, 2005*. Unabhängig von möglichen statistischen Verfahrensfehlern, die im AR4 diskutiert werden, wurde die grundsätzliche Form der Kurve in neueren Studien mehrfach bestätigt, wie auch der auf Basis vieler Studien rekonstruierte Temperaturverlauf seit 700 n. Chr. im AR4 (*IPCC 2007*) zeigt. Mehrere aktuelle Studien zeigen, dass auf der Nordhalbkugel zumindest eine höhere Variabilität herrschte als noch im 3. Bericht des IPCC angenommen wurde. Insbesondere gab es wohl kältere Phasen vom 12. bis 14., sowie im 17. und 19. Jahrhundert (kleine Eiszeit) und eine mittelalterliche Warmperiode, insbesondere in Europa.

Laut Aussage des AR4 (*IPCC 2007*) unterstützen paläoklimatische Informationen die Interpretation, dass die Erwärmung der letzten 50 Jahre ungewöhnlich für mindestens die letzten 1 300 Jahre ist. Die Polregionen waren das letzte Mal vor 125.000 Jahre signifikant wärmer als gegenwärtig. Die mittlere Temperatur der Nordhalbkugel während der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts war sehr wahrscheinlich höher als irgendeine andere 50-jährige Periode in den letzten 500 Jahren und wahrscheinlich die höchste in den letzten 1.300 Jahren (Abb. 6.11).

Auch eine Studie der US-amerikanischen National Academy of Science (National Research Council, *NRC 2006*) kommt nach umfangreichen Literatúrauswertungen zu der Schlussfolgerung, dass die Erderwärmung gegenwärtig auf dem höchsten Stand seit 400 Jahren sei. Für die Jahre 1000 bis 1600 seien die Daten nicht mehr so eindeutig, aber keine der Rekonstruktionen zeigt, dass die Temperaturen während der mittelalterlichen Warmperiode wärmer war als in den vergangenen Jahrzehnten. Das Komitee fügt in seinem Report noch hinzu, dass der Nachweis des menschlichen Einflusses auf das Klima völlig unabhängig von der Korrektheit des sog. Hockeyschläger Diagramms ist. *Mann 2008* hat die Vorschläge des NRC aufgegriffen und die Oberflächentemperatur der Erde der vergangenen 2000 Jahre mit erweiterten und ergänzten Datensätzen sowie verschiedenen statistischen Methoden bestimmt (Abb. 6.8) und die Auswertungen verschiedener Autoren berücksichtigt.

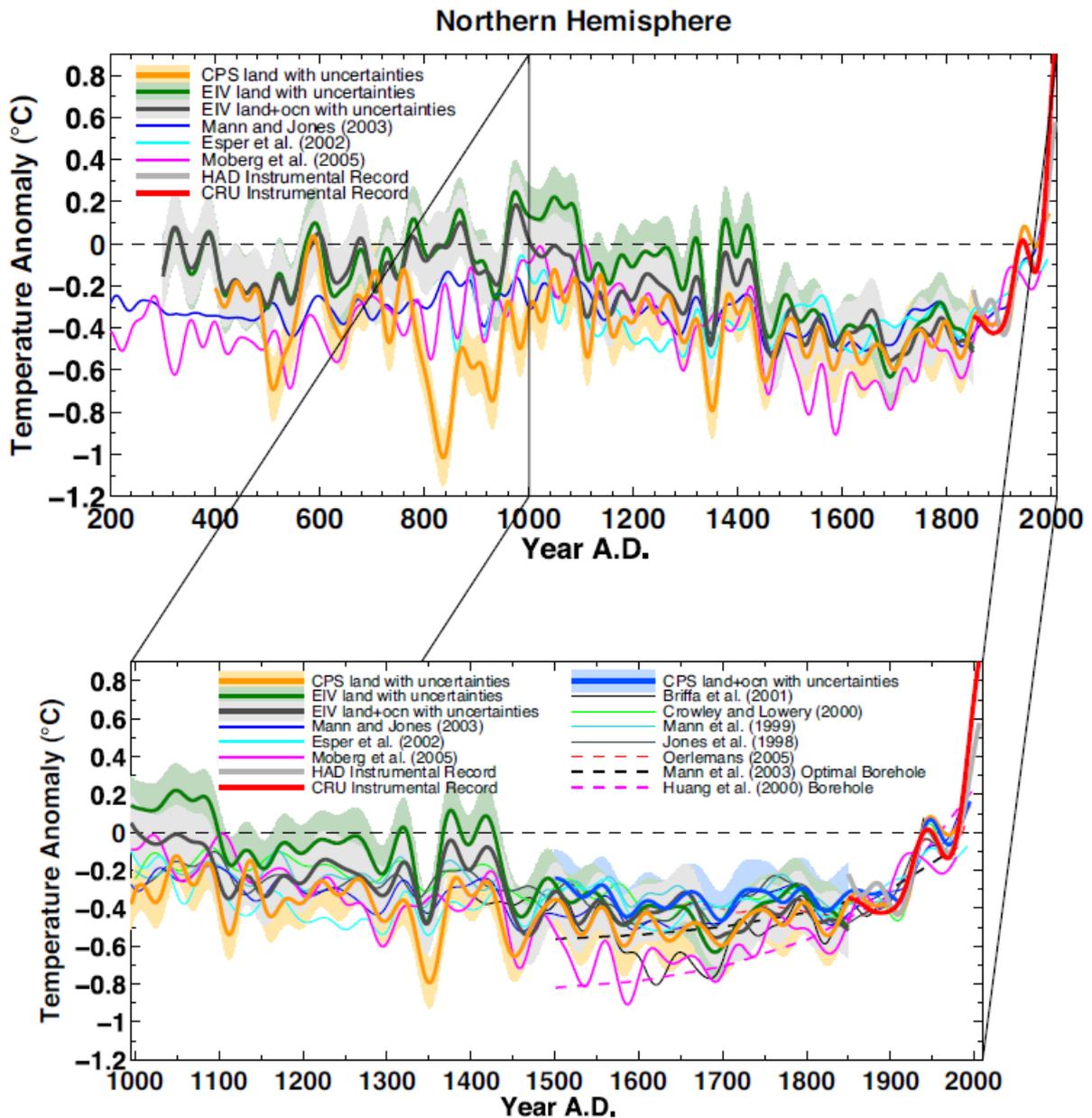


Abb. 6.11: Temperaturentwicklung seit ca. 2000 Jahren aus Rekonstruktionen verschiedener Autoren (Mann 2008). Keine der Rekonstruktionen erreicht höhere Werte als in den vergangenen Jahrzehnten gemessen wurde.

Das Ergebnis hat sich grundsätzlich nicht geändert, die Erwärmung in den vergangenen Jahrzehnten ist anomal seit mindestens 1300 Jahren mit und ohne Verwendung von Baumringdaten. Mit Baumringdaten kann sie auch auf die letzten 1700 Jahre ausgedehnt werden. Die rekonstruierte Amplitude der Temperaturschwankungen ist zwar größer - insbesondere in der mittelalterlichen Warmperiode - als ursprünglich von Mann 1999 angegeben, aber sie erreicht nicht die gegenwärtige Höhe. Kritik von McIntyre 2009 an seiner Auswertemethode weist Mann 2009 als unzutreffend zurück. Juckes 2007, 2009 hat 15 Proxy-Chronologien des vergangenen Jahrtausends ausgewertet und kommt zu dem Schluss, dass das vergangene Jahrzehnt mit 95 % Wahrscheinlichkeit wärmer war als jede Dekade im diesem Zeitraum. Damit übertrifft er die Aussage im AR4 (IPCC 2007) mit 66 % Wahrscheinlichkeit für das letzte Jahrzehnt im vergangenen Jahrtausend.

### 6.1.6 Urbane Wärmeinseln

Über den Einfluss der urbanen Wärmeinseln auf die Temperaturerhöhung der vergangenen 150 Jahre wurde intensiv diskutiert, da unbestritten die mittleren Temperaturen in den städtischen Gebieten insbesondere nachts deutlich höher sind als im Umland. Außerdem haben

die städtischen Gebiete in den vergangenen Jahrzehnten stark zugenommen. Umfassende Untersuchungen (*IPCC 2007*) haben jedoch ergeben, dass der urbane Wärmeinsel-Effekt für die globale Temperaturentwicklung im Zeitraum 1900 – 1990 nicht mehr als  $0,05\text{ °C}$  ausmacht und damit praktisch keinen Einfluss auf die globale Temperaturerhöhung hat. *Parker 2004, 2006* hat aufgezeigt, dass die globalen Temperaturen über Land genau so stark in windigen wie auch in windstillen Nächten angestiegen sind. Dies weist darauf hin, dass die beobachtete Erwärmung keine Folge der städtischen Entwicklung ist, da der Wärmeinsel-Effekt vor allem nachts und in windschwachen Zeiten auftritt. *Hansen 2010* weist mithilfe von Satellitendaten des „Nachtlichtes“ durch künstliche Beleuchtung nach, dass der urbane Effekt durch menschliche Aktivitäten nur geringfügige Auswirkungen (ca.  $0,01\text{ °C}$ ) hat.

## 6.2 Regionale Änderungen des Klimas

Bei der regionalen und jahreszeitlichen Betrachtung von Trendanalysen ergibt sich ein kompliziertes Bild. Neben Regionen mit Temperaturzunahme treten auch Gebiete auf, die sich im Lauf der letzten 100 Jahre abkühlten. Die so genannte globale Erwärmung schließt nicht aus, dass regional begrenzt Temperaturrückgänge auftreten bzw. die Erwärmung nur gering ist. Abbildung 6.13 zeigt die Temperaturveränderung 1970 – 2009. Danach gab es eine deutliche Erwärmung v.a. im euroasiatischen Raum, Mitteleuropa und Skandinavien sowie Teilen Kanadas und über dem Nordatlantik. Abkühlungen traten insbesondere in einigen Gebieten über dem Ozean auf. Insgesamt überwiegen inzwischen die Gebiete mit Erwärmung; die Erdoberfläche hat sich in diesem Zeitraum um ca.  $0,8\text{ °C}$  erwärmt (*Hansen 2010*).

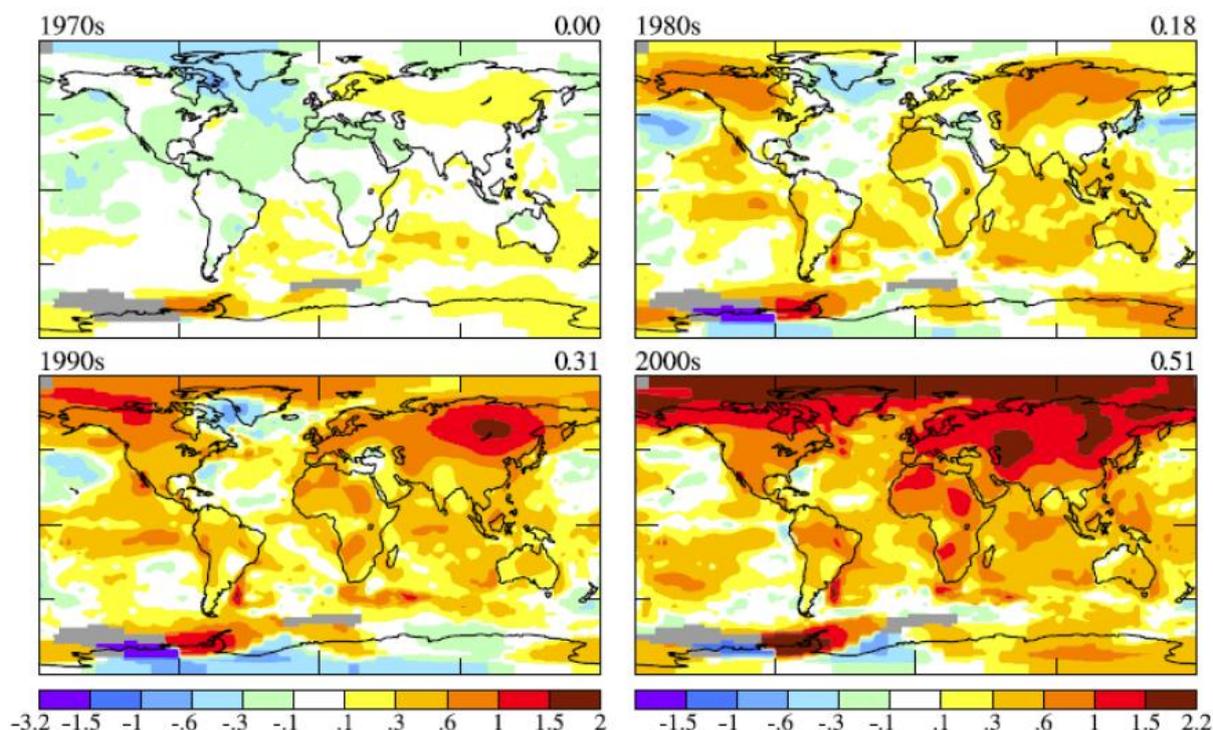


Abb. 6.13: Dekadische Temperaturanomalien im Zeitraum 1970 - 2009 relativ zur Basisperiode 1951 – 1980, die regionalen Abkühlungsbereiche werden immer weniger (*Hansen 2010*)

Neben der Temperatur hat sich auch die Verteilung des Niederschlags im 20. Jahrhundert regional deutlich verändert (Abb. 6.14). *Schönwiese 2008* schreibt im „Klimaatlas für Europa“ hierzu: „Auch wenn gelegentlich vermutet wird, dass die „globale Erwärmung“ zu einer Intensivierung des hydrologischen Zyklus und somit insgesamt zu mehr Niederschlag pro Zeiteinheit führen sollte, ist dies zumindest für die Landgebiete aufgrund des Datensatzes für Bild 6.14 nicht signifikant erkennbar. Dominierend sind vielmehr regionale Umverteilungen, wie z.B. in Europa mit Ausnahme des Südens (Mittelmeerländer) überwiegend eine Zunahme.“

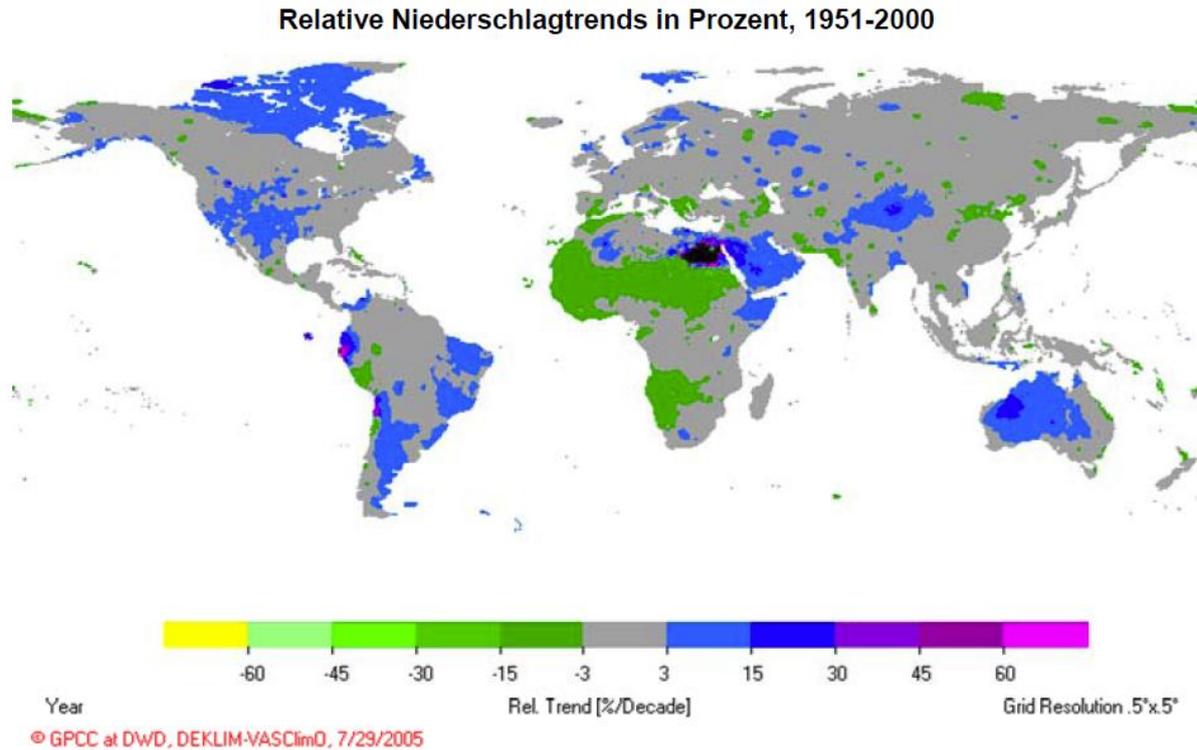


Abb. 6.14: Lineare Trendstrukturen des Niederschlags in Prozent, Jahressummen, global, 1951-2000, basierend auf dem VASCLimO-Datensatz in 5°x 5°-Auflösung (Beck 2007).

Die regionale Verteilung des Niederschlagstrends für die Jahre 1950 – 2000 zeigt Gebiete mit einer deutlichen Zunahme und andere mit einer Abnahme des Niederschlags (Beck 2007). Danach konzentrieren sich die Niederschlagszunahmen vor allem auf die nördlichen und östlichen Regionen Kanadas, wo sie auch besonders signifikant sind, die USA, große Teile Südamerikas (vorwiegend Osten und Süden), in Europa auf Großbritannien, Frankreich, Skandinavien, und das Baltikum, weiterhin Teile Osteuropas, Arabiens, Asiens und die Mitte sowie den Westen Australiens. Niederschlagsabnahmen sind am signifikantesten in der Sahel-Region zu erkennen, aber auch im westlichen Südafrika, der Mittelmeerregion und etlichen Teilregionen Asiens. Nach IPCC 2007 wurde im Zeitraum 1990 – 2005 ein langfristiger Trend in der Niederschlagshöhe in vielen großen Regionen (östliche Teile von Nord- und Südamerika, Nordeuropa sowie Nord- und Zentralasien (IPCC 2007) beobachtet.

### 6.2.1 Klimatrend in Asien

In China und Indien hat es seit den 80er Jahren im 20. Jahrhundert einen deutlichen Klimawandel gegeben. Der sommerliche Regengürtel (Monsun) hat sich verschoben und die meisten Sommer waren durch Dürren gekennzeichnet. Der Monsun Niederschlag in Indien und Südostasien hat deutlich abgenommen. Als Ursache hierfür werden wachsende Ruß- (BC) und Sulfatemissionen sowie Abholzungen vermutet, die zu einer Verringerung der gemessenen Sonneneinstrahlung beigetragen haben könnten (Abb. 6.15) (IPCC 2007, Ramanathan 2007, 2009). Ein weiteres Problem ist der starke Rückgang der Gletscher im Himalaya, Tibet und Hindukusch, die für Asien eine wichtige Wasserquelle darstellen (Ramanathan 2007). Nach Paeth 2007 ist es wahrscheinlich, dass ein Zirkulationssystem wie der indische Monsun, welches auf der strahlungsinduzierten differentiellen Erwärmung von Land und Meer beruht, durch einen verstärkten Treibhauseffekt bzw. höhere Aerosolkonzentrationen nachhaltig verändert wird. Zusammenfassend merkt Paeth 2007 an, dass die Frage nach der Sensitivität des indischen Monsuns gegenüber den anthropogenen Emissionen gegenwärtig nicht abschließend beantwortet werden kann. Zu groß sind die Modellunsicherheiten und zu schwach die Signale vor dem Hintergrund der enormen natürlichen Variabilität.

2010 kam es sowohl in Indien als auch in Pakistan zu extremen Monsunniederschlägen mit großen Überschwemmungen. Die außergewöhnliche Flutkatastrophe in Pakistan im Sommer 2010 ist nach Pressemitteilung des DWD vom 12.08.2010 die Folge einer Klimaanomale über dem südlichen Pazifik. Das ‚La Niña‘ genannte Ereignis verstärkte den Monsun im Juli deutlich. Diese für Pakistan außergewöhnliche Wettersituation setzte sich Anfang August fort.

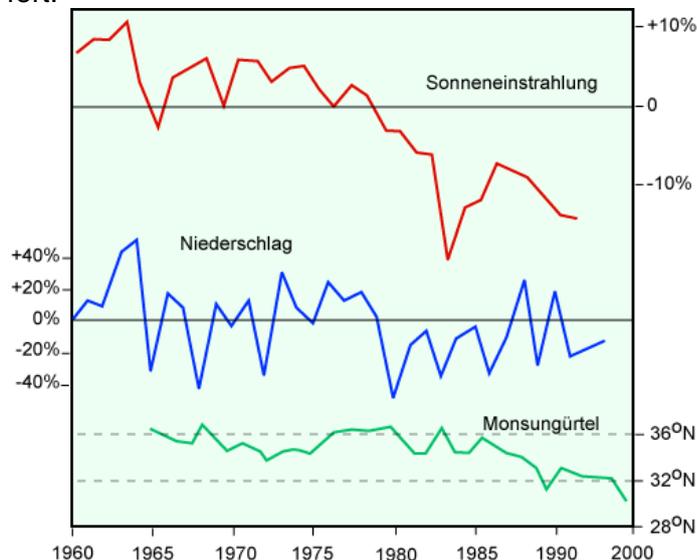


Abb. 6.15: Regionale Klimaänderungen in China durch Veränderung der Sonneneinstrahlung, des Sommerniederschlags und des Monsungürtels im Sommer (HBS, Kasang 2005 nach Xu 2001)

Modellrechnungen haben ergeben, dass Ruß- und Sulfatemissionen über die Veränderung der Strahlungsverhältnisse die Luftzirkulation beeinflussen und damit die Niederschlagsmenge im Norden und Süden Chinas auf gegensätzliche Weise verändern. Dies könnte nach für die stärkeren Niederschläge im Süden Chinas und intensiveren Dürren im Norden des Landes der letzten Jahrzehnte verantwortlich sein. *Ramanathan 2005, 2008* befürchtet in China aufgrund von Modellrechnungen und Beobachtungen bei einem weiteren Anstieg der Aerosole eine Verdoppelung des Auftretens von Dürren in den nächsten Jahrzehnten. Die Auswirkungen der Rußwolken und Treibhausgaszunahme auf das Klima sind sehr komplex und regional unterschiedlich (*Zickfeld 2005*). Der Monsunregen kann sich regional sehr unterschiedlich verändern, wie 2010 in Indien und Pakistan extrem zu beobachten war.

## 6.2.2 Klimatrend in Europa und Deutschland

### Europa

Europa hat sich seit 1900 mit  $0,95^{\circ}\text{C}$  stärker erwärmt als der globale Durchschnitt (Abb. 6.16). Die Winter haben sich stärker erwärmt als die Sommer. Die Erwärmung war am stärksten in Nordwestrußland und der iberischen Halbinsel. In den vergangenen 100 Jahren (1900 – 2000) haben in den meisten Teilen Europas die Anzahl der kalten und frostigen Tage abgenommen und die Anzahl der Tage mit Temperaturen über  $25^{\circ}\text{C}$  (Sommertage) und Hitzewellen haben zugenommen. Die Dekade 2000 – 2009 war mit  $1^{\circ}\text{C}$  signifikant wärmer als die vorhergehenden Dekaden (*Arndt 2010*).

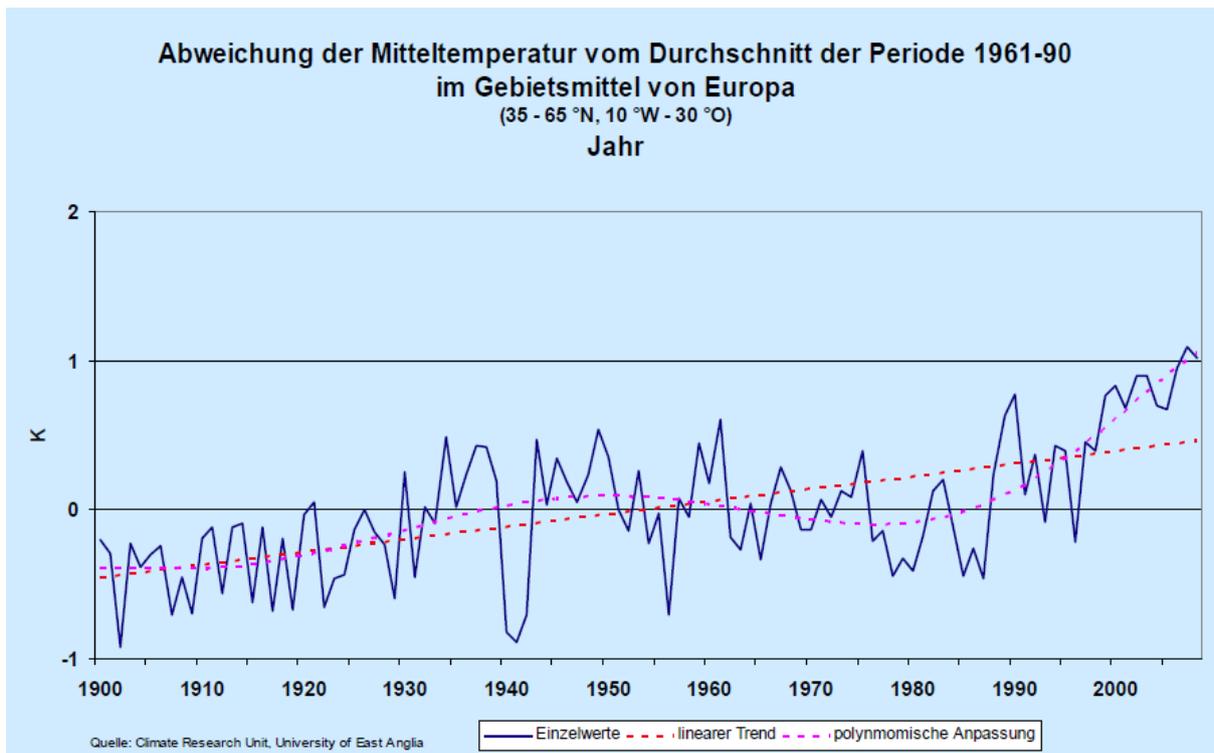


Abb. 6.16: Abweichung der Jahresmitteltemperatur in Europa vom langjährigen Durchschnitt seit 1901 (DWD 2009,

[http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2008/PK-15-042008/20080415\\_Z\\_2BF\\_PDF\\_download.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/20080415\\_Z+F\\_PDF\\_download.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2008/PK-15-042008/20080415_Z_2BF_PDF_download.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/20080415_Z+F_PDF_download.pdf))

*Philipona 2009* hat Messungen des kurzwelligen und langwelligen Strahlungsantriebs an verschiedenen Stationen in Europa ausgewertet und konnte damit nachweisen, dass die stärkere Erwärmung seit den 80er Jahre des vergangenen Jahrhunderts in Zentraleuropa auf den Rückgang der Aerosole zurückzuführen ist. Der jährliche Niederschlagstrend zeigt in Europa in der Periode 1900 - 2000 ein gegensätzliches Bild: Nordeuropa war 10 – 40 % nasser und Südeuropa bis zu 20 % trockener. In den meisten Teilen Europas waren die Änderungen im Winter am größten. Die Gletscher waren in 8 von 9 Gebieten in Europa auf dem Rückzug, was mit dem globalen Trend übereinstimmt.

## Deutschland

Die ersten zehn Jahre des 21. Jahrhunderts waren in Deutschland, wie auch weltweit, das wärmste Jahrzehnt seit mindestens 130 Jahren. Alle dieser Jahre lagen über dem Wert der langjährigen Durchschnittstemperatur (1961 – 90) von 8,2 °C. Die wärmsten Jahre waren mit 9,9° C die Jahre 2000 und 2007. Die Mitteltemperatur für Deutschland 2009, berechnet aus einem interpolierten 1-km-Raster, betrug 9,2 °C. Das sind 1 K mehr als im Bezugszeitraum 1961-1990. (Klimastatusbericht 2009, *DWD 2010*).

Insgesamt ergibt sich von 1901 - 2009 in Deutschland ein statistisch signifikanter Temperaturanstieg von 1,0 °C. Dieser Anstieg ist allerdings, wie Abb. 6.17 zeigt, nicht gleichmäßig erfolgt. Nach einem Anstieg bis 1911 folgte ab 1988 eine sehr warme Periode. Ein ähnliches Bild gibt die Abb. 6.17 für den Zeitraum 1761-2000 (*Schönwiese 2003*).

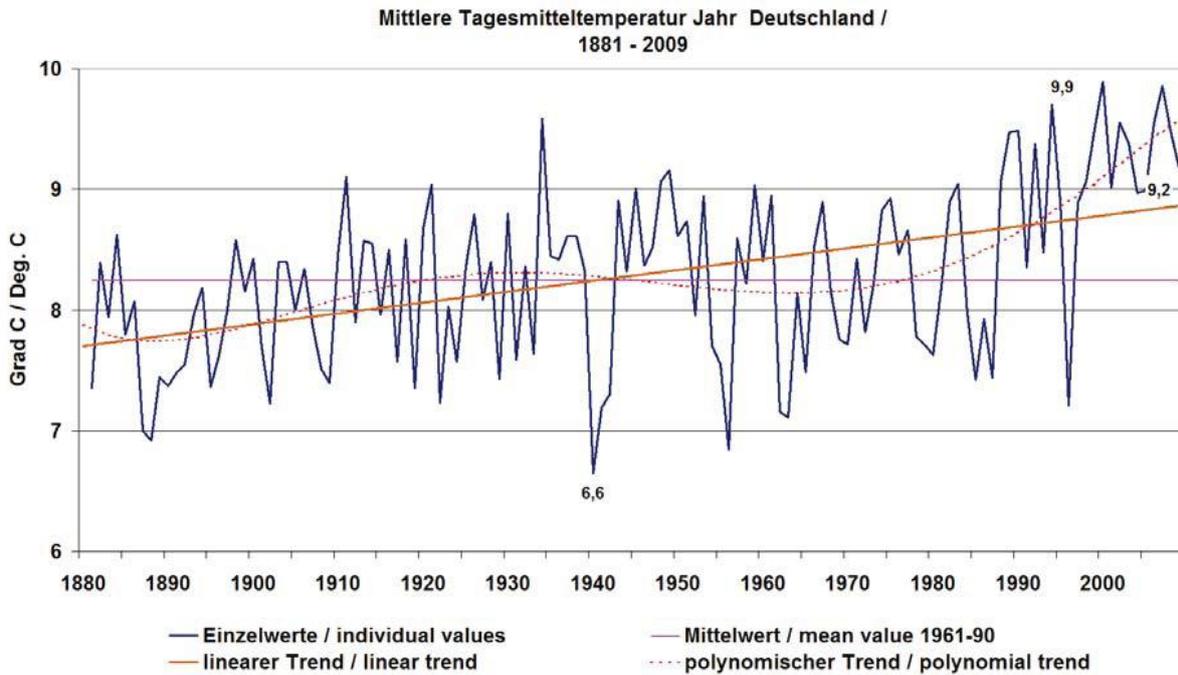


Abb. 6.17: mittlere Tagesmitteltemperatur in Deutschland 1901-2009 (DWD 2010, Klimastatusbericht 2009)

Zum Temperaturtrend in Deutschland trugen im 20. Jahrhundert alle Jahreszeiten etwa gleich bei. 1981 – 2000 hat sich mit 2,3° C im Winter gegenüber 0,7 °C im Sommer vor allem die winterliche Erwärmung verstärkt, während die herbstliche zum Stillstand gekommen ist (Abb. 6.18). Der Niederschlag hat im vergangenen Jahrhundert und vor allem in den drei letzten Jahrzehnten im Winter deutlich zugenommen (DWD 2010) (Abb. 6.18).

Der Sommer 2003 ist mit einer Anomalie von 3,4 °C über dem Mittelwert 1961-1990 seit 1761 der wärmste gewesen. Ein Trend zu einer Zunahme der Hitzetage in Deutschland ist ebenfalls seit einigen Jahrzehnten festzustellen (Schönwiese 2003, 2004, 2006).

Klimaelement, Zeitintervall	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
<b>Temperatur, 1901 – 2000</b>	+ 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
1961 – 1990	+ 0,8 °C	+ 0,4 °C	0	+ 1,7 °C	+ 0,7 °C
1971 – 2000	+ 1,7 °C	+ 0,9 °C	+ 0,7 °C	+ 0,7 °C	+ 1,0 °C
1981 – 2000	+ 1,3 °C	+ 0,7 °C	- 0,1 °C	+ 2,3 °C	+ 1,1 °C
<b>Niederschlag, 1901 – 2000</b>	+ 13 %	- 3 %	+ 9 %	+ 19 %	+ 9 %
1951 – 2000	+ 14 %	- 16 %	+ 18 %	+ 19 %	+ 6 %
1961 – 1990	- 9 %	- 8 %	+ 10 %	+ 20 %	+ 3 %
1971 – 2000	+ 13 %	+ 4 %	+ 14 %	+ 34 %	+ 15 %

Abb. 6.18: Übersicht der beobachteten Temperatur- und Niederschlagstrends in Deutschland 1901 -2000 (Rapp 2000; Schönwiese 2003, 2005, Quelle: Schönwiese 2008)

Wie Abb. 6.19 zeigt, hat die mittlere Niederschlagshöhe im Zeitraum 1881 – 2009 leicht zugenommen.

Mittlere Niederschlagshöhe Deutschland Jahr 1881-2009

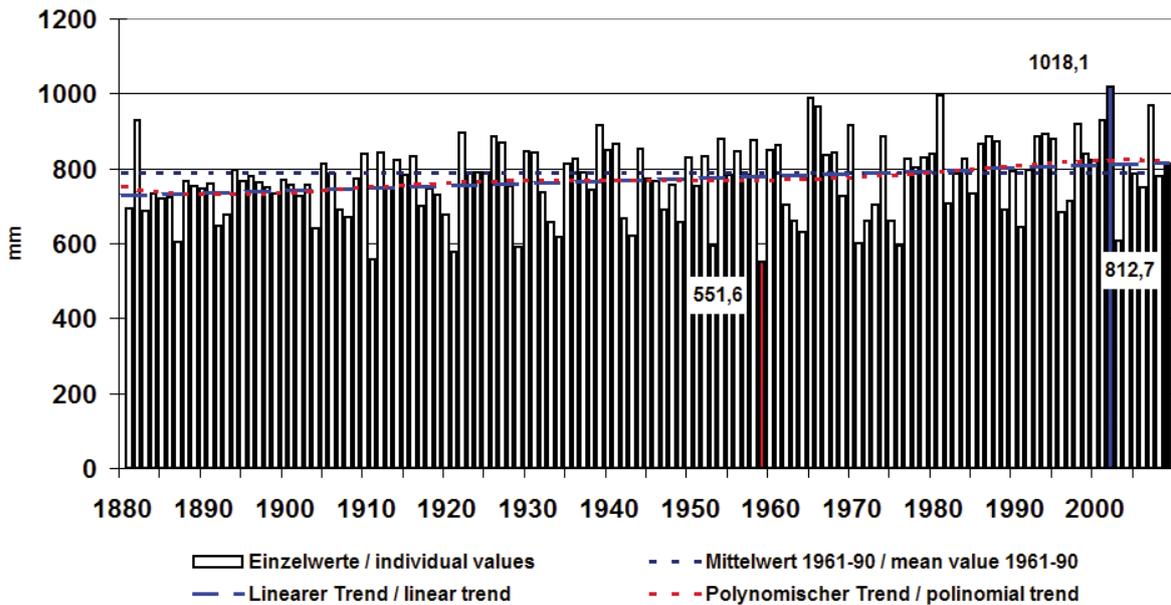


Abb. 6.19: Zeitreihen der Niederschlagshöhe im Jahr für das Gebietsmittel von Deutschland 1881 - 2009, (Quelle: DWD 2010, Klimastatusbericht 2009)

In Mitteleuropa gibt es Messreihen einzelner Stationen, die noch weiter bis ins 18. Jahrhundert zurückreichen und die ebenso hohe, teilweise bis in die 90er Jahre noch höhere Temperaturen aufwiesen. Die Erwärmung erschien zunächst bei diesen Stationen lediglich als eine Erholung von einer kühlen Phase im 18. Jahrhundert (DWD 2002). Für das Gebietsmittel in Deutschland seit 1761 bleibt jedoch der Erwärmungstrend erhalten (Abb. 6.20). Das gilt nach neueren Auswertungen auch für den Hohenpeißenberg (Böhm 2006). Die starke Temperaturerhöhung im Winter 1981 – 2000 kann mit dem positiven NAO-Index in diesem Zeitraum korreliert werden (Abb. 6.18) (Tinz 2002).

Deutschland-Temperatur, Jahresanomalien 1761-2007

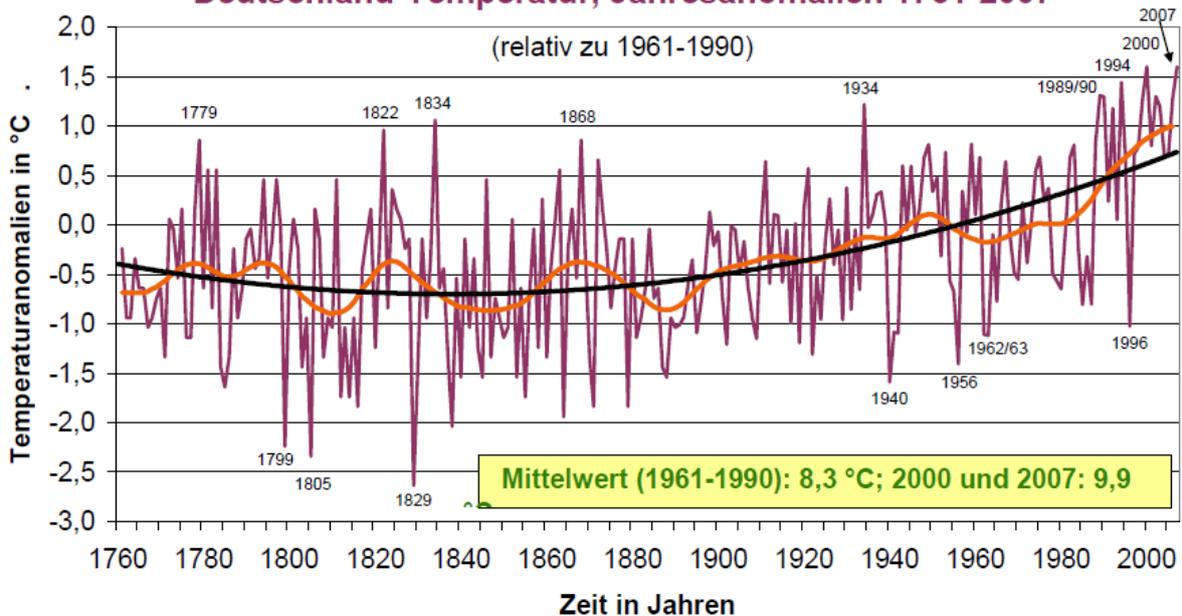


Abb. 6.20: Jahresanomalien 1761-2007 (relativ zu 1961-1990) des Gebietsmittels der bodennahen Lufttemperatur in Deutschland, lila, mit nicht-linearer Trendfunktion, schwarz, die jedoch ab 1901 in guter Näherung linear ist und eine Erwärmung um rund 1 °C anzeigt, sowie 30-jähriger Glättung, hellrot (Datenquelle: Rapp, 2000, ergänzt nach DWD 2008; bearbeitet, aus Schönwiese 2008).

Regionale Temperaturtrends werden überwiegend durch Zirkulationsanomalien bestimmt, die einen anthropogenen globalen Trend entweder verstärken oder auch abschwächen können. Regionale Temperaturtrends lassen deswegen nur sehr eingeschränkt Rückschlüsse auf globale anthropogene Einflüsse zu. Statistisch signifikant hat sich nach *Emmrich 2010* die Zirkulation der Westwindzone insbesondere im Sommer und Herbst von der Mitte des 20. Jahrhunderts bis 2008 verändert.

### 6.3 Troposphäre – Satellitenmessung

Bis etwa 2005 wurde die angebliche Diskrepanz in der Temperaturentwicklung in Bodennähe und in der Troposphäre intensiv in der Fachwelt diskutiert. Sie wurde zum Anlass genommen, eine durch den Menschen verursachte Klimaerwärmung in Zweifel zu ziehen, da nach den Klimamodellen in der Troposphäre eine geringfügig stärkere Erwärmung hätte auftreten müssen als in Bodennähe. Die Auswertung der Daten gab aber in den vergangenen 20 Jahren zunächst einen negativen Trend, dann nach ständigen Korrekturen einen positiven Trend. Die Unterschiede zu den Bodendaten ergaben sich vor allem in den Tropen und Subtropen.

#### Satellitenmessungen

Polarumlaufende Satelliten liefern seit 1979 eine nahezu lückenlose Beobachtung der Erdatmosphäre. Mit den von der nationalen „Ozean- und Wetterbehörde“ der USA, NOAA, betriebenen Satelliten (MSU (Microwave Sounding Unit), AMSU (Advanced MSU)) lassen sich die Temperatur und die Feuchte in der unteren Troposphäre indirekt über die Strahldichte in verschiedenen Spektralbereichen messen. Gemessen wird die Mikrowellenstrahlung von Sauerstoff mit spektral hoch auflösenden Spektrometern. Sauerstoff wird deswegen verwendet, da Temperaturprofile nur erstellt werden können, wenn die Verteilung der untersuchten Moleküle in der Atmosphäre bekannt und diese möglichst gleichförmig ist. Mit Hilfe der Strahldichte (Strahlungsfluss pro Flächeneinheit und Raumwinkel) wird dann über die Plancksche Strahlungsformel (s. Kap. 3.3) die Temperatur bestimmt. Die Intensität der Strahlung ist proportional der Temperatur in breiten vertikalen Schichten der Troposphäre.

Die ankommende Strahlung wird in verschiedenen Frequenzen gemessen; die verschiedenen Frequenzbänder (channels) umfassen jeweils bestimmte Bereiche der Atmosphäre, wobei Überlappungen z. B. zur unteren Stratosphäre vorkommen. Die Strahlungsänderung bei verschiedenen Frequenzen in der Nähe einer Spektrallinie lässt die Bestimmung von Temperaturprofilen zu.

Bei den NOAA-Satelliten handelt es sich um polarnahe, sonnensynchrone Satelliten, bei denen die lokale Sonnenzeit einer geographischen Breite beim Überflug des Satelliten immer nahezu die gleiche ist; d.h. ein bestimmter Ort wird immer zur gleichen Lokalzeit überflogen. Bei einer mittleren Flughöhe von 860 km beträgt die Umlaufperiode über den Polen ca. 106 Minuten.

Die Auswertung der Zeitreihe von inzwischen 11 verschiedenen Mikrosonden in den aufeinander folgenden Satelliten gestaltete sich besonders schwierig, z. B. infolge des Absinkens der Satelliten während ihrer Lebensdauer und ihrer Zeitdrift relativ zur lokalen solaren Zeit, die berechnet und entfernt werden muss. Die berechneten Temperaturtrends wurden in den nachfolgenden 15 Jahren mehrfach korrigiert. Die schwierige Verifizierung der nicht direkt gemessenen, sondern abgeleiteten Daten wurde mit Hilfe von Radiosondendaten versucht. Probleme ergaben sich jedoch auch hier, da die beiden Messsysteme nur bedingt vergleichbar sind. Zum einen erfolgen die Messungen nicht zeitgleich und zum anderen liefert die Radiosonde eine Punktmessung, der Satellit im günstigsten Fall ein Messgebiet von 1 km<sup>2</sup>. Außerdem werden beide Verfahren durch Messfehler beeinträchtigt (Radiosondenmessungen: Unsicherheit etwa 0,3 °C). Mithilfe eines automatischen Homogenisierungssystems für Radiosondenmessungen sollen die aufgetretenen Fehler vermieden bzw. verringert werden (*Titchner 2009*). *Sherwood 2008* hat nach der homogenisierten Auswertung von 527 Radiosondenstationen seit 1959 eine Erwärmung der Troposphäre in der Größenordnung wie an der Erdoberfläche gefunden.

Auch die in den vergangenen zwei Jahrzehnten gefundene starke Abkühlung in der Stratosphäre von 0,3 bis 0,4 °C pro Jahrzehnt hat wahrscheinlich den Temperaturtrend in der Tro-

osphäre beeinflusst. Da sich die Interpretation der Messdaten als äußerst schwierig gestaltete, wurden seit Beginn der Messungen 1978 viele Korrekturen vorgenommen, um die erkannten Fehler zu korrigieren. Zwei Gruppen in den USA – die UAH-Gruppe (*Spencer und Christy 2003, 2006*) und die RSS-Gruppe (*Mears, Wentz und Kollegen 2003, 2005, 2009*) – beschäftigten sich mit der Auswertung und kamen seit Jahren zu unterschiedlichen Trends, die sich jedoch immer mehr annäherten. Die Fehler durch die Drift der Satelliten, die durch das langsame Absinken im Lauf der Jahre auftrat und die Werte verfälschte, und die Fehler, durch den Ersatz der Satelliten wegen der geringen Laufzeit in Abständen von einigen Jahren, sowie die Ungenauigkeit der Satellitendaten wurden erkannt und nach und nach behoben. *Mears 2009* hat durch Einführung einer gewichteten Funktion den Stratosphäreneinfluss auf die Messergebnisse der satellitengestützten Mikrowellenmessungen der unteren Troposphäre ausgeschaltet und eine gute Übereinstimmung mit Radiosondenmessungen in der extratropischen Nordhemisphäre gefunden. Außerdem wurden Daten der verschiedenen Satelliten angepasst. Die stärkste Erwärmung war im Nordpolbereich zu verzeichnen. Die RSS-Gruppe kam zu einem etwas höheren globalen Trend von  $0,164\text{ °C}$  (1979 – 9/2010), während die UAH-Gruppe einen Trend von  $0,14\text{ °C}$  pro Jahrzehnt errechnete (Stand September 2010) (Abb. 6.23).

*IPCC 2007* stellt zusammenfassend fest: „Neue Analysen von Ballon- und Satellitengestützten Temperaturmessungen in der unteren und mittleren Troposphäre zeigen ähnliche Erwärmungsraten wie die Aufzeichnungen der Erdoberflächentemperatur und stimmen im Rahmen der jeweiligen Unsicherheiten mit diesen überein. Damit wird eine im TAR festgehaltene Unstimmigkeit weitgehend ausgeräumt. Abb. 6.21 zeigt den Temperaturtrend für Januar 1958 bis September 2010 für die untere Stratosphäre und Troposphäre. In Bereich der Tropen sind die Unterschiede der beiden Auswertegruppen (RSS und UAH) noch größer und (noch) nicht zufriedenstellend zu erklären (*Santer 2008*).

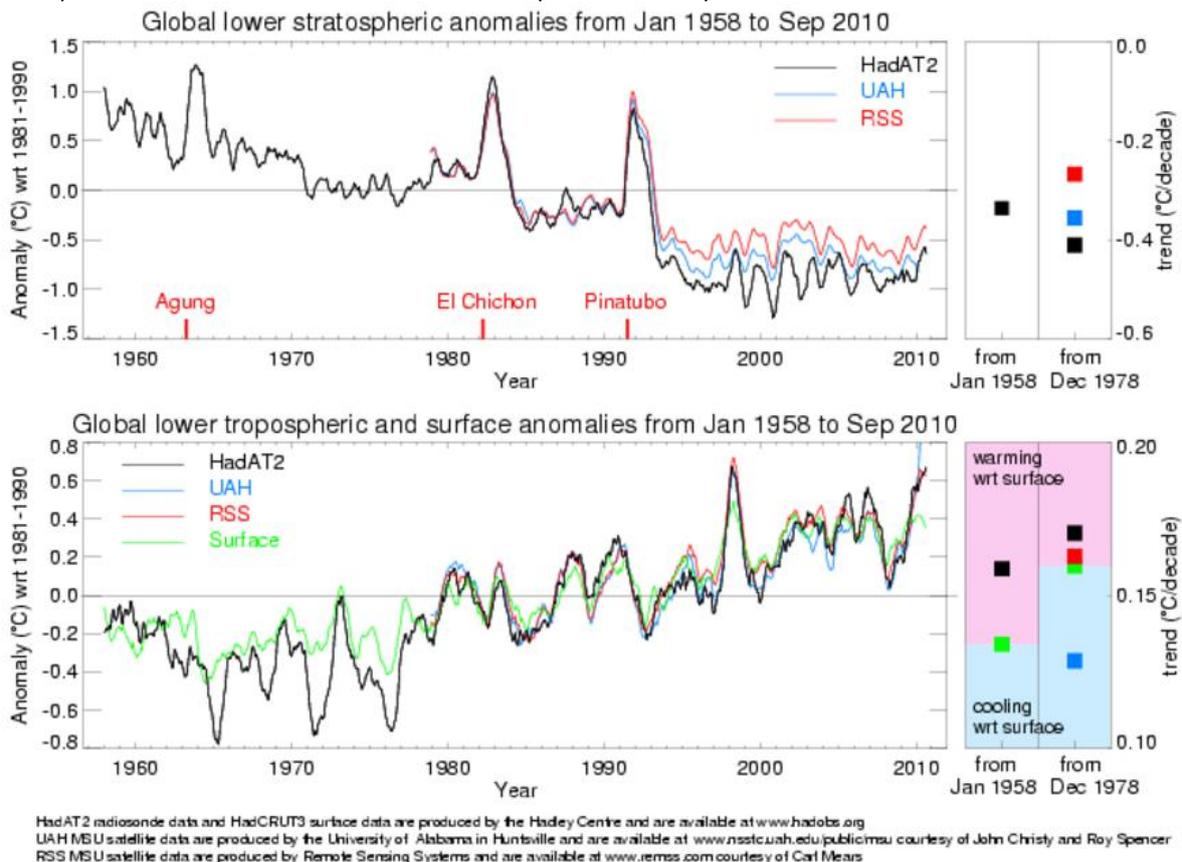


Abb.6.21:Die Abbildung zeigt die Auswertungen von Januar 1958 – Juni 2010 des positiven Temperaturtrends in der unteren Troposphäre (1978 – 2010: RSS (rot):  $0,17\text{ K/Dekade}$ , UAH (blau):  $0,08\text{ K/Dekade}$ ); (schwarz) globale Radiosondentemperatur HadAT (grün) Oberflächentemperatur HadCRUT3, die stärkere Erwärmung durch El Niño-Ereignisse ist deutlich zu sehen (z.B. 1997/98), im oberen Bild ist die Abkühlung in der unteren Stratosphäre und die zeitweise Erwärmung durch Vulkanausbrüche zu sehen. Stand September 2010, ([http://hadobs.metoffice.com/hadat/images/update\\_images/global\\_upper\\_air.png](http://hadobs.metoffice.com/hadat/images/update_images/global_upper_air.png))

Die beobachtete Abkühlung in der Stratosphäre ist - in Übereinstimmung mit den Modellen - durch die Ozonabnahme und den Anstieg der Treibhausgasemissionen bedingt (Abb. 6.21, 6.23).

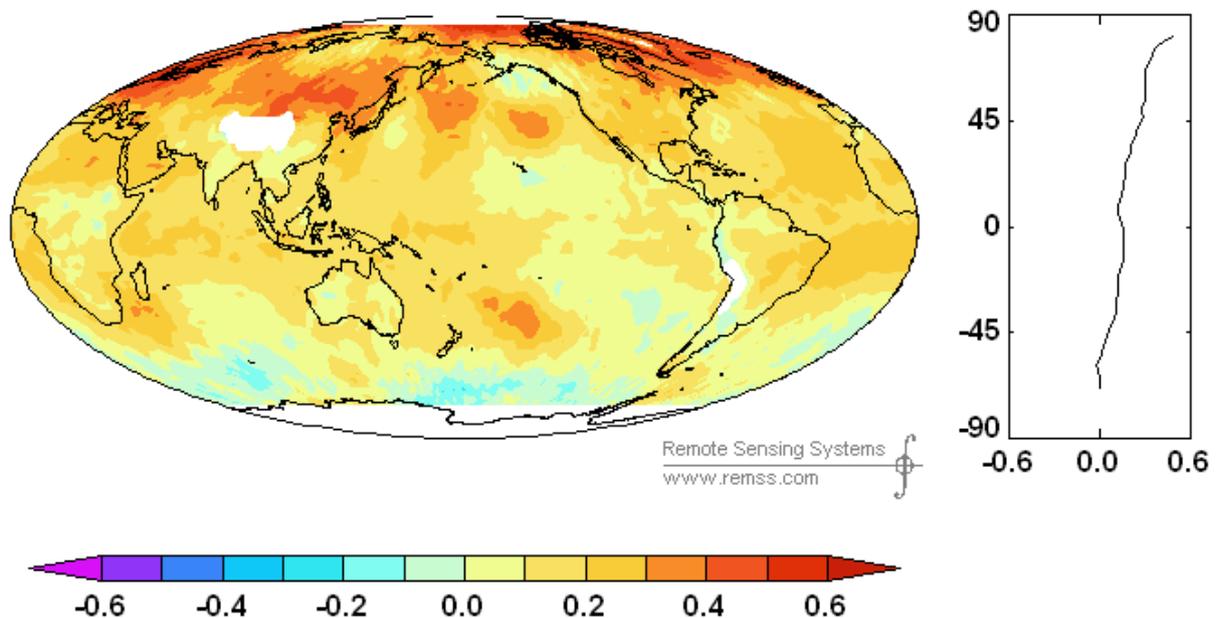


Abb. 6.22: Dekadischer Temperaturtrend der unteren Troposphäre, TLT (1979 - 2009). Daten polwärts von 82.5° Nord und 70° Süd, wie auch Regionen mit Land oder Eiserhebungen über 3000 m sind nicht verfügbar und werden in Weiß gezeigt. ([http://www.ssmi.com/msu/msu\\_data\\_description.html#figures](http://www.ssmi.com/msu/msu_data_description.html#figures))

Während sich die untere Troposphäre, wie die Abbildung 6.23 (rechts) zeigt, seit 1979 um 0,13 – 016 °C pro Jahrzehnt erwärmt, hat sich im gleichen Zeitraum die Stratosphäre um - 0,32 °C pro Dekade abgekühlt. Kurzzeitige Erwärmungen der unteren Troposphäre durch El Niño-Ereignisse, ebenso wie starke Erwärmungen der Stratosphäre nach großen Vulkanausbrüchen sind deutlich erkennbar. Abbildung 6.22 zeigt, dass die Erwärmungsrate regional unterschiedlich ist. Die stärkste Erwärmung findet sich um 40 °N und ab ca. 60 °N.

**Fazit:** Im Klimastatus Report 2009 (Arndt 2010) wurden Zeitreihen von 11 Indikatoren für einen Klimawandel zusammengefasst von denen erwartet wird, dass sie stark mit der Oberflächentemperatur korrelieren (Abb. 6.23). Die Abkühlung in der Stratosphäre wird aufgrund der Zunahme der Treibhausgase ebenfalls erwartet. Damit stützt sich die Feststellung im *IPCC 2007*, dass die Klimaerwärmung eindeutig ("warming of the climate system is unequivocal") ist, noch auf eine ganze Reihe weiterer Indikatoren wie z.B. die Aufnahme von Wärme im Ozean, das Schmelzen der Gletscher, der Rückgang der Schneebedeckung und des arktischen Eises, der Meeresspiegelanstieg und die Zunahme der Feuchtigkeit in der Atmosphäre (Abb. 6.23). Wenn die Berichte der Temperaturzunahme der Landoberfläche falsch wären, dann wäre es nach Arndt 2010 praktisch unmöglich die parallele Zunahme der anderen Indikatoren, die von vielen unabhängigen Gruppen erarbeitet wurden, zu erklären.

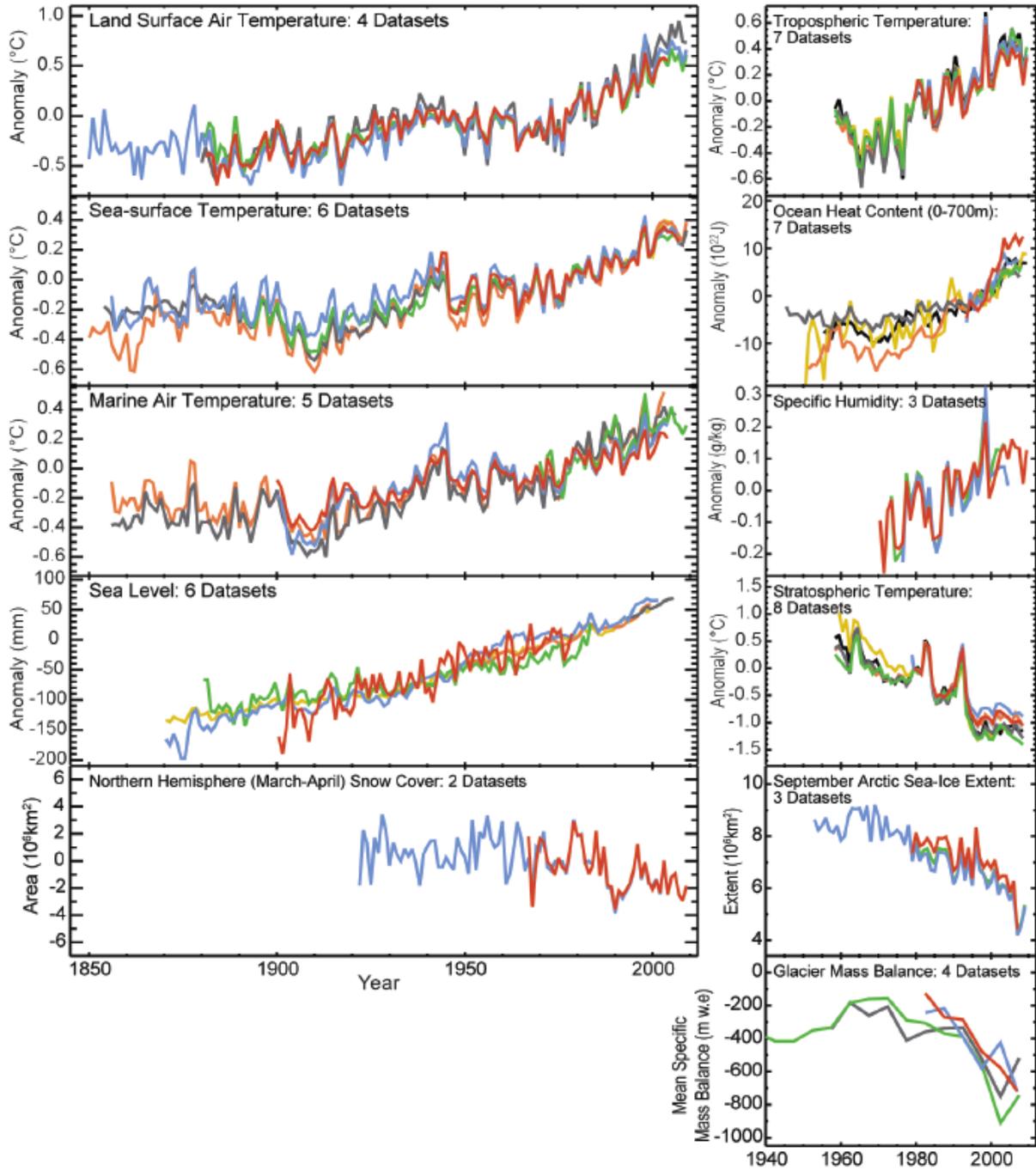


Abb. 6.23: Zeitreihen der Indikatoren für eine Klimaänderung aus dem Klimastatusbericht 2009 der NOAA. Alle geben einen Hinweis auf den temperaturbedingten Klimawandel (Arndt 2010)

## 7 Forschungseinrichtungen und -Programme ( IPCC u.a.)

Seit einigen Jahrzehnten beschäftigen sich zahlreiche internationale Organisationen mit den wissenschaftlichen Zusammenhängen des Klimawandels und seinen möglichen Folgen sowie den Überlegungen zur Vermeidung bzw. Anpassung an die zu erwartenden Klimaänderungen. Zahlreiche internationale und nationale Forschungsprogramme wurden auf den Weg gebracht.

### 7.1 IPCC

Beim Erdgipfel in Rio de Janeiro 1992 unterzeichneten 154 Staaten einen internationalen Vertrag – das Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. Die Regierungen sagten zu, den Ausstoß von Treibhausgasen – vor allem in den Industrieländern – zu reduzieren. Das Rahmenübereinkommen trat 1994 in Kraft. Mit der Konvention sollte ein Rahmen für Verhandlungen der Mitgliedsstaaten geschaffen werden mit dem Ziel, die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre zu stabilisieren und den Anstieg der Erdtemperatur aufzuhalten. 1997 wurde das Abkommen durch das Kyoto-Protokoll ergänzt, das 184 Mitgliedsstaaten unterschrieben haben, 2005 trat es in Kraft. Die wichtigste Aufgabe des Protokolls ist es, den jährlichen Treibhausgas-Ausstoß der Industrieländer bis 2012 um durchschnittlich 5,2 % gegenüber dem Stand von 1990 zu reduzieren. Umgesetzt werden soll dieses Ziel durch stärkere und rechtlich verbindliche Maßnahmen für 37 Industriestaaten.

Die Konferenz der Vertragsparteien (COP) bildet das oberste Gremium der Konvention und hat die höchste Autorität im Entscheidungsprozess. Dort treffen sich jährlich alle Mitgliedsstaaten der Konvention. Das Treffen der Vertragsparteien des Kyoto-Protokolls wird „CMP“ abgekürzt und bildet das oberste Gremium für das Kyoto-Protokoll. Es ist ein Verbund der Vertragsstaaten, die das Kyoto-Protokoll ratifiziert haben. Die CMP tagt jedes Jahr zur gleichen Zeit wie die COP. Die Abb. 7.1 zeigt die Stationen des internationalen Klimaschutzes 1992 – 2009 auf.

Die Konvention hat zwei ständige, untergeordnete Gremien geschaffen: das Nebenorgan für wissenschaftliche und technologische Beratung (SBSTA) und das Nebenorgan für die Durchführung des Übereinkommens (SBI). Diese beiden Institutionen beraten COP und CMP. Dafür haben die Nebenorgane jeweils ein spezielles Mandat. In der Regel tagen SBSTA und SBI mindestens zweimal im Jahr zur selben Zeit.

Die World Meteorological Organisation (WMO) und das United Nations Environment Programme (UNEP) riefen im Jahr 1988 einen internationalen, regierungsübergreifenden wissenschaftlichen Ausschuss, das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ins Leben, um alle Informationen über Klimaänderungen zu sammeln und zu analysieren. 1992 wurde dann auf der Umweltkonferenz von Rio de Janeiro die Klimarahmenkonvention verabschiedet. Die weiteren Stationen des internationalen Klimaschutzes sind in der Abbildung 7.1 dargestellt. Die Berichte des IPCC sollen Grundlage für die politischen Entscheidungsträger sein – insbesondere für die Entscheidungen im Rahmen der internationalen Klimaverhandlungen (COP). Das IPCC ist eine Hauptinformationsquelle bei den Verhandlungen im Rahmen der UNFCCC.

Überblick: Bisherige UN-Klimakonferenzen			
Umweltgipfel	Juni 1992	Rio de Janeiro	Agenda 21, globale Klimarahmenkonvention. Erster internationaler Vertrag, der den Klimawandel als ernstes Problem bezeichnet und die Staatengemeinschaft zum Handeln verpflichtet.
COP 1	Marz 1995	Berlin	„Berliner Mandat“ ist die Basis für Verhandlungen über ein Protokoll zur Verringerung von Treibhausgasemissionen.
COP 2	Juli 1996	Genf	
COP 3	Dez. 1997	Kyoto	Kyoto-Protokoll beschlossen.
COP 4	Nov. 1998	Buenos Aires	
COP 5	Okt. 1999	Bonn	
COP 6	Nov. 2000	Den Haag	Verhandlungen scheitern und werden ausgesetzt.
COP 6 Fortsetzung	Juli 2001	Bonn	Fortführung der Verhandlungen der 6. Klimakonferenz. Einigung über Ausgestaltung des Kyoto-Protokolls.
COP 7	Okt. 2001	Marrakesch	Entscheidungen zu Ausgestaltung und Umsetzung des Kyoto-Protokolls. Basis für internationale Ratifizierung des Kyoto-Protokolls auf dieser Konferenz festgelegt.
COP 8	Okt. 2002	New Delhi	
COP 9	Dez. 2003	Mailand	Bestandsaufnahme des internationalen Klimaschutzes
COP 10	Dez. 2004	Buenos Aires	Maßnahmen zur Minderung der vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen; Anpassung an die unvermeidlichen Folgen des Klimawandels
COP 11	Nov. 2005	Montreal	Fortschreibung des Kyoto-Protokolls über 2012 hinaus; Aushandlung neuer Grenzwerte für Treibhausgasemissionen.
COP 12	Nov. 2006	Nairobi	Gespräche über das Kyoto-Nachfolgeregime.
COP 13	Dez. 2007	Bali	„Bali Road Map“
COP 14	Dez. 2008	Posen	Übergang zu konkreten Verhandlungen über den Text eines internationalen Klimaschutzabkommens beschlossen.
COP 15	Dez. 2009	Kopenhagen	

Abb. 7.1: Stationen des internationalen Klimaschutzes 1992 – 2009; nach Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls am 16.2.2005 erstes Treffen der Vertragsparteien (CMP),

([http://imkkw1.physik.uni-karlsruhe.de/FREE/Kopenhagen2009\\_SueddeutschesKlimabuero.pdf](http://imkkw1.physik.uni-karlsruhe.de/FREE/Kopenhagen2009_SueddeutschesKlimabuero.pdf))

Das IPCC ist ein internationales Expertengremium von hunderten von Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen, die in ihren Berichten und Veröffentlichungen den Stand der weltweiten Forschung zum Klimawandel dokumentieren. Die wichtigsten Gremien des IPCC zeigt Abbildung 7.2. Im Jahre 2007 erhielt das IPCC den Friedensnobelpreis.

### 7.1.1 Aktuelle öffentliche Debatte über das IPCC (2010)

Sein Ende 2009 findet in den Medien, auf Internet Blogs und in der Öffentlichkeit eine Debatte über vermeintliche oder tatsächliche Fehler im letzten IPCC-Bericht statt. Analysen bestätigten die Fehler-Vorwürfe bisher in zwei konkreten Fällen. Dabei geht es um den Rückzug der Himalaya Gletscher und die Fläche in Holland, die unter dem Meeresspiegel liegen soll. Beide Fehler sind im Bericht der Arbeitsgruppe II enthalten und wurden inzwischen korrigiert. Eine Vielzahl anderer in den Medien (insbesondere in GB und USA) erhobener Vorwürfe sind inzwischen widerlegt worden (etwa zum Zusammenhang zwischen Klimaänderung und Zunahme von Naturkatastrophen, zum Rückgang des Amazonas-Regenwaldes, zur Wirkung des Klimawandels auf Ernährung und Wasserversorgung in Afrika).

Das niederländische Umweltministerium beauftragte die Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), eine umfassende Beurteilung der (im Synthesband aufgeführten) 32 Schlussfolgerungen zu den regionalen Auswirkungen der globalen Erwärmung und der zugrunde liegenden Kapitel der Arbeitsgruppe II vorzunehmen. Der am 10.7.2010 veröffentlichte PBL-Bericht kam insgesamt zu dem Ergebnis, dass die Schlussfolgerungen des

vierten IPCC-Berichts weiterhin zulässig seien. Neben einigen weiteren kleineren Fehlern wurde jedoch bemängelt, dass in der Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeitsgruppe II im Syntheseband negative Prognosen überbetont wurden und nicht das gesamte Spektrum der regionalen Auswirkungen genannt worden seien, ohne ausreichende Transparenz des Auswahlverfahrens (*PBL 2010*).

Das Nationale Komitee für Global Change Forschung und das Deutsche Klimakonsortium stehen in einem offenen Brief vom Mai 2010 hinter den Kernaussagen des vierten Sachstandsberichtes. Schlägt aber vor darüber nachzudenken, wie die Abläufe bei der Erstellung der Sachstandsberichte zeitgemäßer und die Diskussion der Inhalte durch externe Experten effizienter und transparenter gestaltet werden können (*NKGCF-DKK 2010*). Auch die amerikanische Umweltbehörde EPA hat in einem Bericht die Arbeit des IPCC kritisch untersucht und festgestellt, dass die gefundenen wenigen Fehler angesichts des Umfangs dieses Berichts nicht ungewöhnlich sind und die Glaubwürdigkeit des gesamten Berichtes mit allen seinen Aussagen nicht in Frage stellen (*EPA 2010*).

Als Reaktion auf die öffentliche Diskussion über Vorwürfe zu Ungenauigkeiten in IPCC-Berichten haben der Generalsekretär der Vereinten Nationen und der Vorsitzende des IPCC im März 2010 die internationale Dachorganisation der Wissenschaftsakademien Inter Academy Council (IAC) mit der Erstellung eines unabhängigen Expertengremiums zur Überprüfung der IPCC-Arbeitsweisen und -Verfahren beauftragt. Mit diesem Vorstoß soll die Qualität der Berichte weiter gesteigert und die Wiederherstellung des Vertrauens der Öffentlichkeit in den IPCC befördert werden. Das Überprüfungskomitee besteht aus 12 renommierten Experten aus unterschiedlichen Ländern und Disziplinen ([http://www.bmu.de/klimaschutz/internationale\\_klimapolitik/ipcc/doc/39274.php](http://www.bmu.de/klimaschutz/internationale_klimapolitik/ipcc/doc/39274.php)). Der Bericht wurde am 30. August 2010 veröffentlicht. Die wichtigsten Aussagen aus dem Bericht und der Pressemitteilung lauten (*IAC 2010*):

„Der vom UN-Weltklimarat (IPCC) verwendete Prozess zur Erstellung seiner periodischen Assessment-Reports war insgesamt erfolgreich, aber der IPCC benötigt sowohl eine grundlegende Reform seiner Managementstruktur und eine Festigung seiner Verfahren zur Handhabung von noch größeren und zunehmend komplexeren Klima-Assessments als auch intensivere öffentliche Überprüfungen, wie am besten auf die Klimaänderungen, mit denen sich die Welt auseinander setzt, reagiert werden soll. Der IAC-Bericht enthält einige Empfehlungen zur Untermauerung der IPCC-Managementstruktur einschließlich der, eine Exekutivkommission einzuführen, die im Namen des Gremiums handelt und gewährleistet, dass die Fähigkeit zur Entscheidungsfindung permanent erhalten bleibt.

Die Kommission untersuchte auch den IPCC Review-Prozess und stellte fest, „dass der Prozess gründlich ist, aber eine stärkere Durchsetzung bestehender IPCC-Review-Verfahren könnte die Anzahl der Fehler einschränken. Zu diesem Zweck sollte der IPCC die Reviewer dazu auffordern, ihre Autorität zu verwenden, um zu gewährleisten, dass alle Review-Kommentare adäquat berücksichtigt werden. Die Kommission empfahl bezüglich der Verwendung von sog. grauer Literatur (Berichte, Statistiken etc.), dass die Richtlinien spezifischer formuliert – einschließlich der Hinzufügung von Richtlinien über inakzeptable Literaturtypen – und strikt durchgesetzt werden, um zu gewährleisten, dass unveröffentlichte oder nicht referierte Literatur entsprechend gekennzeichnet wird.“

Die Kommission forderte mehr Übereinstimmung darüber, wie die Arbeitsgruppen Unsicherheiten charakterisieren. In den letzten Assessments Berichten verwendete jede Arbeitsgruppe unterschiedliche Variationen der IPCC Richtlinien zur Unsicherheit und die Kommission fand, dass die Anleitung nicht immer befolgt wurde. Der Bericht der Arbeitsgruppe II enthält z. B. viele Statements, denen hohe Vertrauenswerte zugesprochen wurden, für die aber nur wenige Beweise vorlagen. In zukünftigen Assessments Berichten müssen alle Arbeitsgruppen ihr Verständnis über einen Themenbereich durch die Beschreibung des Umfangs der zur Verfügung stehenden Beweise und des Grades der Übereinstimmung unter den Sachverständigen qualifizieren. Alle Arbeitsgruppen müssen anhand einer Wahrscheinlichkeitsskala, sofern dafür ausreichende Beweise vorlegen, das Auftreten eines bestimmten Ereignisses quantifizieren. Kritik wurde auch geübt an der langsamen und unzureichenden Reaktion des IPCCs sowohl auf die Aufdeckung von Fehlern in den letzten Assessments Berichten.

Auch der an maßgeblicher Stelle am AR4 mitarbeitende Prof. Phil Jones von der Climate Research Unit (CRU) der University East Anglia und Prof. Michael Mann kamen aufgrund

von Veröffentlichungen von tausenden „gehackten“ e-Mails in die Kritik. Sie wurden nach umfangreichen Untersuchungen mehrerer Ausschüsse und Komitees u.a. des britischen Parlaments bzw. einer Untersuchungskommission der Pennsylvania State University vom Juni 2010 voll rehabilitiert.

(<http://www.publications.parliament.uk/pa/cm200910/cmselect/cmsctech/387/387i.pdf>,

<http://www.cce-review.org>),

([http://live.psu.edu/fullimg/userpics/10026/Final\\_Investigation\\_Report.pdf](http://live.psu.edu/fullimg/userpics/10026/Final_Investigation_Report.pdf)).

Zurzeit wird der Fünfte Sachstandsbericht (AR5) des IPCC durch 500 im Jahre 2010 ausgewählten Fachleuten erarbeitet, dessen Veröffentlichung für 2013/2014 geplant ist.

### 7.1.2 Die Arbeitsgruppen des IPCC

Alle Nationen, die Mitglieder der WMO oder des UNEP sind, sind auch Mitglieder des IPCC und seiner drei Arbeitsgruppen, die unterschiedliche Aspekte der Problematik des Klimawandels behandeln (Abb. 7.2).

Das IPCC betreibt selbst keine eigene Forschung, sondern trägt die Ergebnisse vieler tausender weltweit tätiger Forscher in öffentlich zugänglichen Berichten, den "IPCC Assessment Reports" (IPCC AR) zusammen. Aufgabe des zwischenstaatlichen Ausschusses ist es, die besten verfügbaren wissenschaftlichen, technischen und sozioökonomischen Erkenntnisse zum Klimawandel weltweit umfassend, objektiv, offen und auf eine transparente Art und Weise zu bewerten. Die Bewertungen basieren auf Informationen aus wissenschaftlicher Literatur, die das peer-review-Verfahren durchlaufen hat, sowie, falls angemessen dokumentiert, Literatur aus der Industrie und anderen Bereichen. Sie ziehen die Arbeit hunderter Experten aus allen Regionen der Welt heran. Hunderte Forscher beteiligen sich mit Kommentaren und Kritik an der Diskussion beteiligt, unabhängige Review Editors achten darauf, dass die Endfassung alles angemessen berücksichtigt (*DMG Mitteilungen 1/2007*).

Der IPCC erstellt hauptsächlich Sachstandsberichte (Assessment Reports), Sonderberichte (Special Reports), Methodik-Berichte (Methodology Reports) und Technische Abhandlungen (Technical Papers). Jeder IPCC-Bericht beinhaltet eine Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger (Summary for Policymakers) in allen offiziellen Sprachen der Vereinten Nationen. Diese Zusammenfassungen sollen das aktuelle Verständnis über die Thematik widerspiegeln und sind auf eine für Laien verständliche Art und Weise verfasst.

Die erste Arbeitsgruppe (AG I) beschäftigt sich mit den wissenschaftlichen Erkenntnissen über die klimabestimmenden Faktoren. In der zweiten Arbeitsgruppe (AG II) werden die ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen der globalen Erwärmung auf den Lebensraum Erde untersucht, die dritte Arbeitsgruppe (AG III) analysiert mögliche Strategien zur Bekämpfung des Treibhauseffektes.

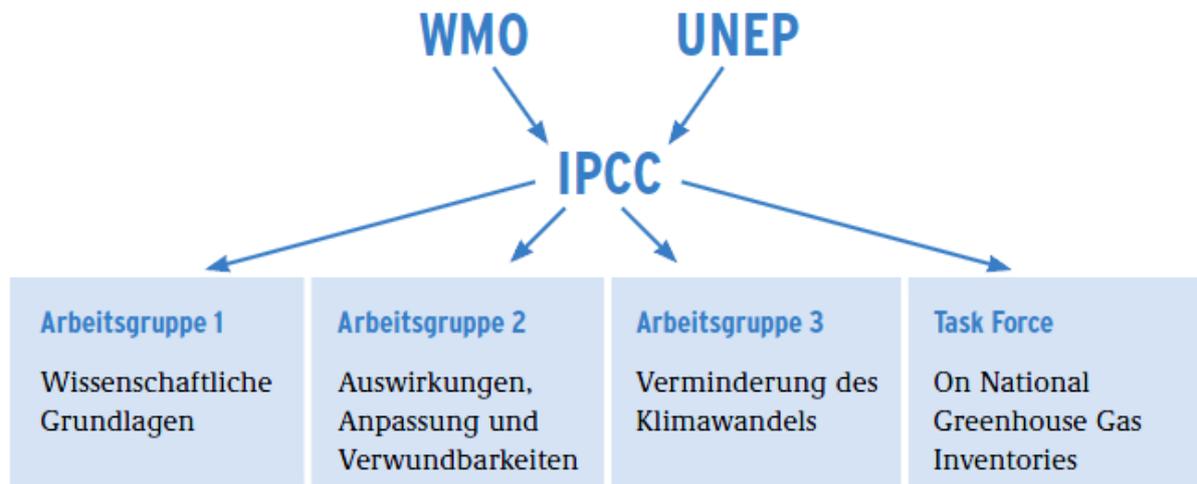


Abb. 7.2: Organisatorische Struktur des IPCC mit den 3 Arbeitsgruppen (UBA, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3840.pdf>)

IPCC-Arbeitsgruppen und jede Projektgruppe des IPCC haben klar umrissene, von der Vollversammlung verabschiedete Mandate und Arbeitspläne und werden von je zwei Co-Chairs geleitet. IPCC-Arbeitsgruppen auf der Ebene von Regierungsvertretern in der Vollversammlung einigen sich auf die Ziele eines Berichts, der dann von der jeweiligen Arbeitsgruppe erstellt wird, bieten Hilfe bei der Auswahl der Autoren und verabschieden später die Inhalte des Berichts und die Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Die Berichte werden von Autoren-Teams erstellt, aber die Regierungen sind aufgefordert, Kommentare während der Begutachtungsphase anzubringen. Die Erstellung von IPCC Veröffentlichungen folgt genau definierten Abläufen, die vom Ausschuss verabschiedet wurden (siehe Abb. 7.3) und das Vorgehen ist in einem 14-seitigen Papier genau festgelegt (<http://www.ipcc.ch/pdf/ipcc-principles/ipcc-principles-appendix-a.pdf>),

Die bisherigen vier Berichte der drei Arbeitsgruppen sind 1990, 1995, 2001 und 2007 erschienen. Für jeden Band gibt es ein Summary for Policymakers (SPM) und ein Technical Summary (TS). Ersteres wird auf mehreren Plenarsitzungen des IPCC Zeile für Zeile einem „approval“ unterzogen. Über strittige Formulierungen muss Einigkeit erzielt werden. Das TS unterliegt keinem so aufwändigen Verfahren, es muss aber vom Plenum angenommen („accepted“) werden. Eine Zusammenfassung der drei Berichte enthält der Synthesis Report (SR), in dem eine Reihe von Fragen beantwortet wird. Dieser werden ebenfalls einem „approval“ unterzogen. Diese Berichte sind auch in Deutsch erschienen.

Seit dem ersten Bericht von 1990 ist die Kenntnis zahlreicher darin beschriebener Zusammenhänge sicherer und vollständiger geworden, und es wurden beträchtliche Fortschritte beim Verständnis der Klimaänderungen erzielt. Dennoch sind viele Aussagen mit mehr oder minder großen Unsicherheiten behaftet. Um Kritik vorzubeugen, wurde für den Umgang mit der Unsicherheit ein sehr differenziertes System von Wahrscheinlichkeitswerten eingeführt. Insbesondere in der AG I „Wissenschaftliche Grundlagen“ wurde für das Zutreffen von Aussagen Angaben wie „sehr wahrscheinlich“ (90 – 99 % Wahrscheinlichkeit), „wahrscheinlich“ (66 – 90 % Wahrscheinlichkeit) bis hin zu „außerordentlich unwahrscheinlich“ (< 1 % Wahrscheinlichkeit) eingeführt.

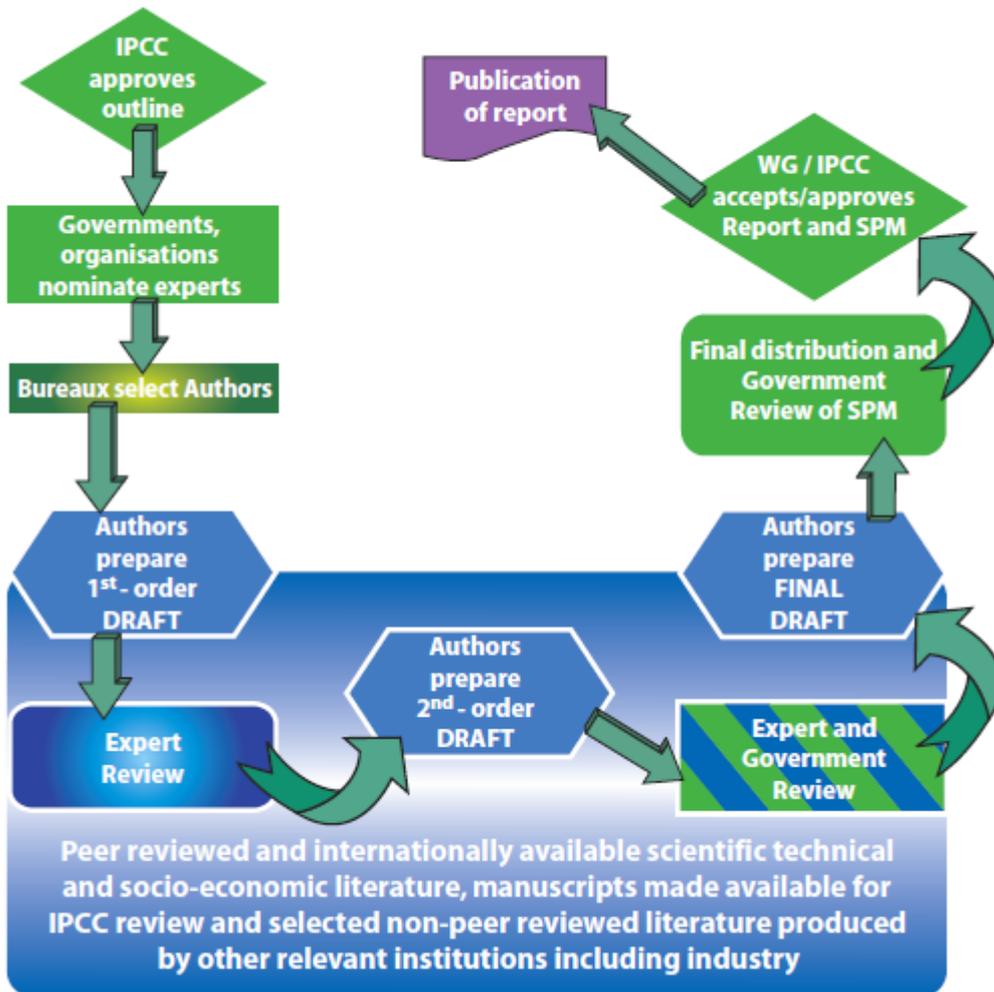


Abb. 7.3 : Ablaufschema des IPCC zur Erstellung der Sachstandsberichte  
([http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data.htm)).

Die Art der Berichterstattung und die Kriterien der Auswahl der Autoren sind ebenfalls in den IPCC-Prinzipien festgelegt. IPCC-Berichte bestehen aus Kapiteln, die von Autorenteamen in einem dreistufigen Verfahren verfasst werden. Jede Stufe wird gemäß dem Ablaufschema in Abb. 7.3 einer internationalen Begutachtung durch externe Wissenschaftler und Experten sowie Regierungen unterzogen.

Einige Kennzahlen sollen einen Eindruck der Komplexität und des Umfangs dieses Prozesses vermitteln. Der letzte Zustandsbericht der Arbeitsgruppe I von 2007 wurde von 152 Autoren aus 32 Ländern verfasst und umfasste 11 Kapitel auf 904 Seiten ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)). Über 6000 wissenschaftliche Arbeiten wurden zitiert. Sämtliche der über 30 000 Kommentare zu den Entwürfen des Berichts wurden von den Autorenteamen einzeln beantwortet und sind im Internet publiziert. Die Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger wurde in der IPCC-Plenarversammlung vom Januar 2007 verabschiedet, in welcher Delegierte von 113 Ländern den Text Wort für Wort verhandelten. (<http://www.climate.unibe.ch/~stocker/papers/stocker10nzz.pdf>)

Der vierte Sachstandsbericht (AR4) besteht aus den Berichten der drei Arbeitsgruppen I, II und III des IPCC (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>). 2 500 wissenschaftliche Experten (Reviewer), 800 beitragende Autoren und 450 leitende Autoren aus 130 Ländern haben 6 Jahre an diesem Bericht gearbeitet. (<http://www.ipcc.ch/pdf/press-ar4/ipcc-flyer-low.pdf>)

- **Band I** („Wissenschaftliche Grundlagen“) konzentriert sich auf diejenigen Aspekte des aktuellen Verständnisses des physikalischen Wissens zur Klimaänderung, das als für politische Entscheidungsträger am sachdienlichsten eingeschätzt wird. Er besteht aus 11 Kapiteln (996 Seiten), welche die Fortschritte in der Klimawissenschaft, die Änderungen der klimarelevanten

ten atmosphärischen Bestandteile, die ausgedehnten zur Verfügung stehenden Beobachtungen am Boden und in der Atmosphäre, die Entwicklung des Klimas in der Vergangenheit, die Erkennung und Zuordnung von menschlichen Einflüssen auf die jüngste Klimaentwicklung, den Einsatz von Modellen für die Simulation des Klimas sowie Projektionen der Entwicklung des zukünftigen globalen und regionalen Klimas beschreiben.

- **Band II** („Auswirkungen, Anpassung und Verwundbarkeiten“) ist auf die Umwelt-, sozialen und ökonomischen Folgen der Klimaänderung und mögliche Anpassungsmaßnahmen ausgerichtet. Er besteht aus 19 Kapiteln (976 Seiten) und behandelt die Empfindlichkeit, Anpassungsfähigkeit und Verwundbarkeit von natürlichen und sozioökonomischen Systemen bezüglich der Klimaänderung sowie die möglichen Folgen und Anpassungsmöglichkeiten auf regionaler und globaler Ebene.

- **Band III** („Verminderung des Klimawandels“) besteht aus 13 Kapiteln (851 Seiten) und befasst sich mit kurz- und langfristigem Klimaschutz in den Sektoren Energie, Verkehr, Gebäude, Industrie, Land- und Forstwirtschaft und Abfall, mit den Zusammenhängen zwischen Klimaschutz und nachhaltiger Entwicklung sowie mit politischen Anstrengungen, Maßnahmen und Instrumenten für den Klimaschutz.

### 7.1.3 Wesentliche Ergebnisse des 4. IPCC Berichtes (AR4)

2007 wurde der **vierte Sachstandsbericht (AR4) des IPCC** veröffentlicht. Die Aussagen des 3. Berichtes (TAR) wurden im Wesentlichen bestätigt und noch verstärkt (siehe auch Kap. 8.2.3). Die wichtigsten Aussagen sind:

**Globale Erwärmung (Modellrechnungen):** Aufgrund eines besseren Modellverständnisses liefert das IPCC zum ersten Mal „beste Schätzungen“ mit Unsicherheitsbereichen für die Erwärmung, die aufgrund der Modellrechnungen mit steigenden Treibhausgasemissionen im 21. Jahrhundert projiziert werden. Die „beste Schätzung“ für ein niedriges Emissionsszenario ist eine Erwärmung von 1,8°C im Laufe des 21. Jahrhunderts, mit einer Schwankungsbreite von 1,1 bis 2,9°C. Die „beste Schätzung“ für ein hohes Szenario ist 4,0°C (Schwankungsbreite: 2,4 bis 6,4°C). Diese Spannen sind weitestgehend konsistent mit der im TAR projizierten Spanne (1,4 – 5,8°C).

**Temperatur:** Der lineare globale, mittlere 100-Jahrestrend (1906 bis 2005) von 0,74° C ist größer als der entsprechende Trend vom TAR (0,6° C im Zeitraum von 1901-2000). Die Erwärmungsrate für die letzten 50 Jahre ist nahezu doppelt so groß wie die für die vergangenen 100 Jahre. Verantwortlich dafür ist die jüngste Serie extrem warmer Jahre. Es gilt als „sehr wahrscheinlich“, dass im weltweiten Durchschnitt menschliches Handeln seit 1750 das Klima erwärmt hat – vorrangig durch den fossilen Brennstoffverbrauch, die Landwirtschaft und eine geänderte Landnutzung

Der **Meeresspiegel** stieg von 1961 bis 2003 mit einer jährlichen Durchschnittsrate von 1,8 mm; diese Rate erhöhte sich zwischen 1993 und 2003 auf 3,1 mm pro Jahr. Die Modelle ergeben aufgrund eines besseren Verständnisses im Laufe des 21. Jahrhunderts einen Meeresspiegelanstieg von 18-38 cm für ein niedriges Szenario und 26 bis 59 cm für ein hohes Szenario gegenüber 9 – 88 cm im TAR. Jedoch kann ein Anstieg bis zu einem Meter bis 2100 nicht ausgeschlossen werden, wenn Eisflächen bei steigender Temperatur weiter abschmelzen.

**Eisschmelze:** Gebirgsgletscher und Schneebedeckung der Erde haben sich verringert. Gletscher- und Eiskappenschwund (ohne Grönland und Antarktis) haben den Meeresspiegel zwischen 1961 und 2003 um 0,50 mm pro Jahr und von 1993 bis 2003 um 0,77 mm pro Jahr steigen lassen.

Die durchschnittlichen Temperaturen stiegen in der **Arktis** in den vergangenen 100 Jahren doppelt so schnell wie im globalen Durchschnitt. Seit den 1980er Jahren stieg die Temperatur auf arktischen Dauerfrostböden im Allgemeinen um 3°C.

**Arktisches Meereis** ist seit 1978 durchschnittlich um 2,7% pro Jahrzehnt geschrumpft ist, im Sommer um 7,4% pro Jahrzehnt. Das Meereis wird in der Arktis und Antarktis weiter zurückgehen. Weite Bereiche des arktischen Ozeans könnten bis Ende des 21. Jahrhunderts ihre Meereisdecke verlieren, wenn die anthropogenen Emissionen den oberen Bereich der gegenwärtigen Abschätzungen erreichen würden.

Die **Schneebedeckung** hat besonders im Frühjahr in den meisten Regionen abgenommen. Die maximale Ausdehnung des gefrorenen Bodens (Permafrost) hat in der Winter/Frühjahr Saison in der nördlichen Hemisphäre in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts um 7 % abgenommen.

Langfristige Trends der **Niederschläge** wurden von 1900 bis 2005 in vielen Regionen beobachtet, zum Beispiel eine deutliche Zunahme in den östlichen Teilen Nord- und Südamerikas, in Nordeuropa und in Nord- und Zentralasien. Austrocknen in Westafrika (Sahel), im Mittelmeerraum, im südlichen Afrika und in Teilen Südasiens. Die Dürren in den Tropen und Subtropen haben sich seit den 1970er-Jahren verlängert und sind intensiver geworden. Sehr wahrscheinlich wird dieser Trend zunehmen.

Die Häufigkeit von **Stark-Niederschläge** hat zugenommen und stimmt mit der erwärmungsbedingten Zunahme des Wasserdampfgehalts der Lufthülle überein.

**Temperaturextreme und Hitzewellen** haben in den letzten 50 Jahren zugenommen. Die Andauer und Intensität von Dürren haben sich seit den 1970er Jahren über weite Gebiete verstärkt, besonders in den Tropen und Subtropen. Der Sahel, das Mittelmeergebiet, Südafrika und Teile vom südlichen Asien sind bereits im 20. Jahrhundert trockener geworden. Es gilt als „sehr wahrscheinlich“, dass dieser Trend sich im 21. Jahrhundert fortsetzt.

Werden die **Treibhausgas-Emissionen** nicht verringert, ist eine Zunahme von 0,2°C pro Dekade für die nächsten 30 Jahre sehr wahrscheinlich. Werden Treibhausgase weiter wie derzeit oder in noch höheren Mengen freigesetzt, wird eine weitere Erderwärmung verursacht.

**Klimasensitivität:** Bei Verdoppelung der Kohlendioxid-Konzentration gegenüber dem vorindustriellen Wert steigt die globale Durchschnittstemperatur um 2,0 bis 4,5°C (TAR: 1,4 bis 4,5°C); die beste Schätzung liegt bei etwa 3,0°C (frühere Schätzung; 2,5°C).

Die Menge von **Kohlendioxid und Methan**, die sich jetzt in der Atmosphäre befinden, überschreiten bei weitem die bis zu 650 000 Jahre zurückgehenden vorindustriellen Werte. Kohlendioxid ist von einem vorindustriellen Wert von 280 ppm auf 379 ppm 2005 und Methan von 715 ppb auf 1774 ppb 2005 angestiegen.

Die **Ergebnisse der Klimamodellrechnungen** zeigen, dass sich die beobachteten Klimatrends im 21. Jahrhundert fortsetzen werden (s. Kap.8.2.3).

Seit dem 3. Bericht (TAR) wurde eine Reihe von breit diskutierten Unsicherheiten gelöst. So z.B. die Temperaturdifferenzen durch Satellitenmessungen in der Troposphäre, die nun mit den Bodenmessungen übereinstimmen. Bedeutende Unsicherheiten sind weiterhin die Rolle der Wolken, die Kryosphäre (Gletscher und Eiskappen), Ozeane, Entwaldung und andere Landnutzungsänderungen und die Verknüpfung von Klima und biogeochemische Prozesse (IPCC 2007).

## 7.2 Forschungsprogramme

Seit Beginn der 80er Jahre wurden weltweit zahlreiche Klimaforschungsprogramme ins Leben gerufen. Das World Climate Research Program (WCRP) wurde 1980 von ICSU (International Council of Science) und der WMO (World Meteorological Organisation) gegründet. Ziel ist es, festzustellen, in welchem Umfang natürliche Klimaschwankungen sowie der anthropogene Einfluss vorhergesagt werden können. Hierzu sollten die Zustandsbeschreibung des Klimas, die Modellbildung, die entscheidenden Klimaprozesse und die zukünftige Klimaentwicklung erforscht werden (Lemke 2003). Nachfolgend sind die wichtigsten Unterprogramme aufgeführt ([http://www.wmo.int/pages/summary/progs\\_struct\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/summary/progs_struct_en.html)):

Die Arctic Climate System Study (**ACSYS**) und ihr Nachfolgeprojekt Climate and Cryosphere (**CLIC**) befassen sich seit 1994 mit der Beobachtung und Modellierung des arktischen Ozeans und der darüber liegenden Atmosphäre sowie mit der Rolle der Arktis im Klimasystem. Das Projekt **CLIC** untersucht die gesamte globale Kryosphäre.

Das Projekt **CLIVAR** (Climate Variability and Predictability Programme) beschäftigt sich seit 1995 mit den Grundlagen der natürlichen Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit des globalen gekoppelten Klimasystems. Das Global Energy and Water Cycle Experiment (**GEWEX**), Stratospheric Processes And Their Role In Climate (**SPARC**) und das World Ocean Circulation Experiment (**WOCE**) sind weitere Unterprogramme des WCRP. Wichtig für die Modellentwicklung ist auch die Working Group on Coupled Modelling (**WGCM**) und das IGBP's

Global Analyses Integration and Modelling (**GAIM**) sowie das Coupled Model Intercomparison Project (**CMIP**), das Vergleiche der einzelnen Modelle durchführt. Das Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) unterstützt das CMIP. Mit dem Vergleichsprojekt CMIP5 für den 5. IPCC Bericht wurde bereits begonnen.

In Deutschland wurde nach dem 2006 ausgelaufenen **DEKLIM** Programm vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Hightech-Strategie zum Klimaschutz entwickelt. Die BMBF-Fördermaßnahme "**klimazwei** - Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen" des Rahmenprogramms "Forschung für Nachhaltigkeit" (**FONA**) dient der Entwicklung praxisorientierter Handlungsstrategien. Der Regionalwettbewerb **KLIMZUG** unterstützt Regionen bei der Anpassung an den Klimawandel und im Programm (**MiKiIP**) werden „Mittelfristige Klimaprognosen“ werden durchgeführt. Ein weiteres Großforschungsprojektes BIOACID (**B**iological **I**mpacts of **O**cean **ACID**ification) soll die Auswirkungen der Versauerung der Meere erforschen (<http://www.bioacid.de>).

Daneben gibt es noch zahlreiche weitere internationale und auch nationale Forschungsprogramme. In USA ein sehr umfangreiches Programm, das so genannte U.S. Global Change Research Programme (**USGCRP**) (<http://www.globalchange.gov/about/overview>). Die EU führt ebenfalls zahlreiche Forschungsprogramme durch ( **MICE** (Modelling the Impact of Climate Extremes), **PRUDENCE** (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects), **STARDEX** ("STAtistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions"). Weiterhin gibt es noch das internationale **Geosphere-Biosphere Programme (IGBP)**.

## 8 Klimamodelle und Modellergebnisse

Physikalisch begründete Klimamodelle dienen dem Verständnis des heutigen Klimas, um darauf aufbauend sowohl vergangene als auch in der Zukunft zu erwartende Klimazustände zu simulieren. Wie in den meisten Modellen üblich, müssen die komplexen Prozesse und Wirkungsgefüge der realen Welt vereinfacht abgebildet werden. Der Grad der Vereinfachung ist je nach Modelltyp sehr unterschiedlich.

Modelle versuchen, auf der Grundlage physikalischer Gesetze und mathematischer Gleichungen und einer großen Anzahl Parametrisierungen für Prozesse, die nur in ihrer Wirkung beschrieben werden können, die atmosphärischen Vorgänge zu simulieren. Sie sind nicht perfekt, aber ein wichtiges Werkzeug in der Klimaforschung. Ziel gegenwärtiger Klimamodelle ist es, durch Einbeziehung möglichst vieler relevanter Prozesse die Wirklichkeit so realitätsnah wie möglich abzubilden. Modelle beschreiben aber immer nur einen Teil der Wirklichkeit, da nicht alle Prozesse und Parameter berücksichtigt werden können (von Storch 2005).

### 8.1 Klimamodelle

Klimamodelle beschreiben das Klimasystem der Erde in physikalisch-mathematischen Gleichungen, die von einem Computer numerisch gelöst werden können. Sie bestehen aus der Verknüpfung grundlegender physikalischer Gesetze, die in Form von Differentialgleichungen die wichtigsten atmosphärischen Prozesse und Zustandsvariablen berechnen. Diese bilden soweit möglich das Zusammenwirken der einzelnen Teile des komplexen Klimasystems und deren interne Änderungsprozesse ab. Daraus „errechnet“ der Computer die Abfolge von Wetter, d.h. die für einen Ort oder größeren Raum charakteristische Verteilung der häufigsten mittleren und extremen Wetterzustände und Witterungsvorgänge (Cubasch 2007). Hieraus wird dann die Statistik des Wetters – also das Klima – abgeleitet (von Storch 2005).

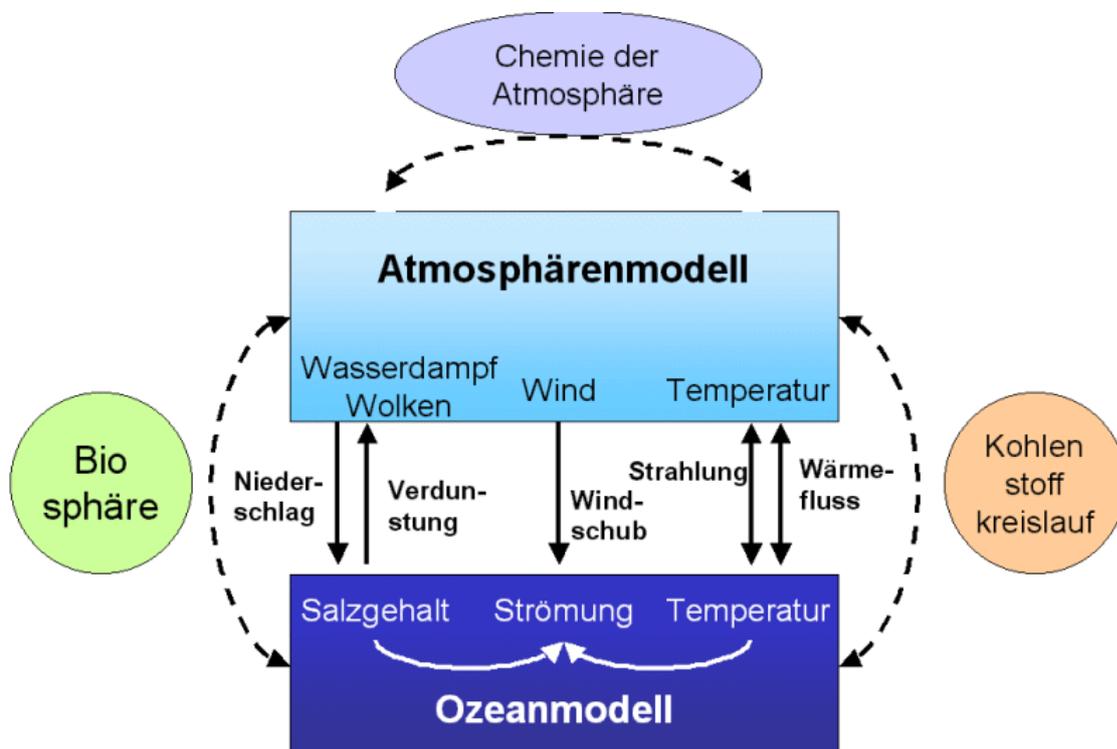


Abb. 8.1: Schema für ein gekoppeltes Atmosphäre-Ozean-Modell und ergänzende Modelle für Kohlenstoffkreislauf und Biosphäre (<http://www.atmosphere.mpg.de/enid/ACCENTde>)

Energiebilanzmodelle (EBM) weisen die einfachste Struktur unter den Klimamodelle auf. Aus der Bilanzierung der solaren Einstrahlung und der terrestrischen Abstrahlung wird die global gemittelte, bodennahe Lufttemperatur bestimmt. Bei den zweidimensionalen Strah-

lungs-Konvektionsmodellen wird der Austausch von Impuls, Energie und Masse berücksichtigt und Temperatur, Feuchte- und Strahlungsflüsse in vertikaler Richtung erfasst. Damit wird der Einfluss der Strahlung, der Wolkenbildung und der Konvektion auf das globale Klima bestimmt. Diese einfachen Ansätze haben ihre Berechtigung zur raschen Bestimmung des statistischen Verhaltens einzelner Klimaelemente.

Ein vollständiges Klimamodell sollte die physikalische Beschreibung aller Klimakomponenten enthalten und ebenfalls ihre Kopplung berücksichtigen (Abb. 8.1). Das Klimasystem der Erde (Kap.1.1) besteht aus 5 Komponenten: der Atmosphäre, in der sich das Wetter abspielt, diese steht in Wechselwirkung mit der Hydrosphäre (Ozean und Wasserkreislauf) und der Kryosphäre (Eis und Schnee), der Biosphäre (Pflanzen und Tiere) sowie der Geosphäre (Boden und Gestein). Die Wechselwirkungen finden in sehr unterschiedlichen Zeitskalen von Stunden (Wolken, Luftdruck) bis zu Jahrtausenden (Eismassen) statt.

Schwierig ist die Berücksichtigung von so genannte nichtlinearen Wechselwirkungen durch kleine interne Störungen, die große Wirkungen hervorrufen können („Schmetterlingsflügel-schlag“) (Cubasch 2003). Bei den Modellrechnungen müssen auch externe Faktoren wie Änderungen der Sonneneinstrahlung, Vulkanismus und der Mensch mit dem zusätzlichen Treibhauseffekt und Landnutzungsänderungen berücksichtigt werden.

Nachfolgend sind die wichtigsten Modelltypen (nach Brönnimann 2005/06, Stocker 2008) aufgeführt:

- **Energiebilanzmodelle** (EBM, vereinfachtes Klimamodell)
- **Atmosphärenmodelle** (GCM, atmosphärische Zirkulation)
- **Ozean-Atmosphären-Modelle** (OAGCM oder AOGCM, gekoppeltes Modell mit ozeanischer und atmosphärischer Zirkulation)
- **Chemische Klimamodelle** (CCM, gekoppeltes Modell mit atmosphärischer Zirkulation und atmosphärischer Chemie)
- **Chemische Transportmodelle** (CTM, Chemiemodell ohne Zirkulation)
- **Advektions-Diffusions-Modell** für die Tiefenwasserzirkulation der Ozeane
- **Erdsystemmodelle** (ESM, modulare Modellierungssystem mit Atmosphäre, Ozean, Landoberflächenprozessen, Biosphäre, usw.)
- **Erdsystemmodelle reduzierter Komplexität** (ESMI, für lange Zeiträume)

Abbildung 8.2 zeigt die Chronologie der Modellentwicklung nach IPCC 2001 in den vergangenen 30 Jahren. Um alle Wechselwirkungen einbeziehen zu können, werden die Modelle immer komplexer und aufwändiger.

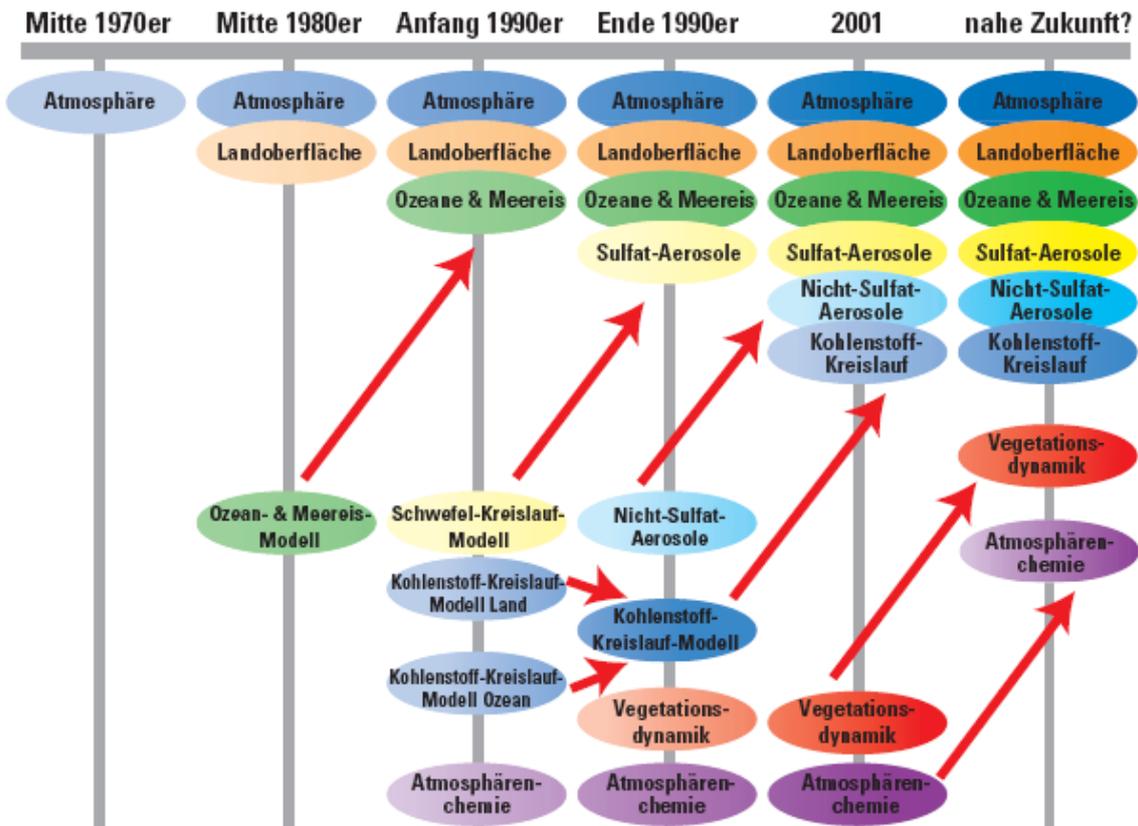


Abb. 8.2: Chronologie der Klimamodellentwicklung (Stand 2000) nach IPCC 2001. Die Berücksichtigung verschiedener neuer Komponenten wie Kohlenstoffkreislauf, Vegetation und Atmosphärenchemie führt zu einer drastischen Erhöhung der Komplexität und Rechenzeit der Klimamodelle. Sie stellt aber eine notwendige Entwicklung dar, um zu immer quantitativeren Modellergebnissen zu kommen ([http://www.bmbf.de/pub/forschung\\_fuer\\_den\\_klimaschutz.pdf](http://www.bmbf.de/pub/forschung_fuer_den_klimaschutz.pdf))

Nach *Stocker 2008* wurden seit 1990 wesentliche Verbesserungen bei der Berücksichtigung von weiteren Klimasystemkomponenten erzielt (Abb. 8.2)). Die Klimamodelle sind vollständiger geworden. Der Kohlenstoff- und andere Stoffkreisläufe, dynamische Formulierungen der Vegetationstypen, sowie die Chemie in der Atmosphäre gehören zu den Prozessen, die gegenwärtig in die bestehenden physikalischen Zirkulationsmodelle eingebaut werden.

### 8.1.1 Gekoppelte atmosphärische Zirkulationsmodelle (GCM, AOGCM)

Zunächst bildeten die Klimamodelle „nur“ die Atmosphäre, das Land und den Ozean als Einzelsysteme und in ihrem Zusammenwirken physikalisch ab; die weiteren Teilsysteme des Klimas wurden nur in pauschalierter Form eingebunden. Vielleicht der größte Fortschritt in der Klimamodellierung in den vergangenen 15 Jahren war die Kopplung atmosphärischer Modelle (GCM) mit dynamischen Modellen des Ozeans (AOGCM) (*Scaife 2007*). Die hierbei verwendeten dreidimensionalen gekoppelten atmosphärischen Zirkulationsmodelle (GCM) werden an ihren Schnittstellen mit den ozeanischen Zirkulationsmodellen gekoppelt, so dass komplexe Modellsysteme (AOGCMs) entstehen, die auch Rückkoppelungen mit dem Meer- und Landeis sowie der Landoberfläche berücksichtigen. Die Kopplung der beiden Modelle erfolgt dynamisch, das heißt es werden idealerweise in jedem Zeitschritt die Flüsse von Impuls, Wärme und Wasser ausgetauscht (*Stocker 2008*).

GCMs verknüpfen die grundlegenden physikalischen Gesetze (wie Impulserhaltung, Massenerhaltung, Energieerhaltung, Strahlungsgleichung, Gasgesetze) in Form von Differentialgleichungen und berechnen die wichtigsten atmosphärischen Prozesse und Zustandsvariablen für jeden Gitterpunkt. Ein umfangreiches System von Differentialgleichungen muss in Abhängigkeit von Anfangs- und Randbedingungen, z.B. für die solare Einstrahlung, Topographie der Erdoberfläche und Albedo angewandt werden. Da diese Gleichungen nicht exakt

lösbar sind, müssen numerische Näherungsverfahren mit iterativen Annäherungen an die jeweilige Lösung eingesetzt werden, was äußerst rechenintensiv ist.

Zur Lösung dieser Gleichungssysteme im Computer werden die Erdatmosphäre und der Ozean in Gitterzellen zerlegt. Diese haben heute eine Kantenlänge von ca. 200 bis 500 km in der Horizontalen und 8 bis 20 Schichten in der Vertikalen, im Ozean bis zu 30 Schichten. Aufgrund der hohen Dynamik atmosphärischer Prozesse wird auch eine hohe zeitliche Auflösung von GCMs benötigt. Die Zeitschritte liegen üblicherweise bei 30 – 60 Minuten, was außerordentlich hohe Rechenzeiten von teilweise mehreren Monaten auf modernen Großrechenanlagen erfordert. Physikalisch-chemische Vorgänge, die innerhalb einer Gitterzelle ablaufen, können nicht als Prozesse modelliert werden, sondern müssen parametrisiert werden, d.h. aus den an den Rändern der Gitterzelle bekannten Werten über meteorologische Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden. Das gilt für Prozesse wie z.B. Konvektion, Reibung, Turbulenz, Wolkenbildung, Niederschlag, Strahlungstransfer, die auf der Modellskala nicht aufgelöst werden können. Die Entwicklung solcher Parametrisierungen beruht auf detaillierten Beobachtungen und hochaufgelösten Prozessmodellstudien ([www.mpimet.mpg.de/wissenschaft](http://www.mpimet.mpg.de/wissenschaft), DKRZ 2009).

Je feiner das verwendete Rechengitter (Abb. 8.3) in den Klimamodellen ist, desto eher lassen sich wichtige kleinräumigere Prozesse direkt berechnen, die sonst „durch die Maschen“ fallen würden und nur parametrisiert in die Rechnungen einbezogen werden können (Böttiger, 2004). Heutige Modelle wie das ECHAM5 des Hamburger Max Planck Instituts für Meteorologie (MPI-M) hat eine Auflösung von unter 200 km (T63). Eine Verdopplung der Auflösung eines globalen Modells bewirkt jedoch eine Verachtfachung der Anzahl der Koordinatenpunkte und eine Verdoppelung der Anzahl der Zeitschritte und somit eine mehr als zehnfache Erhöhung der benötigten Rechenzeit für dieselbe Simulationsperiode. Selbst heute sind die modernsten Supercomputer noch nicht leistungsfähig genug, um ein umfassendes Klimamodell in der benötigten räumlichen Auflösung zu berechnen (DKRZ 2009).

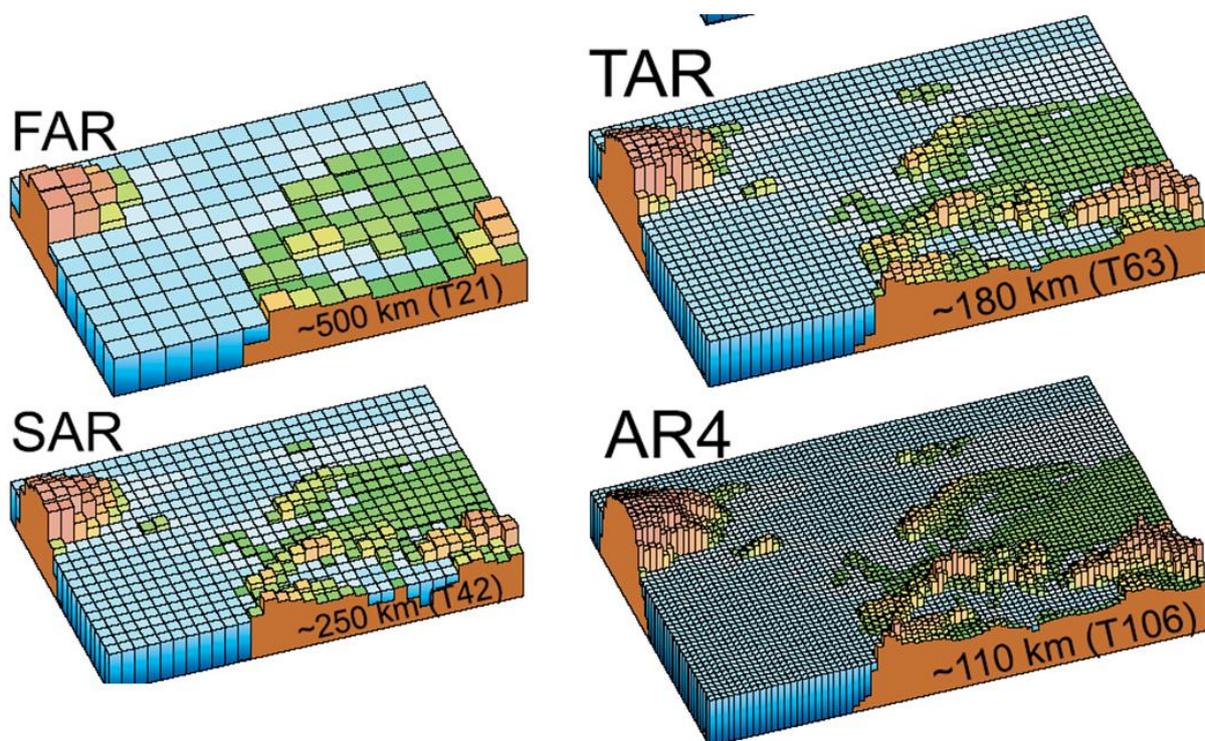


Abb. 8.3: Typische Auflösungen in heutigen Klimamodellen mit ca. 500 km (T21), ca. 250 km (T42), 180 km (T63) und 110 km (T106) Gitterabstand. T21 stellt die Umriss der Kontinente nur sehr ungefähr dar; das regionale Klima lässt sich mit dieser Auflösung nicht, aber auch mit den T42-Modellen nur begrenzt berechnen (MPI-M, Hamburg). Gleichzeitig wird der Fortschritt in den IPCC Berichten (FAR – AR4) dargestellt (IPCC 2007)

Um diese Modelle zu eichen, werden umfangreiche Tests vorgenommen. Neben den Tests für einzelne Komponenten wie Atmosphäre, Ozean und Land werden auch Tests des ge-

koppelten Systems vorgenommen, um Drifts in unrealistische Zustände zu erkennen. Wichtig ist die Validierung durch das Nachrechnen des Klimas der vergangenen Jahrhunderte und den Vergleich mit dem tatsächlich beobachteten Klima. Inzwischen wird trotz aller noch vorhandenen Unsicherheiten eine recht gute Übereinstimmung der Klimaberechnung aus den Modellsimulationen (Kontrollläufe) mit dem historisch rekonstruierten Klima erreicht (*Reichert 2008*). Ein weiterer Standardtest besteht darin, zu untersuchen, ob das Modell in der Lage ist, bei beobachtetem externem Antrieb (Treibhausgase, Aerosole, Sonneneinstrahlung, Vulkaneruptionen) den beobachteten Klimatrend des 20. Jahrhunderts zu reproduzieren (*MPI-M 2006*).

### 8.1.2 Erdsystemmodelle

Während reine Klimamodelle (GCMs, AOGCMs) fast ausschließlich physikalische Prozesse in der Atmosphäre bzw. den Ozeanen berücksichtigten, beinhalten die weiterentwickelten Klimasystemmodelle auch biologische und geochemische Wirkungsgefüge. Der Kohlenstoff- und andere Stoffkreisläufe, dynamische Änderungen der Vegetationstypen sowie die Chemie der Atmosphäre sind einige der Prozesse, die gegenwärtig in die bestehenden Zirkulationsmodelle eingebaut werden. Angestrebt wird mit dem „Erdsystemmodell“ (Abb. 8.4), dass möglichst alle Komponenten des Klimasystems, also auch die biologischen und chemischen Prozesse im Ozean und der Atmosphäre einschließlich ihrer Rückkoppelungen und deren externen Störungen, berücksichtigt und modelliert werden. Die Modelle aller beteiligten Subsysteme werden gekoppelt – d.h. sie tauschen in regelmäßigen Abständen Informationen aus – und bilden so ein vereinfachtes „Erdsystem im Höchstleistungsrechner“ (*Böttiger 2004*). Eigentlich müssten sogar die Einflüsse der Anthroposphäre eingebracht werden, zum Beispiel über sozio-ökonomische Modelle. Bisher geschieht dies im Wesentlichen nur über die Emissionsszenarien. Damit sollen auch künftig die Folgen z.B. auf marine und terrestrische Ökosysteme und die Rückwirkung auf die menschliche Gesellschaft dargestellt werden (*Cubasch 2003*).

Hierfür sind riesige Rechenzeitkapazitäten erforderlich, die nur von wenigen Rechnern in der Welt geleistet werden können. Ende 2009 ging im Hamburger Deutschen Klimarechenzentrum (DKZR) ein neuer Höchstleistungsrechner „Blizzard“ mit 8 448 Prozessoren in Betrieb. Die Spitzenrechengeschwindigkeit liegt bei 158 Teraflops/s (158 Billionen Gleitkommaoperationen pro Sekunde) - damit ist er etwa 60 Mal schneller als sein Vorgänger und wird für die Modellrechnungen zum fünften IPCC Bericht eingesetzt. Der 2009 neu installierte Supercomputer ermöglicht deutlich höhere räumliche Auflösungen als bei vorangegangenen Experimenten. Das Atmosphärenmodell arbeitet mit einer horizontalen Auflösung von unter 100 km (gegenüber 180 km zuvor). Das Ozeanmodell löst horizontal mit bis zu 0,4 Grad auf, was etwa 45 km entspricht. Mit dieser feineren Auflösung können nun physikalische Prozesse wie zum Beispiel starke Stürme oder Ozeanwirbel realistischer simuliert werden. Zusätzlich berechnet das neue Modell weitere physikalische Prozesse, insbesondere in der Landbiosphäre und der Biogeochemie im Ozean, um einen vollständigen Kohlenstoffzyklus zu simulieren. Der Berechnungsaufwand für diese neuen Simulationen mit diesem deutlich verbesserten Modell beträgt etwa das 100-fache der vorherigen Untersuchungen. Damit zählt der neue Klimarechner zu den schnellsten Supercomputern der Welt.

([http://www.dkrz.de/pdf/brochure/DKRZ\\_Brochure\\_2009\\_DE\\_screen.pdf](http://www.dkrz.de/pdf/brochure/DKRZ_Brochure_2009_DE_screen.pdf)).

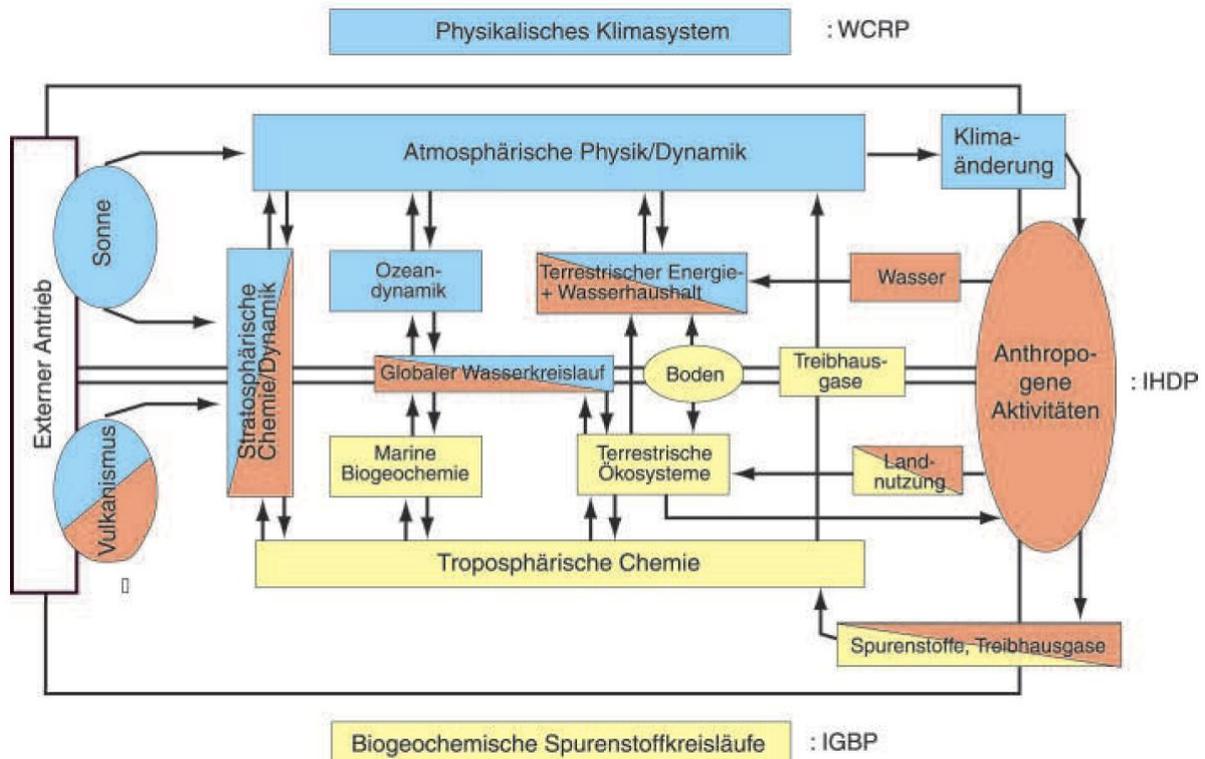


Abb. 8.4: Schematische Darstellung eines Erdsystemmodells und der dazugehörigen Komponenten. Im Idealfall sollte ein Klimamodell das gesamte System abbilden. Blau: Das physikalische Klimasystem (koordiniert durch das World Climate Research Project (WCRP)); gelb: Das biologische-chemische Klimasystem (koordiniert durch das International Geosphere-Biosphere Program (IGBP)); braun: Der anthropogene Anteil am Klimasystem (koordiniert durch das international Human Dimensions Program (IHDP)) (MPI für Meteorologie) (aus: <http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/klimod/forschung/Cubasch.pdf>)

Erdsystemmodelle mittlerer Komplexität (EMIC) gibt es inzwischen weltweit von 13 verschiedenen Modellierergruppen. Sie nutzen Modelle mittlerer Komplexität für die Atmosphäre und den Ozean, schließen aber zusätzliche Prozesse wie z. B. den Kohlenstoffkreislauf und Vegetationsrückkopplungen ein. In regelmäßigen Workshops werden die Modelle diskutiert und verglichen sowie Sensitivitätsstudien durchgeführt ([www.pik-potsdam.de/emics/toe\\_05-06-07.pdf](http://www.pik-potsdam.de/emics/toe_05-06-07.pdf)). Nachdem immer noch viele Vorgänge in Klimamodellen (z.B. Wolken und konvektive Vorgänge, Niederschlag, Wirbel im Ozean) unzureichend dargestellt werden, sollen Ensembles von Integrationen mehrerer Modelle bei der Quantifizierung dieser Unsicherheiten helfen. Hierzu wurde das von der EU unterstützte PRISM-Projekt (Program for Integrated Earth System Modelling) entwickelt (Valcke 2007). Das PRISM-System (Programm für integrierte Erdsystemmodellierung) besteht aus einer Infrastruktur, die den Benutzer bei der Durchführung numerischer Experimente unterstützt. Dieser kann über standardisierte Schnittstellen austauschbare Modellkomponenten wie Atmosphäre, Ozean, Biosphäre und Chemie kombinieren (<http://prism.enes.org>).

Bei den Ensemble-Rechnungen werden Modellrechnungen jeweils mit leichten Variationen der Ausgangswerte Tausende von Malen wiederholt, so dass man zufallsbedingte Schwankungen von statistischen Trends unterscheiden kann (Böttinger 2004, DKRZ 2009). Auch die Parametrisierungen des Modells werden nach diesem Muster verändert. Je höher nun die Zahl der durchgeführten Modellläufe ist, desto besser wird die Basis für die statistische Auswertung der Ensembles.

Zur Weiterentwicklung der Erdsystemmodelle wurde außerdem mit Unterstützung der EU das European Network for Earth System Modelling (ENES, [www.enes.org](http://www.enes.org)) gegründet. Redler 2009 beschreibt eine neue Software (OASIS 4) zur Berechnung solcher gekoppelten Modelle. Mit dem neu entwickelten Softwarepaket, dem OASIS4-Koppler (Ocean Atmosphere Sea Ice Soil - Ozean Atmosphäre Meereseis Landoberfläche) soll die Kopplung (Datenaustausch) zwischen zwei oder mehr beliebigen Klimakomponentenmodellen (Atmosphäre, Atmosphärenchemie, Erdoberfläche, Ozean, Meereseis, Meeres-Biogeochemie oder regionale Modelle) sowie die Ein-/Ausgabe jeder einzelnen Klimakomponente ermöglicht werden. „Fluss-Koppler“ sind zwischen den einzelnen Modell-Schnittstellen geschaltet,

damit Erhaltungsgrößen, bei der Kopplung wirklich erhalten bleiben. Über die Zukunft und Grenzen der neuen multiskaligen Erdsystemmodelle wird in *Slingo 2009* diskutiert.

### 8.1.3 Unsicherheiten in der Klimamodellrechnung

Das Vertrauen in die Modelle ist zwar laut *IPCC 2007* gestiegen, da besonders der dynamische Kern (Advektion etc.) der Modelle große Fortschritte erfahren hat, ebenso wie die Modellierung von Aerosolen, Landoberfläche und Meereis. Außerdem gab es Fortschritte in der Simulation vieler Prozesse des gegenwärtigen Klimas, verbesserte Modellauflösung, Computertechniken, Parametrisierungen und Aufnahme zusätzlicher Prozesse; sowie von umfassenden diagnostischen Tests. Jedoch ergeben sich neben den systeminhärenten Unsicherheiten, dem Klimarauschen (s.o.), das sich aus den Nichtlinearitäten und Instabilitäten der Dynamik des Klimas ergibt, eine weitere Unsicherheit aufgrund der mangelhaften Kenntnis des Systems. Die komplexen gekoppelten Zirkulationsmodelle sind deswegen ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet (*Knutti 2008, Reichler 2008, Min 2006*).

Trotz erheblicher Fortschritte in der Entwicklung von Klimamodellen haben es Klimasimulationen weiterhin mit einer Vielzahl von Problemen zu tun, deren man sich bei der Beurteilung ihrer Ergebnisse bewusst sein sollte. Zwar wächst die Leistung der verwendeten Computeranlagen in einem gewaltigen Tempo; so erreicht der 2009 in Betrieb genommene Höchstleistungsrechner des DKRZ eine Spitzengeschwindigkeit von 158 Teraflops (158 Billionen Operationen pro Sekunde), dennoch müssen eine Vielzahl von Prozessen des realen Klimas und ihrer Veränderungen vernachlässigt werden. Auch *von Storch 2005* stellt fest, dass die globalen Klimamodelle im geophysikalischen Sinn mit relativ kleinen systematischen Fehlern behaftet sind und nur einen Teil der Wirklichkeit beschreiben können. Deshalb wird die Veränderung des Klimas aus dem Unterschied eines „Kontrolllaufs“ (mit unveränderter atmosphärischer Komposition) mit einem „Szenariolauf“ (in dem die Komposition zeitlich verändert vorgegeben wird) abgeleitet (*von Storch 2005, 2007*).

Trotz der großen Fortschritte in den vergangenen Jahren bei der Modellentwicklung und den Großrechnern müssen weiterhin Parametrisierungen vorgenommen werden, da subskalige Prozesse innerhalb der Gitterzellen der Zirkulationsmodelle nicht abgebildet werden können. Das gilt für die Wolken, die Aktivitäten der planetarischen Grenzschicht und Faktoren, die sich auf die Landoberfläche beziehen, etwa Rauigkeit und Höhe über dem Meeresspiegel.

Die Kopplung zwischen Atmosphäre und Ozean ist nach *Bengtsson 2004* ein besonderes Problem. Geringe Änderungen von Wolken und Meereis beeinflussen drastisch den Austausch von Energie und Wasser. Mit der Kopplung werden die Beobachtungsdaten durch die Daten des jeweils anderen Modellsystems ersetzt (Abb. 8.5). Dabei entstehen Fehler bei den Wärme-, Wasser- und Impulsflüssen, die zu deutlichen Abweichungen vom beobachteten Klima führen können. Dieses als "Klimadrift" bezeichnete Problem wurde durch die so genannte "Flusskorrektur", eine nicht-physikalische Anpassung an die Realität, korrigiert.

Neuere, aufwändigere Modellentwicklungen wie das Hamburger ECHAM5/MPI-OM Modell (s. Kap. 8.2.3) und die meisten Modelle des AR4 kommen ohne diese Flusskorrekturen aus und weisen deutliche Verbesserungen gegenüber denen mit Flusskorrekturen auf (*Reichert 2008*), sind aber immer noch nicht ganz fehlerfrei (*Glecker 2007*). Von den 23 AOGCM, die im *IPCC 2007* (AR4) vorrangig verwendet wurden, setzten nur noch sechs Flusskorrekturen für Impuls-, Wärme- und Süßwasser-Flüsse ein. Verbesserungen haben sich insbesondere bei den Wärmeflüssen ergeben. Dies ist nach *Stocker 2008* ein Beleg für den Fortschritt im Verständnis und der Darstellung der Prozesse in den Klimasystemkomponenten (Ozean, Atmosphäre, Land, Meereis, Schnee, Vegetation, etc.). Ebenfalls beigetragen haben bessere Parametrisierungen und zum Teil auch höhere Auflösung der Modellgitter. Einige der gekoppelten Modelle simulieren inzwischen die dynamische Vegetation, den vollständigen Wasserkreislauf und die Biogeochemie der Erde (Stoffkreisläufe von Stickstoff, Kohlenstoff, Phosphor etc.). In einigen Modellen wurden auch interaktive Aerosol - Parametrisierungen benutzt, um sowohl den direkten als auch den indirekten Aerosoleffekt zu berücksichtigen (*IPCC 2007*).

Um die Unsicherheiten in den Modellergebnissen zu verringern, wurde 1995 das Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) gegründet (*Meehl 2005*). Hierbei werden u.a. mit allen teilnehmenden Modellgruppen einheitliche Modellrechnungen mit einem jährlichen globalen

mittleren Zuwachs von 1 % CO<sub>2</sub> durchgeführt. Die Ergebnisse für die 12 Modellgruppen schwanken nach 70 Jahren Laufzeit – der CO<sub>2</sub>-Verdoppelungszeit – erheblich um den Faktor 2 und liegen zwischen 1 und 3 °C, beim Niederschlag ist diese Differenz noch größer (*Bader 2004*). Eine gute Übereinstimmung ergab sich nach einer Mittelung des Multi-Modell-Ensembles. Auch *Reichler 2008* bestätigt, dass die Verwendung von Mittelwerten aus Multi-modell Ensembles eine zulässige und effektive Methode ist, um die Ergebnisse von Modellrechnungen zu verbessern. Das gilt auch für die ENSO und NAO. Systematische Fehler für die Meeresoberflächentemperatur und den Niederschlag gibt es weiterhin bei der innertropischen Konvergenzzone (ITC) im Pazifischen Ozean und auch im Atlantik mit dem südhemisphärischen Antizyklon, der zu schwach dargestellt wird. Große Streuungen im Bereich der Polregion ergeben sich insbesondere durch unterschiedliche Berücksichtigung von Klimarückkopplungen bei den Modellrechnungen für den AR4; die Abweichungen für das Jahr 2100 liegen 1,3- bis 4-fach über dem globalen Mittelwert (*IPCC 2007*).

Ein weiteres Modellproblem ist neben dem „double ITCZ Problem“ (*Lin 2007*) die „cold bias“. Darunter versteht man die von globalen Klimamodellen systematisch um mehrere Grad K zu niedrig simulierte Temperatur im Bereich der extratropischen Tropopause (*Gleckler 2007*). *Sausen 2004* zeigte in einem Experiment im Rahmen des DEKLIM Projektes COBI, dass die „cold bias“ sehr stark von der fehlerhaften Temperaturverteilung im Modell beeinflusst wird. Durch eine höhere Auflösung in den Klimamodellen konnte die „cold bias“ erheblich verringert werden (*Reichler 2008*).

Einer der größten Unsicherheitsfaktoren bei der Klimasimulation ist der Einfluss der Wolken, da sie sowohl einen kühlenden als auch einen wärmenden Effekt haben können. Auf der einen Seite absorbieren sie Sonnenstrahlen (hohe Wolken) und reflektieren sie (Albedo wird erhöht), was einen negativen Strahlungsantrieb mit sich bringt. Auf der anderen Seite können sie (niedrige Wolken) langwellige infrarote Strahlen absorbieren und wieder emittieren (Treibhauseffekt wird verstärkt), was einen positiven Strahlungsantrieb zur Folge hat. Es ist deswegen schwierig, den Effekt von Wolken in Klimamodellen richtig zu integrieren. Dies zeigt auch ein Modellvergleich von *Soden 2006*, nach dem die Rückkoppelung der Wolken bei den Modellrechnungen weiterhin die größte Quelle der Unsicherheiten ist.

Die vielfältigen Wechselwirkungen der Wolken sind keineswegs schon so im Detail verstanden, dass sie in numerischen Modellen genau nachvollzogen werden können (*Raschke 2002*, *Bony 2006*, *Geckler 2007*). Durch Satellitenmessungen von z.B. Radien von Wolkentröpfchen und Aerosolkonzentrationen konnten jedoch die Klimamodelle verbessert werden (*Quaas 2010*).

Im globalen Mittel sind 50 % der Erde mit Wolken bedeckt. Die Klimawirksamkeit von Wolken resultiert aus ihren Strahlungseigenschaften, ihrem Wasser- und Eisgehalt (latent gebundene Wärme), ihrer Produktion von Niederschlag, der mit ihrer Konvektion verbundenen Dynamik der Atmosphäre und den in ihnen ablaufenden Prozessen. Eine weitere Unsicherheit für die Einbeziehung von Wolken in Klimamodelle liegt in der Höhe der Wolken, den Niederschlagsmengen und der Niederschlagshäufigkeit. Die Aerosole (indirekter Effekt) sind ein weiterer wichtiger Einflussfaktor für die Wolkenbildung. Bestimmte Aerosole können die Partikelgröße in Wolken systematisch verkleinern, so dass deren Albedo erhöht und die Niederschlagseffizienz verringert wird.

Im AR4 (*IPCC 2007*) werden folgende „Key Uncertainties“ genannt:

- Die meisten Modelle haben weiterhin Probleme, die Klimadrift eines eigentlich eingeschwungenen Systems abzustellen, insbesondere im tiefen Ozean. Diese Drift muss beim Auswerten vieler Ozeanvariablen ausgewiesen werden.
- Die Modelle unterscheiden sich beträchtlich in ihren Abschätzungen verschiedener Rückkopplungen im Klimasystem.
- Manche Formen der Klimavariabilität wie die Madden-Julian Oscillation werden weiterhin schlecht im Modell abgebildet. Es zeigen sich unrealistische immer wiederkehrende atmosphärische Blockierungssituationen und extreme Niederschläge.
- Die meisten Modelle produzieren weiterhin systematische Fehler bei der Simulation des südlichen Ozeans.
- Klimamodelle sind aufgrund der vorhandenen Rechnerkapazitäten weiterhin in ihrer räumlichen Auflösung beschränkt.

- Große Unsicherheit besteht auch darin, wie Wolken auf die den globalen Klimawandels reagieren werden.

Messungen von *Soden 2005* der Zunahme des Feuchtegehaltes in der oberen Troposphäre haben dagegen die Voraussagen der Klimamodelle bestätigt. Die Auswertung der Wasserabsorptionsbande von 6,3  $\mu\text{m}$  mit Mikrowellen-Spektrometern von Satellitenmessungen im Zeitraum 1982 bis 2004 und der Vergleich mit Modellrechnungen haben eine sehr gute Übereinstimmung ergeben. Die Zunahme der Luftfeuchtigkeit betrug etwa 2 % und wird als Wasserdampf-Rückkopplung in Folge der Erderwärmung angesehen. Damit wurde ein weiterer Unsicherheitsfaktor bei den Klimamodellen beseitigt (*IPCC 2007*). *Santer 2007* sieht die atmosphärische Wasserdampfungnahme als einen weiteren „fingerprint“ für den anthropogen verursachten Klimawandel. *Willett 2008* hat nach umfangreichen Auswertungen der HadCRU Daten diesen Trend seit 1973 bestätigt; über dem Land ist der Trend der Wasserdampfungnahme größer. Auch die Reanalysedaten von *Dessler 2010* zeigen einen generellen Trend der troposphärischen Wasserdampfungnahme.

Eine weitere Unsicherheit ist die vom IPCC vorgenommene Abschätzung der künftigen Emissionen. Zukünftige Methankonzentrationen beispielsweise sind sehr schwierig einzuschätzen, da Quell- und Senkenstärken nur ungenau bekannt sind (*Bengtsson 2004, Cofala 2006, 2009*) (s. Kap. 6.1.3).

## 8.2 Ergebnisse der Modellrechnungen

Im IPCC-Bericht 2007 (AR4) sind die Modellergebnisse der beteiligten Modellrechengruppen veröffentlicht worden. Für den Zeitraum 1990 bis 2100 sind Temperaturhochrechnungen für die sechs Standard-SRES-Szenarien sowie das „business as usual“-Szenario des vorletzten IPCC-Berichts (IS92a) unter Verwendung eines Modells mittlerer Klimasensitivität durchgeführt wurden. Einige Ergebnisse sind in Kap. 8.2.2 dargestellt.

### 8.2.1 Emissionsszenarien

Um das Klima der Zukunft realistisch abschätzen zu können, ist neben der Kenntnis der inneren Dynamik des Klimasystems auch die Entwicklung der künftigen natürlichen und anthropogenen Antriebe erforderlich. Hierzu wurden vom IPCC verschiedene Szenarien entwickelt, die auf unterschiedlichen Annahmen der Entwicklung der Menschheit beruhen. Die wesentlichen Faktoren sind neben der Entwicklung der Weltbevölkerung deren Lebensstandard, der Energieverbrauch, die hierfür verwendeten Energieträger und die Effizienz der Energienutzung. Daraus ergeben sich die zu erwartenden Emissionen und die Umweltveränderungen. Die Emissionsszenarien, die in einem speziellen IPCC-Bericht (*SRES 2000*) erstellt wurden, sollen die ganze Bandbreite von ökonomisch plausiblen künftigen Entwicklungen abdecken (Abb. 8.6).

**Szenario A1** ergibt sich aus einer Welt mit schnellem Wirtschaftswachstum und schneller Einführung neuer und effizienter Technologien. Die Emissionen von  $\text{CO}_2$  und  $\text{SO}_2$  nehmen ab Mitte des Jahrhunderts ab.

**Szenario A2** stellt eine sehr heterogene Welt mit einem Schwerpunkt auf traditionellen Werten dar. Die  $\text{CO}_2$ -Emissionen steigen ständig weiter an.  $\text{SO}_2$  geht nach einem starken Anstieg ab 2050 deutlich zurück.

**Szenario B1** stellt eine sich vom Materialismus abkehrende Welt und die Einführung sauberer Technologien dar. Die  $\text{CO}_2$ -Emissionen steigen bis ca. 2070 langsam an, dann verringern sie sich. Die  $\text{SO}_2$ -Emissionen gehen kontinuierlich zurück.

**Szenario B2** legt den Schwerpunkt auf lokalen Lösungen für ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit. Die  $\text{CO}_2$ -Emissionen steigen „moderat“ weiter an, die  $\text{SO}_2$ -Emissionen gehen langsam zurück.

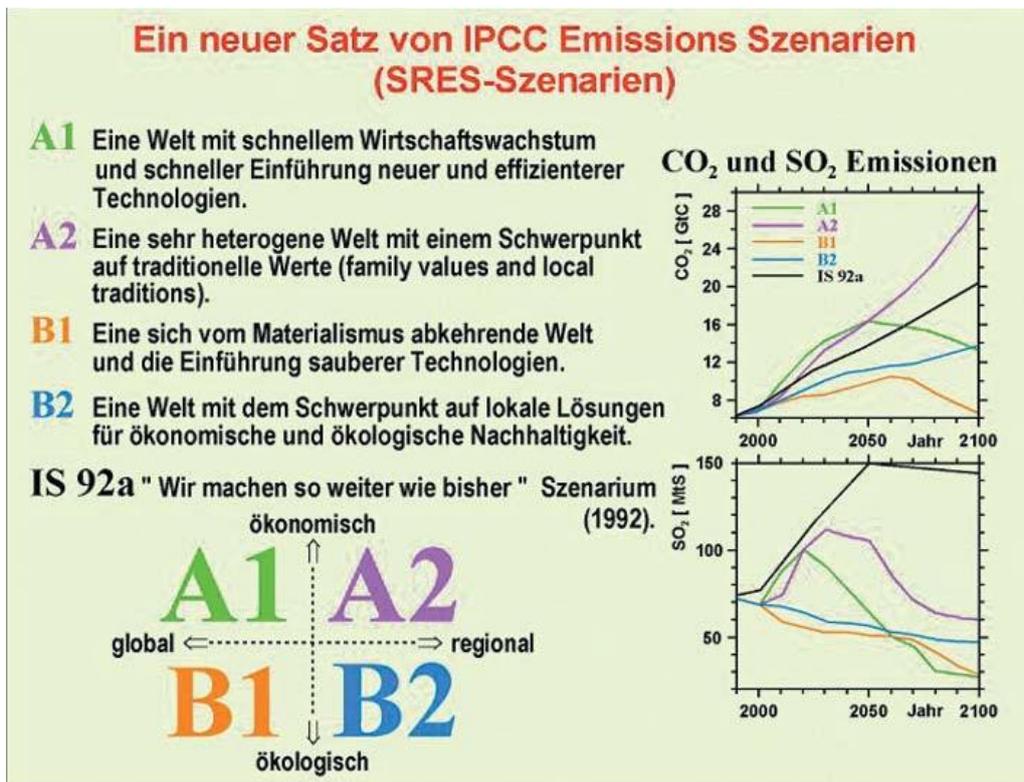


Abb. 8.6: Die vier Leitszenarien des IPCC-Berichts 2001/07 im Überblick zusammen mit dem älteren „business as usual“ Szenario des Berichts von 1992. Die beiden Diagramme zeigen den für diese Szenarien jeweils prognostizierten Verlauf der globalen Kohlendioxid- (rechts oben) und Schwefeldioxidemissionen (rechts unten) bis zum Jahr 2100. Diese Emissionen bestimmen maßgeblich den Einfluss des Menschen auf das Klima und gehen direkt in die Modellrechnungen der Klimamodelle ein (Kasang, HBS 2005, nach IPCC 2001)

Die Prognosen der ökonomischen Wachstumsraten und die verwendeten Emissionsszenarien waren teilweise umstritten. Ein weiterer Kritikpunkt war, dass bei den Erwartungen für den wirtschaftlichen Wandel der Marktwechselkurs (MEX) und nicht die Kaufkraftparität (PPP) zu Grunde gelegt wurde (Tol 2004, Lawson 2005). Die hieraus resultierenden Temperaturunterschiede machen jedoch für das Jahr 2100 nur 0,1 °C aus. Tol 2005 hat die SRES Szenarien mit neueren Szenarien verglichen und keine größeren Abweichungen festgestellt.

Das IPCC hat in verschiedenen Workshops die Kritik diskutiert und teilweise zurückgewiesen, da sie nur geringe Abweichungen zeigen (IPCC 2007). Für den 4. Bericht des IPCC (AR4) wurden noch einmal die Emissionsszenarien von 2000 zu Grunde gelegt, jedoch auf die Kritik eingegangen. Die verschiedenen Szenarien der IEA, EEA und OECD wurden bewertet und begutachtete (peer-reviewed) wissenschaftliche Veröffentlichungen (IPCC Expert Meeting on Emission Scenarios 2005) berücksichtigt. Referenzemissionsszenarien, die seit dem SRES 2000 publiziert wurden, sind (im Hinblick auf ihre Bandbreite) mit denen im IPCC-Sonderbericht vergleichbar.

Einige wenige (Post SRES) Szenarien kommen sogar zu noch höheren Emissionen als die die für den AR4 verwendet wurden (IPCC 2007).

Für den fünften Bericht (AR5), der 2013/14 fertig sein soll, werden vom IPCC neue Szenarien verwendet, an denen derzeit gearbeitet wird. 2007 fand ein Expertentreffen hierzu statt, Die neuen Szenarien werden eine kurzfristige ('near term' - bis 2035) und eine langfristige ('long term' - bis 2100) Zeitskala aufweisen; für einige Anwendungen reicht der Horizont bis zum Jahr 2300 (<http://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-ts-scenarios.pdf>). Die Emissionsszenarien führen zu Kohlendioxid-Konzentrationen (Abb. 8.7) zwischen 540 und 970 ppm, mit denen die Modellrechnungen durchgeführt werden (Kap. 8.2.2). Die gestrichelten Linien in Abb. 8.7 zeigen die minimalen und maximalen Emissionsszenarien (Post-SRES), die nach Erstellung der SRES, 2000 berechnet wurden.

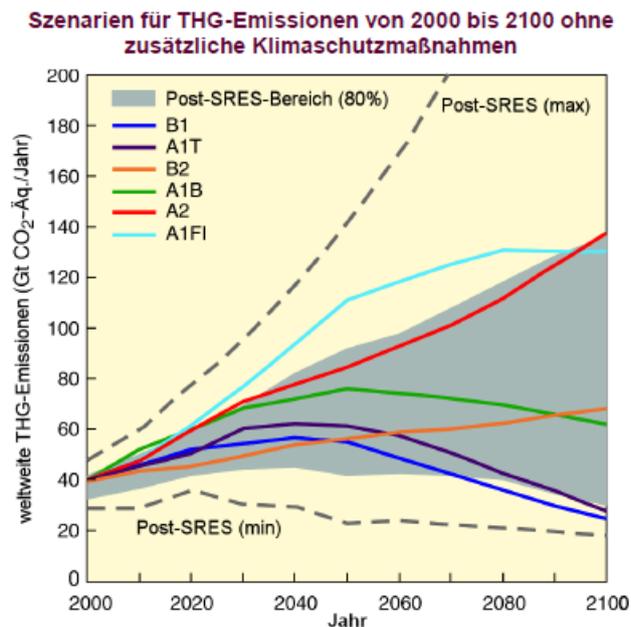


Abb. 8.7: weltweite Treibhausgasemissionen ohne zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen: sechs beispielhafte SRES-Szenarien (farbige Linien) und der 80 Perzentil-Bereich neuerer Szenarien, die nach dem SRES veröffentlicht wurden (Post-SRES) (grau schattierter Bereich). Gestrichelte Linien zeigen die gesamte Bandbreite der post-SRES-Szenarien. Die Emissionen decken CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und F-Gase ab. (IPCC 2007)

## 8.2.2 Klimaprojektionen für den AR4 – Modellergebnisse

Mit den Klimamodellen wird anhand der Emissionsszenarien abgeschätzt, welche klimatischen Änderungen diese möglichen zukünftigen Emissionen haben können. Da die verwendeten Szenarien keine Prognosen sind, sondern auf unterschiedlichen Annahmen beruhen, werden die Modellergebnisse als Projektionen bezeichnet. Die Veränderung des Klimas wird bei den Modellrechnungen abgeleitet aus dem Unterschied eines Kontrolllaufes mit einem „realen Klima“ und einem Szenariolauf. Die Kohlendioxidkonzentrationen liegen je nach Szenario im Jahre 2100 zwischen 540 und 960 ppm, bei einer Treibhausgasemission von 25–135 Mrd. t (Gt) CO<sub>2</sub>-Äq./Jahr. Die Klimahochrechnungen (Projektionen) mit den 35 verschiedenen Emissionsszenarien kommen bis zum Ende dieses Jahrhunderts auf eine Erhöhung der globalen gemittelten bodennahen Lufttemperatur von 1,1 bis 6,4°C (Abb. 8.8). Die enorme Bandbreite der Temperaturprognosen ergibt sich zum einen aus der Unsicherheit der Klimamodellrechnungen und zum anderen aus den großen Unterschieden in den zugrunde gelegten Emissionsszenarien (Abb. 8.7).

Die Temperaturen steigen nach den Klimaprojektionen weltweit fast überall an (Abb. 8.10). Der Anstieg ist langsamer über dem Ozean wegen seiner höheren thermischen Trägheit; in arktischen Bereichen fällt die Erwärmung besonders stark aus, nachdem dort Permafrost und Meereis geschmolzen sind (von Storch 2006).

Für den 4. IPCC-Bericht (AR4) haben 17 Modellierergruppen aus 10 Ländern mit 23 Modellen beigetragen. Die Modelldaten – inzwischen 27 Terabytes - werden vom PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) gesammelt, archiviert und den Experten zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse der Modellrechnungen, die in den AR4 eingegangen sind, wurden in über 200 begutachteten (peer-reviewed) Papieren in Fachzeitschriften veröffentlicht (www.ipcc.ch).

Nach IPCC 2007 wurden große Fortschritte bei der Bewertung der Klimaänderungsprojektionen gegenüber dem TAR erzielt durch die große Anzahl von verfügbaren Simulationsrechnungen mit einem breiteren Bereich von Klimamodellen. Zusammengenommen mit den zusätzlichen Informationen aus Beobachtungen, liefert dies eine quantitative Basis für die Abschätzung der Wahrscheinlichkeiten für viele Aspekte des künftigen Klimas. Diese wird auch durch Modellvergleiche im Rahmen des PCMDI – Projektes von Reichler 2008 bestätigt.

### MULTIMODELL-MITTEL UND GESCHÄTZTE BANDBREITEN FÜR DIE ERWÄRMUNG AN DER ERDOBERFLÄCHE

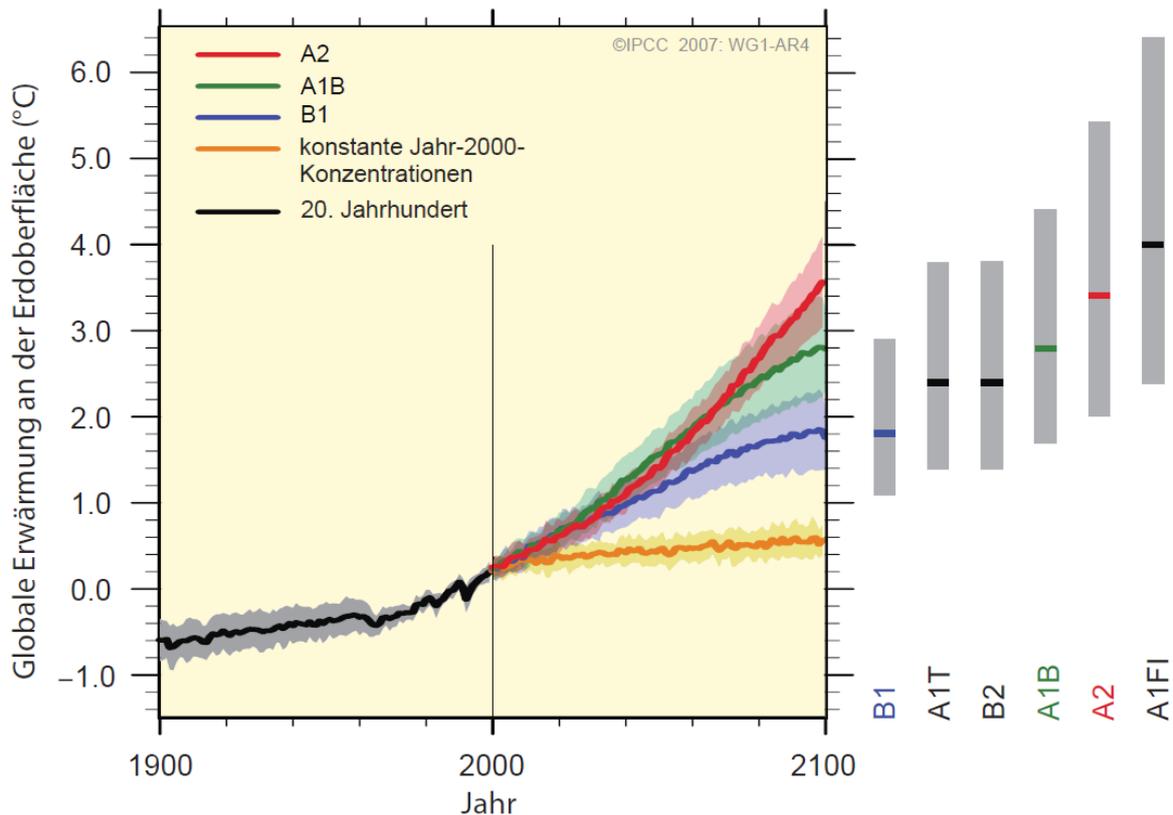


Fig. 8.8: Die durchgezogenen Linien zeigen die mittlere globale Oberflächenerwärmung (relative zu 1980 – 1999) für die Szenarien A2, A1B und B1 als Fortsetzung zu den Simulationen des 20. Jahrhunderts. Die farbigen Bereiche stellen die Bereiche der plus/minus Standardabweichung der einzelnen Modelle dar. Die orange Linie zeigt die Ergebnisse der Modellrechnung bei welcher die Treibhausgaskonzentrationen des Jahres 2000 konstant gehalten werden. Die grauen Balken rechts geben die besten Abschätzungen (Strich im grauen Balken) und die Wahrscheinlichkeitsbereiche für die 6 SRES Szenarios wider (SPM IPCC 2007)

Die Modellprojektionen, die auf die Analyse von verschiedenen Computer Modellläufen mit verschiedenen Emissionsszenarien (SRES) basieren, ergeben für das 21. Jahrhundert folgende Erwärmung der Oberflächentemperatur:

- Beste Abschätzung für das ‚niedrige Szenario‘ ist 1,8° C mit einem Wahrscheinlichkeitsbereich von 1,1 bis 2,9° C
- Beste Abschätzung für das ‚hohe Szenario‘ ist 4,0° C mit einem Wahrscheinlichkeitsbereich von 2,4 bis 6,4° C
- Eine Temperaturerhöhung von ca. 0,1° C pro Dekade wird für die nächsten 2 Dekaden erwartet, selbst wenn die Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen auf dem Niveau von 2000 verbleiben würden.
- Eine Temperaturerhöhung von ca. 0,2° C pro Dekade wird für die nächsten beiden Dekaden für alle SRES Szenarios berechnet.

Das Vertrauen in diese kurzzeitige Projektion ist nach *IPCC 2007* wegen der Übereinstimmung der vergangenen Modellprojektionen mit der aktuell beobachteten Temperaturerhöhung hoch.

Die Fortschritte in der Klimamodellierung ermöglicht es jetzt beste Abschätzungen und mit Wahrscheinlichkeiten bewertete Unsicherheitsbereiche für eine projizierte Erwärmung aufgrund von verschiedenen Emissionsszenarien anzugeben. Die Abb. 8.8 zeigt die projizierte globale mittlere Oberflächenerwärmung für das Ende des 21. Jahrhunderts (2090 – 2099) relativ zu 1980 – 1999. Dies verdeutlicht die Unterschiede zwischen den niedrigen und höheren Emissionsszenarien und den Unsicherheiten bei der projizierten Erwärmung die mit diesen Szenarien verbunden ist.

### 8.2.3 Regionale Modellergebnisse

Da globale Klimamodelle nur statistische Durchschnittswerte und deren Änderungen über Jahrzehnte oder Jahrhunderte berechnen, muss für regionale Betrachtungen ein „Downscaling“ angewandt werden. Regionale Klimamodelle betrachten lediglich einen Ausschnitt auf der Erde und benötigen deshalb zur Simulation geeignete Randbedingungen an den Rändern des Modellgebietes. Diese Randbedingungen stammen aus Szenarien der globalen Klimamodelle. Man sagt deshalb, ein regionales Klimamodell wird durch ein globales Klimamodell angetrieben. Man bezeichnet dies als "dynamic downscaling", also das Herunterskalieren der globalen Antriebsdaten auf eine sehr feine regionale Auflösung (bis zu einem Kilometer Gitterweite) (*Matula 2003*).

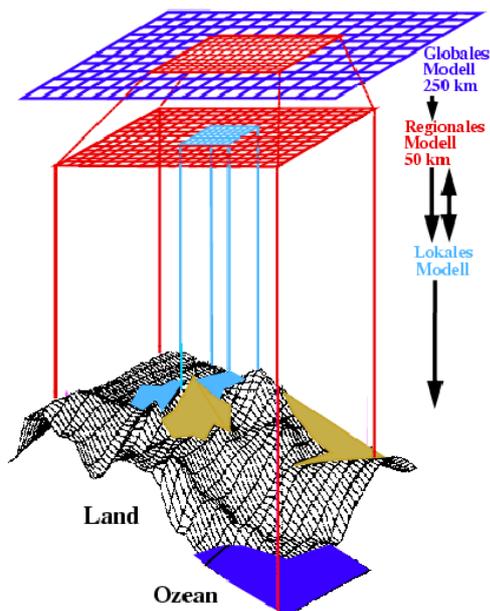


Abb. 8.9: Vom globalen zum regionalen und lokalen Klimamodell mit dynamischem Downscaling (*Kasang, HBS 2005*)

Beim dynamischen Downscaling (Abb. 8.9) werden hochauflösende Modelle für einzelne Regionen in ein grobes globales Modell eingebettet, das die Daten des globalen Modells als Randbedingungen verwendet. In das Regional-Modell kann dann nach dem gleichen Prinzip noch ein lokales Modell eingefügt werden. Beim empirischen/statistischen Downscaling wird eine statistische Beziehungen zwischen regionalen bzw. lokalen Klimavariablen, z.B. Temperatur und Niederschlag, und großräumigen Bedingungen (z.B. Zirkulationsmuster) aus der Beobachtung abgeleitet. Diese Beziehungen werden dann auf die Ergebnisse der global gekoppelten Modelle angewandt, um lokale und regionale Klimaeigenschaften festzustellen (*Cubasch u. Kasang 2002; Matulla 2003*).

Die projizierte Erwärmung im 21. Jahrhundert zeigt unabhängig von den Szenarien geographische Muster ähnlich jenen, die in den vergangenen Jahrzehnten beobachtet wurden. Die stärkste Erwärmung wird über Land und die höchste in den nördlichen Breitengraden und die geringste Erwärmung über dem südlichen Ozean und Teilen des Nordatlantischen Ozeans erwartet (Abb. 8.10).

### MODELLPROJEKTIONEN DER ERDOBERFLÄCHENTEMPERATUR

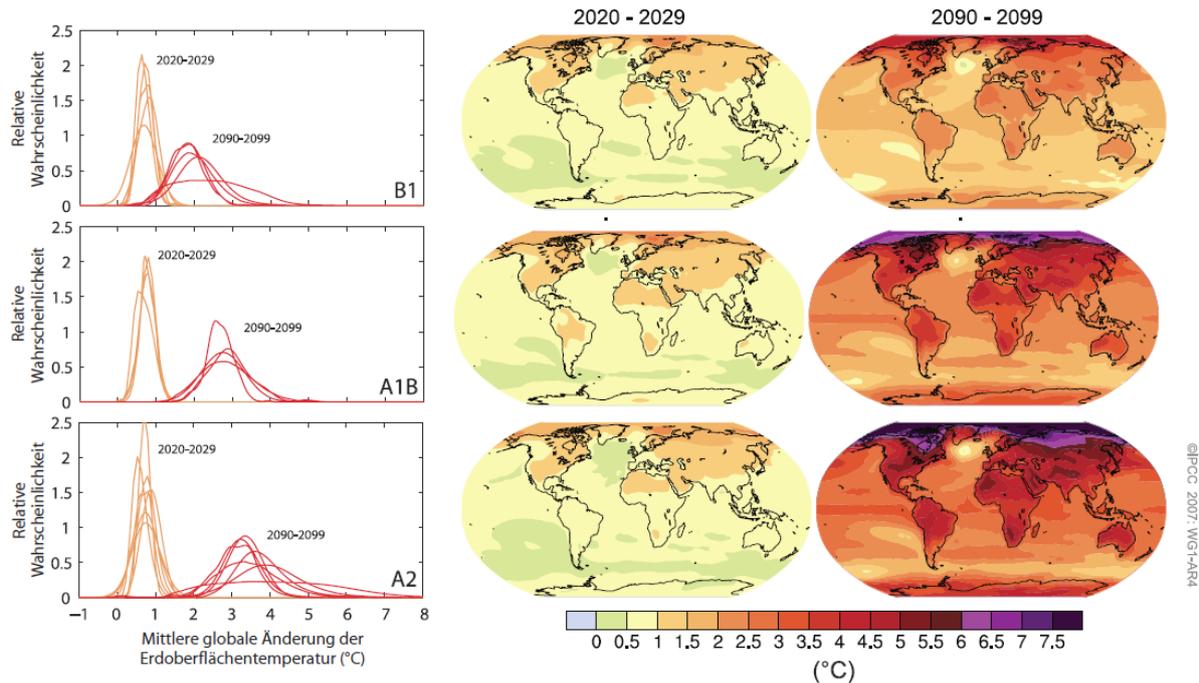


Abb. 8.10: Projizierte Änderungen der Erdoberflächentemperatur für das frühe und späte 21. Jahrhundert im Vergleich zum Zeitraum 1980–1999. Die mittleren und rechten Grafiken zeigen die AOGCM-Multimodell-Mittel-Projektionen für die B1- (oben), A1B- (Mitte) und A2- (unten) -SRES-Szenarien, gemittelt über die Jahrzehnte 2020–2029 (Mitte) und 2090–2099 (rechts). Die linken Grafiken zeigen die entsprechenden Unsicherheiten als relative Wahrscheinlichkeiten der geschätzten mittleren globalen Erwärmung aus mehreren unterschiedlichen AOGCM- und EMIC-Studien für die gleichen Zeiträume. Einige Studien bieten nur Resultate für einen Teil der SRES Szenarien oder für verschiedene Modellversionen. (SPM, IPCC 2007)

Mit verschiedenen Modellen wurden in den vergangenen Jahren Klimaszenarien für Deutschland bis zum Ende des 21. Jahrhundert berechnet (REMO, WETREG, CLM, STAR) (Werner 2007). Die Ergebnisse variieren sowohl für die Temperatur als auch den Niederschlag erheblich.

Das MPI-M, Hamburg, hat 2006 (UBA 2006) die Ergebnisse ihrer „Regionalen Projektionen für das 21. Jahrhundert“ vorgestellt. Mit dem regionalen Klimamodell REMO wurden Klimaänderungssimulationen auf einem 10 x 10 km Raster für Deutschland, Österreich und der Schweiz durchgeführt. Bis 2100 werden demnach – abhängig von der Höhe der zukünftigen Treibhausgaskonzentration – Temperaturerhöhungen von durchschnittlich 2,5 – 3,5 °C erwartet (Abb. 8.11). Regional unterschiedliche Temperaturerhöhungen ergeben sich von bis zu 5 °C in den Alpen und 3 °C an der Ostsee.

Die Sommer würden in Süd-, Südwest- und Nordostdeutschland wahrscheinlich trockener werden. Die Gesamtmenge des Niederschlags wird sich kaum ändern, aber in den süddeutschen Gebirgen gibt es im Winter bis zu einem Drittel mehr Niederschlag. Nach dem aktuellen Stand der Forschung ist die Änderung des Niederschlags bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Jahresmittel im Vergleich zu heute (1961-1990) unklar. Einige Modelle zeigen eine Zu-, andere eine Abnahme. Die mögliche mittlere Änderung beträgt +4% (<http://www.regionaler-klimaatlas.de/>).

Eine neuere regionale Modellstudie (WETREG) für Deutschland, veröffentlicht im Februar 2007 durch das UBA, zeigt ähnliche aber geringere Temperaturveränderungen mit regionalen Unterschieden im Vergleich zu den REMO Modell Ergebnissen. Nach diesen Modellergebnissen könnte die mittlere Temperatur bis Ende des 21. Jahrhunderts um 1,8 bis 2,3° C steigen (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3133.pdf>, 2007). Die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Modellrechnungen konnten bislang nicht erklärt werden.

Nach Werner 2007 ist man inzwischen in der Entwicklung so weit, dass alle Modelle Tendenzen bezüglich der Temperatur in die gleiche Richtung aufweisen. Für andere meteorologische Größen, wie zum Beispiel den Niederschlag, bestehen noch Unterschiede in Raum und Zeit hinsichtlich ihrer zukünftigen Ausprägung.

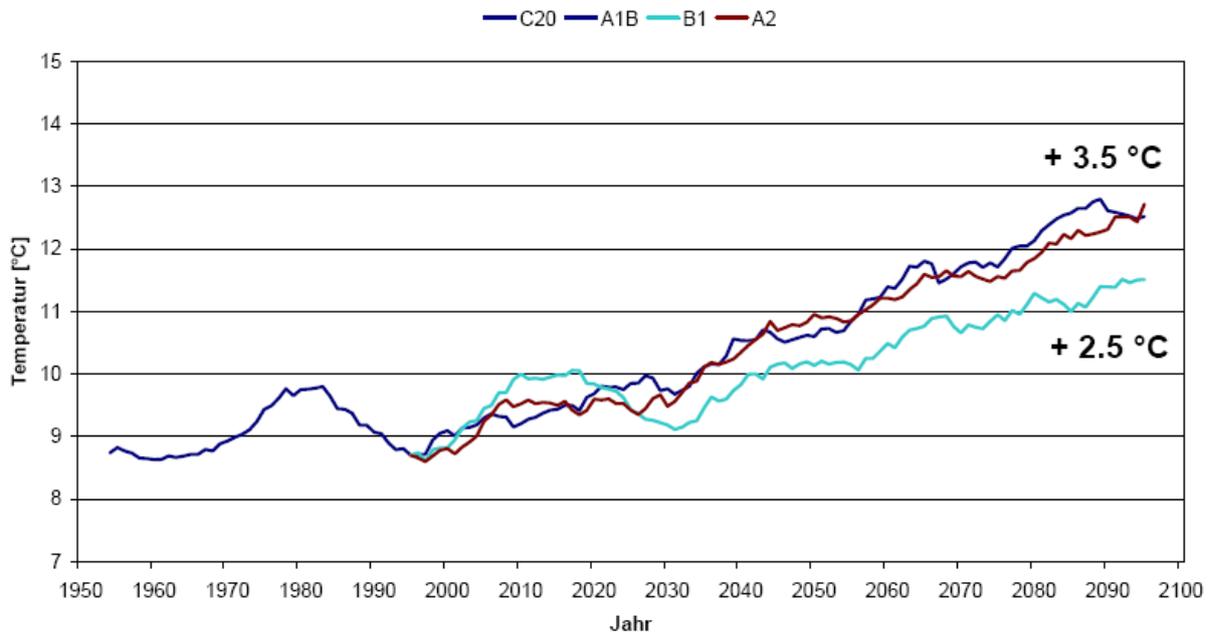


Abb. 8.11: Zeitlicher Verlauf der simulierten Lufttemperatur (°C) in Deutschland für die drei Emissionsszenarien des IPCC (A1B, B1, A2) 2000 – 2100 ([www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Klimaaenderungsworkshop.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Klimaaenderungsworkshop.pdf))

Unsicherheiten bei den Auswirkungen der regionalen Klimaänderungen haben viele Ursachen, nicht zuletzt durch die verwendete downscaling Methode, das Klimamodell und die ausgewählten Emissionsszenarien. Ensemble Experimente zeigen, dass die Vorhersagbarkeit regionaler Klimaänderungen stark variiert (Vidale 2003). Auch die Unsicherheiten aufgrund der inneren Variabilität werden größer, wenn sich die räumliche Ausdehnung von der globalen Skala auf eine kontinentale Skala reduziert (Stott 2003). Die Unterschiede bei verschiedenen Modellrechnungen sind in der Projektion der regionalen Temperaturen jedoch kleiner als die der Niederschlagsänderungen.

Der 2009 geschaffene regionale interaktive Klima-Atlas für Deutschland des Regionalen Klimabüros der Helmholtz-Gemeinschaft (<http://www.klimabuero.de/>) zeigt die mit den drei etablierten regionalen Klimarechenmodellen (COSMO-CLM, REMO, RCAO) berechneten Klimaveränderungen bis Ende dieses Jahrhunderts. Grundlage sind regionale Klimaszenarien verschiedener Forschungseinrichtungen, die für Deutschland zusammengeführt und auf nationaler und regionaler Ebene ausgewertet wurden. Wie unterschiedlich sich der Klimawandel in den einzelnen Bundesländern künftig auswirken kann, zeigt seit Februar 2010 der Regionale Klimaatlas Deutschland. Unter [www.regionaler-klimaatlas.de](http://www.regionaler-klimaatlas.de) sind mögliche Klimaszenarien für die deutschen Bundesländer im Internet abrufbar. Nicht nur im Jahresdurchschnitt sondern auch in allen Jahreszeiten scheint sich der Erwärmungstrend in ganz Deutschland fortzusetzen. Für den Winter weisen die Klimarechnungen außerdem auf eine flächendeckende Zunahme des Niederschlages hin. Zusätzlich können sich bis Ende des Jahrhunderts bundesweit die Winterstürme verstärken. Parallel können sommerliche Niederschläge und Windgeschwindigkeiten innerhalb dieses Jahrhunderts in allen Bundesländern deutlich abnehmen (Meinke 2010).

#### 8.2.4 Nachweis des Treibhauseffektes - Einflussfaktoren für die Modellrechnung

Mit Hilfe der Klimamodellrechnungen wird versucht, die Ursachen für die Klimaänderungen zu identifizieren und gleichzeitig die Modelle an den Klimabeobachtungen zu testen. Um bei Modellrechnungen zu realistischen Ergebnissen zu gelangen, müssen alle Einflussfaktoren auf das Klimasystem berücksichtigt werden (Abb. 8.12).

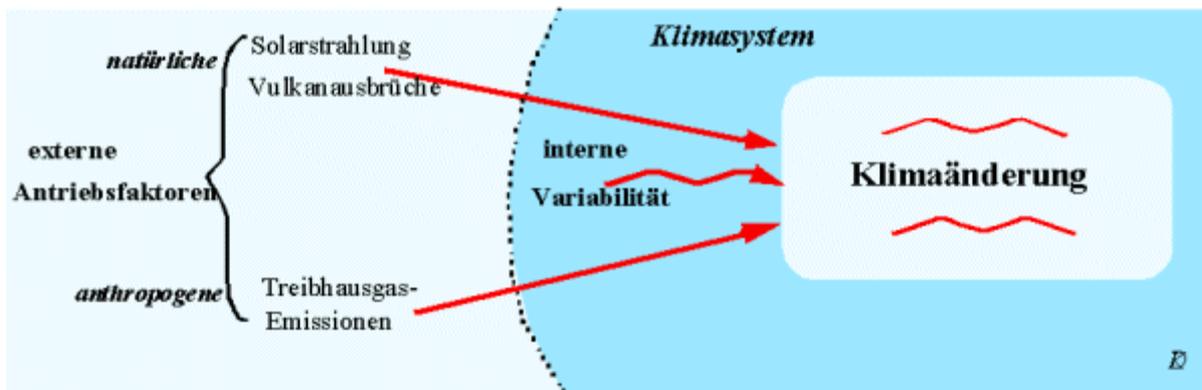


Abb. 8.12: Externe (natürliche und anthropogene) und interne Einflussfaktoren auf das Klimasystem (Kasang, HBS 2005)

Hierzu wurde eine Vielzahl von Klimamodellrechnungen durchgeführt, die in Abbildung 8.13 wiedergegeben werden. In (a) wurden die natürlichen Antriebskräfte bzw. deren Schwankungen (solare Variabilität und Vulkanismus) sowie die anthropogenen (Treibhausgase und Aerosole) berücksichtigt. Die rote Kurve ist in guter Übereinstimmung mit dem beobachteten Verlauf der mittleren globalen Temperatur. Der jeweilige Temperaturrückgang nach großen Vulkanausbrüchen ist klar ersichtlich. In (b) wird der Temperaturverlauf (blaue Kurve) mit Modellrechnungen, die nur die natürlichen

Antriebskräfte beinhalten, gezeigt. Der beobachtete Temperaturanstieg ab Mitte der 70er Jahre kann damit nicht erklärt werden. Die hier gezeigten Ergebnisse der Klimamodellrechnungen zeigen, dass die heutigen Klimamodelle in der Lage sind, den beobachteten Temperaturentrend im 20. Jahrhundert in guter Näherung zu reproduzieren, wenn die wichtigsten anthropogenen Einflussfaktoren wie Treibhausgase und Aerosole berücksichtigt werden (IPCC 2007).

Auch mit der so genannten Fingerprint-Methode, mit der das unterschiedliche räumliche Erwärmungsmuster infolge solarer Einstrahlungsänderung bzw. anthropogener Einflüsse untersucht wird, zeigt sich in den letzten Jahrzehnten ein deutliches Überwiegen des anthropogenen Musters. Der Treibhauseffekt erzeugt ein anderes Erwärmungsmuster (besonders hoch in hohen Breiten und über den Kontinenten) in der Vertikalen und Horizontalen als eine vermehrte Sonneneinstrahlung (Kaminski u. Cubasch 2003). Die beobachtete Erhöhung der Tropopause um einige 100 m ist nach Santer 2005 ein weiterer „fingerprint“ für den anthropogenen Beitrag zur Klimaerwärmung. Auch die von Santer 2007 beobachtete Erhöhung des Wasserdampfgehaltes in der Atmosphäre über den Ozeanen seit 1988 ist ein weiterer Fingerprint, der sich auch aus den Klimamodellrechnungen ergibt. Dies wird auch von einer Reanalyse von Daten verschiedener Auswertezentren bestätigt, die eine generelle Zunahme des Wasserdampfgehaltes in der Troposphäre in den vergangenen Jahrzehnten feststellen (Dessler 2010). Auch die beobachtete Temperaturerhöhung überwiegend im Winter und nachts stimmt mit den theoretischen Erwartungen überein (UBA 2004). Nach IPCC 2007 haben sich seit 1979 bis 2004 die Tag und Nachttemperaturen um ungefähr denselben Betrag angehoben. Der Trend ist sehr variabel von einer Region zu einer anderen (IPCC 2007).

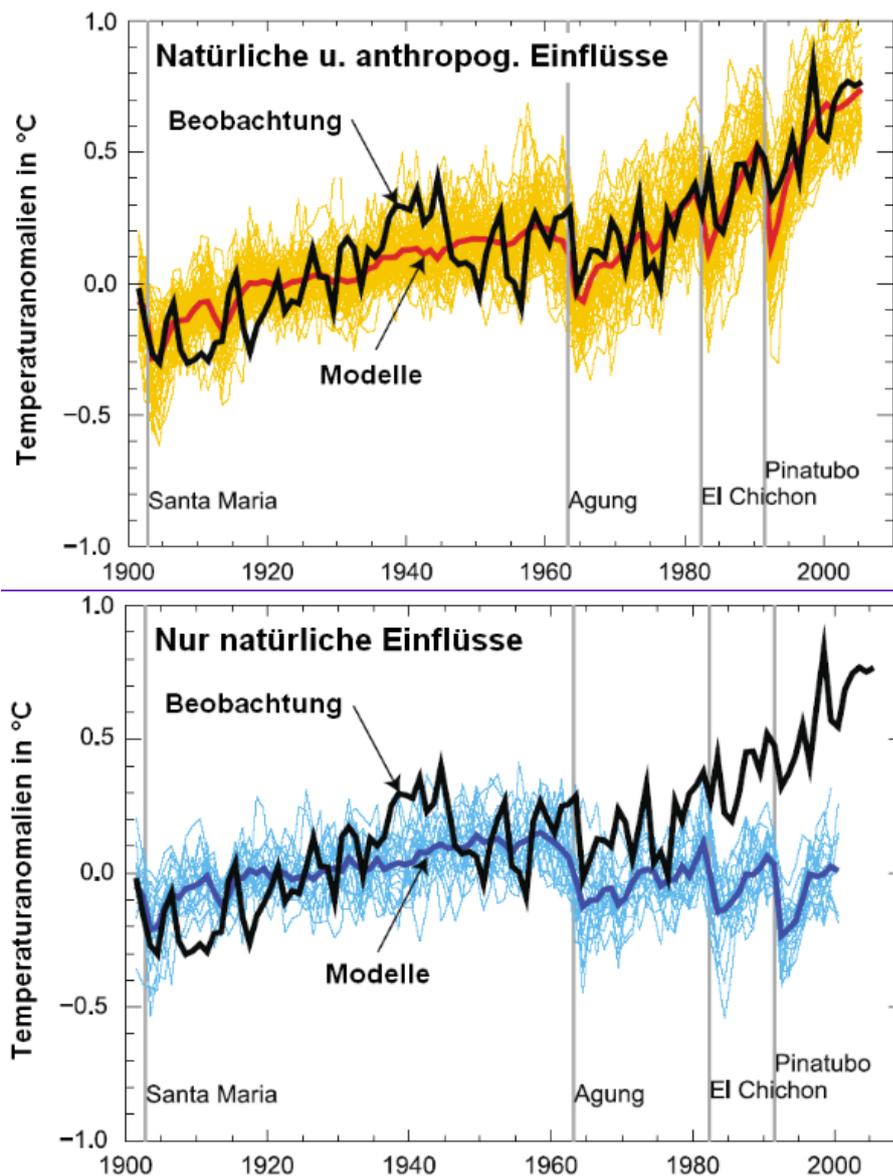


Abb. 8.13: Vergleich der Anomalien der globalen mittleren Oberflächentemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) aus Beobachtungen (schwarz) und Klimamodellrechnungen angetrieben mit (a) beide natürliche und anthropogene Kräfte sowie (b) nur natürliche Antriebe. Alle Daten werden als globale mittlere Temperaturanomalien relativ zur Periode 1901 – 1950 gezeigt. Das Multimodellensemble aus 58 Modellen wird als dicke rote Kurve gezeigt und einzelne Simulationen als dünne gelbe Kurven. Das Multimodellensemble aus 19 Modellen nur mit natürlichen Antrieben in (b) wird als dicke blaue Kurve gezeigt und einzelne Simulationen als dünne blaue Kurven. (IPCC 2007)

Die von *Barnett 2005* gemessene Verteilung der Erwärmung des Ozeans wird ebenfalls als ein Beweis („Smoking gun“) des anthropogenen Treibhauseffekt angesehen (s. Kap. 9.5.1).

Eine Studie (*Rahmstorf 2006*) Ende der 90er Jahre ergab, dass der Temperaturverlauf bis 1940 sowohl durch eine Kombination von Treibhausgasen und interner Variabilität erklärt werden kann als auch teilweise durch einen Anstieg der Sonnenaktivität. Der weitere Verlauf zwischen 1940 und 1970 ergibt sich aus der Überlagerung des abkühlenden Effektes der Aerosole und des wärmenden Effektes der Treibhausgase. *Grieser 2000* stellt mit empirisch-statistischen Analysen einen hoch signifikanten Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Treibhausgase und dem Anstieg der globalen Mitteltemperatur fest. Für Europa ist das weniger deutlich, da hier der NAO-Einfluss überwiegt. Auch *Rybski 2006* hat nach statistischen Analysen der Temperaturzeitreihen festgestellt, dass bei der Erwärmung im 20. Jahrhundert die Treibhausgase eine Rolle gespielt haben müssten. *Rahmstorf 2007* hat eine gute Übereinstimmung der Klimaprojektionen für den TAR mit den beobachteten Trends der globalen mittleren Temperatur, der Kohlendioxidkonzentration und dem Meeresspiegelanstieg seit 1990 festgestellt. (Zur Fortsetzung des Trends nimmt Rahmstorf hier Stellung: [http://www.pik-potsdam.de/~stefan/update\\_science2007.html](http://www.pik-potsdam.de/~stefan/update_science2007.html)). *Zorita 2008* weist mit statistischen Methoden nach, dass es extrem unwahrscheinlich ist, dass die Erwärmung der ver-

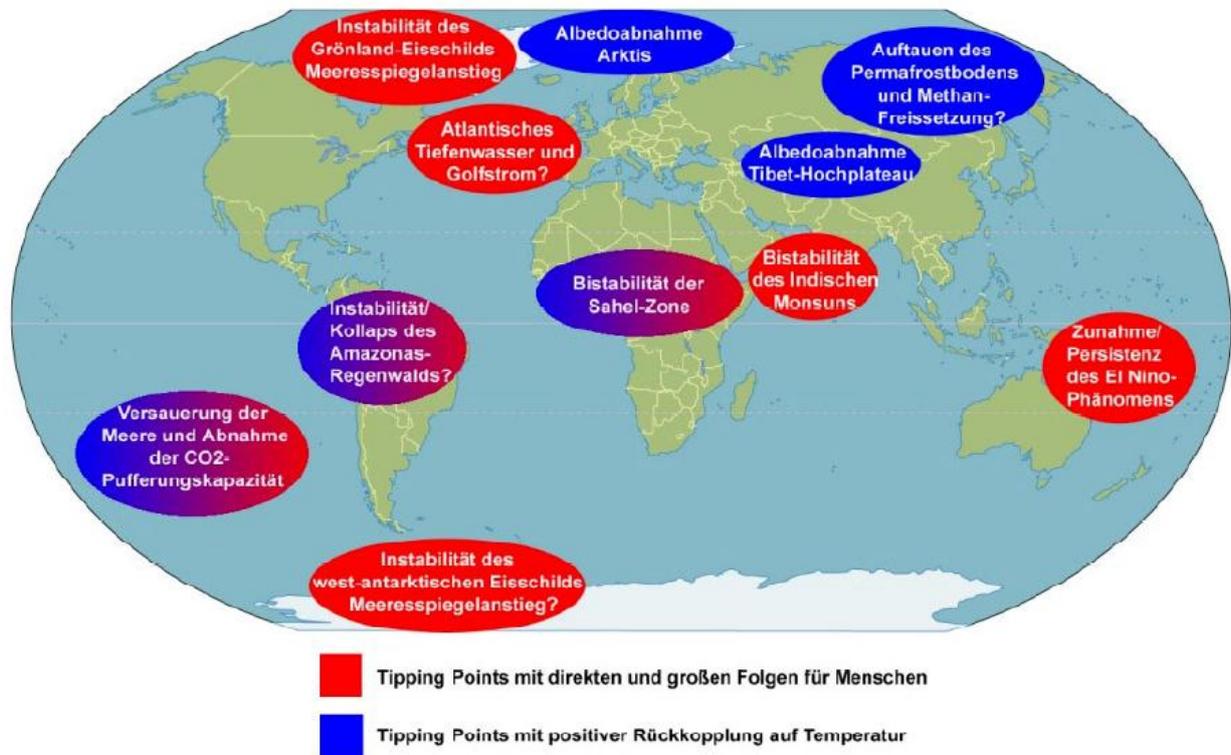
gangenen Jahrzehnte durch natürliche Schwankungen verursacht worden ist. Die Messung der Strahlungsbilanz an der Tropopause mit hochauflösenden Satellitensensoren – wie am Ende von Kap. 3.3. erläutert - ist ein weiterer Beleg für den Treibhauseffekt.

Die **Klimasensitivität** ist eine wichtige Maßzahl der Klimawissenschaftler für die Wirkung der Treibhausgase auf die Temperatur und damit auf die künftige Temperaturentwicklung bei einem weiteren Anstieg der Treibhausgase. Sie gibt die Erwärmung an bei einer Verdoppelung der Treibhausgase im Gleichgewicht (in Grad Celsius pro Strahlungseinheit ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ )). Die Bandbreite von  $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  mit einem wahrscheinlichen Wert von ca.  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  hat sich in vielen Modellstudien immer wieder bestätigt und wird auch im 4. Bericht des IPCC als wahrscheinlichster Wert angesehen. Die direkte Erwärmung aus der Strahlungswirkung bei einer Kohlendioxidverdoppelung ergibt  $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dazu müssen die Rückkoppelungen über den Wasserdampf, Eis-Albedo und Wolken berücksichtigt werden. Die größte Unsicherheit ergibt sich immer noch durch das mangelnde Wissen über das Verhalten der Wolken. Umfangreiche Messprogramme sind hierzu im Gange (*Rahmstorf 2006*).

**Fazit:** Zahlreiche Untersuchungen von Klimawissenschaftlern belegen mit verschiedenen Methoden, dass die Klimaerwärmung in den vergangenen 30 Jahren durch anthropogene Faktoren maßgeblich mit verursacht wurde (*IPCC 2007*).

## 9 Auswirkungen der Klimaänderung

Aussagen über Änderungen globaler Mittelwerte allein geben über die Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Natur und die Menschheit noch keinen Hinweis. Klimaänderungen können für Mensch und Natur regional unterschiedlich positive wie negative Folgen haben.



Grafik: Erstellt und übersetzt von Germanwatch auf der Grundlage der "World Map of Tipping Points in Climate Change" von Prof. Hans Joachim Schellnhuber

Abb. 9.1: Weltkarte mit „Kipp-Gebieten“, in welchen über mögliche Klimaauswirkungen diskutiert wird (Schellnhuber, Vortrag DPG 2005 und <http://www.germanwatch.org/rio/hisint06.pdf>)

Abbildung 9.1 zeigt eine Weltkarte nach *Schellnhuber 2005* mit kritischen Gebieten (Kipp-Punkten, tipping points), in welchen über mögliche abrupte Klimaauswirkungen diskutiert wird.

Die Kipp-Punkte sollen Regionen aufzeigen, in denen - ausgelöst vorwiegend durch eine anthropogene Klimaerwärmung - kurzfristige abrupte Effekte in zumindest subkontinentalem Ausmaß auftreten könnten. Hierzu zählen u.a. die Instabilität des Grönlandeises, der Regenwald des Amazonas, das Auftauen des Permafrostbodens und der asiatische Sommermonsun (*Lenton 2008*).

Positiv könnte sich eine mögliche Wiederbegrünung der Sahelzone auswirken, auch Änderungen des Sommermonsuns könnten regional positive Auswirkungen haben aber auch abrupt abbrechen, was erhebliche Folgen haben kann, da von der Regelmäßigkeit der Monsunniederschläge die landwirtschaftliche Nahrungsmittelversorgung von mehreren Hundert Millionen Menschen in den Monsunregionen abhängt (*Levermann 2009*).

Um die Klimafolgen zu beurteilen, ist eine sehr differenzierte Betrachtungsweise notwendig. Höhere Temperaturen begünstigen in vielen Regionen den Ackerbau und die Ernteerträge – solange genügend Wasser zur Bewässerung da ist. In anderen Regionen führt eine Temperaturerhöhung zu mehr Dürren und Verringerung der Ernteerträge. Eine eisfreie Arktis begünstigt die Schifffahrt und würde die Seewege erheblich verkürzen, aber die Albedo würde erheblich verändert, mit entsprechenden Klimafolgen. Wärmere Winter verringern die Zahl der Heiztage, dagegen kommen in heißeren Sommern mehr Klimaanlage zum Einsatz, wo-

durch der Energieverbrauch erhöht wird. Zahlreiche Wissenschaftler haben sich mit den Kippelementen beschäftigt und neue Ergebnisse in der Sonderausgabe vom PNAS veröffentlicht (*Schellnhuber 2009*). Auf fünf dieser Elemente wird darin näher eingegangen: das Klimaphänomen El Niño/Südliche Oszillation (ENSO), das Arktische Meereis und die großen polaren Eisschilde, den Amazonas-Regenwald, die Monsunsysteme sowie die Zirkulation von Meeresströmungen im Atlantik. Eine gute Zusammenfassung gibt auch das Hintergrundpapier des UBA 2008 „Kipp-Punkte des Klimasystems – Welche Gefahren drohen?“

### 9.1 Temperaturextreme

Unter Extremereignissen versteht man seltene Wetter- und Naturereignisse, die stark vom Durchschnitt abweichen. Extremereignisse können große Schäden verursachen. In der Wissenschaft wird diskutiert, ob die zu beobachtende Klimaveränderung eine Zunahme von Extremereignissen zur Folge haben wird.

Aus rein statistischen Überlegungen muss von einer Zunahme an heißen Tagen bei einer Erhöhung der mittleren Temperatur ausgegangen werden (Abb. 9.2). Aufgrund von einfachen statistischen Überlegungen führt im Beispiel von Abb. 9.2 ein leichter Anstieg der mittleren Sommertemperatur zu einer vermehrten Häufigkeit von Hitzewellen.

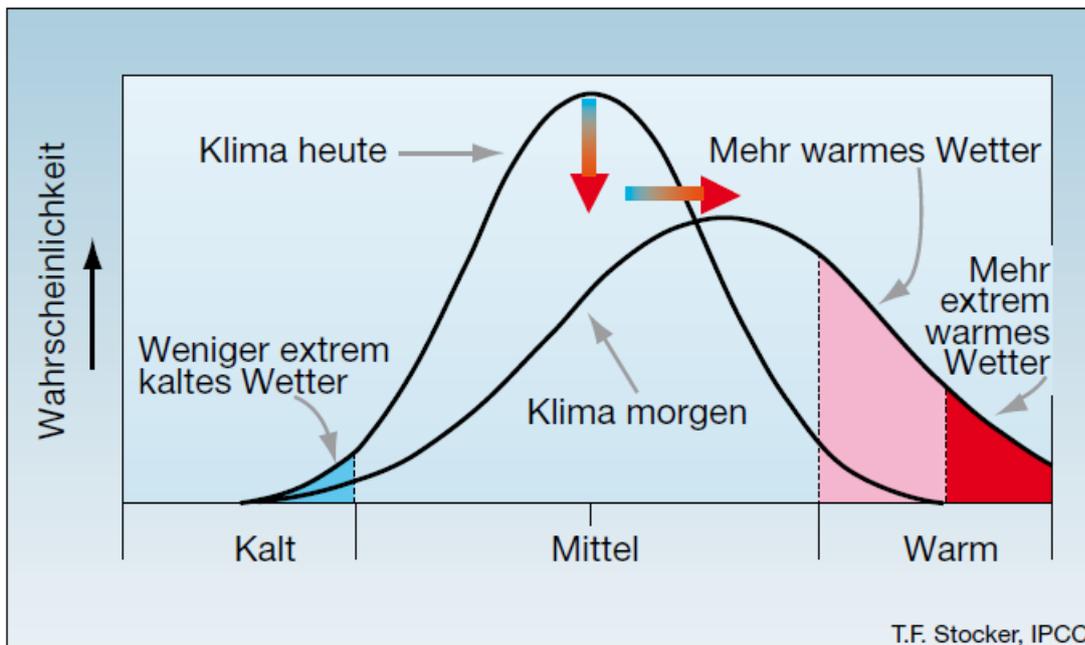


Abb. 9.2: Schematische Häufigkeitsverteilung der Sommertemperatur in Mitteleuropa. Durch einen leichten Anstieg des Mittelwerts (Verschiebung der Verteilungskurve nach rechts) kommen kältere Sommer weniger oft vor, wärmere Sommer werden aber um Zehnerpotenzen häufiger (rote Fläche nimmt stark zu). (<http://www.climate.unibe.ch/~stocker/papers/stocker07sev.pdf>)

Als Folge der Klimaveränderung dürften demnach höhere Temperaturextreme auftreten. Es wird erwartet, dass solche Hitzeperioden zu Ernteaufschlägen führen und auch mit zusätzlichen Todesfällen verbunden sind. Ein Beispiel hierfür ist der extrem heiße Sommer 2003, in dem allein in Deutschland ca. 3500 hitzebedingte Sterbefälle - in Europa mehr als 20.000 - zu verzeichnen waren (*Schär 2004*). Zu beachten ist hierbei jedoch, dass eine Auswertung verschiedener Hitzewellen ergab, dass die Sterbefälle nach Ende der Hitzewelle unter den mittleren Erwartungswert absinken („harvesting effect“). Das heißt, ein Teil der erhöhten Mortalität ist während einer Hitzeperiode um einige Tage vorgezogen. Epidemiologische Studien ergaben jedoch auch Todesfälle, die ohne die Hitzeeinwirkung in den folgenden Wochen nicht zu erwarten gewesen waren (*Münchener Rück 2004*), also eine auch über eine lange Zeit bestehende reale Erhöhung der Mortalität.

*Stott 2004* kommt zu dem Ergebnis, mehr als die Hälfte des Risikos für einen Hitzesommer wie 2003 könne dem menschlichen Einfluss zugerechnet werden (Irrtumswahrscheinlichkeit 10 %). Modellrechnungen ergeben, dass in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts in Europa und USA sehr wahrscheinlich häufiger Hitzewellen auftreten werden (*IPCC 2007*).

*IPCC 2007* hat festgestellt, dass sich der Anteil der sehr trockenen Gebiete an der globalen Landoberfläche seit den 70er Jahren deutlich erhöht hat. Dargestellt wird das in Abb. 9.3 mit dem sog. Trockenheitsindex PDSI. Eurasien, Afrika, Kanada, Alaska, Ostaustralien und der Mittelmeerraum wurden seit den 50er Jahren trockener, und Argentinien, die südlichen Vereinigten Staaten und Westaustralien wurden im gleichen Zeitraum niederschlagsreicher.

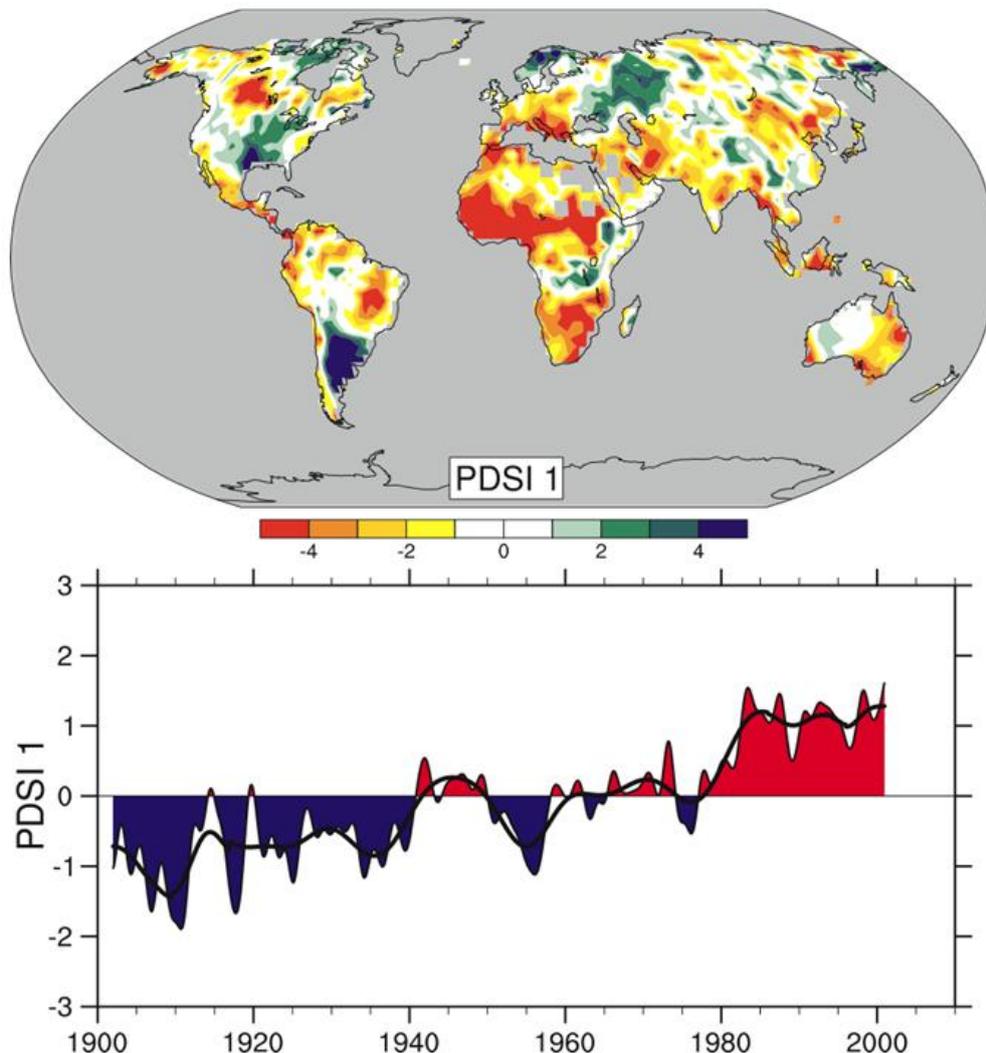


Abb. 9.3: Der Anteil sehr trockener Gebiete an der globalen Landoberfläche (60 S - 75 N) von 190 bis 2002. PDSI ist ein Trockenheitsindex. Grüne und blaue Flächen zeigen zunehmend feuchtere, gelbe und rote Flächen zunehmend trockenere Bedingungen. Deutliche Zunahme der trockeneren Gebiete seit den 1970er Jahren ist ersichtlich (*IPCC 2007*).

Für Deutschland wurde in einer Studie des Potsdam Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) (*Zebisch 2005*) eine Zunahme der Hitzeextreme in den letzten 100 Jahren festgestellt.

## 9.2 Niederschlag, Hochwasser

Auf einer wärmeren Erde nehmen die Niederschläge insgesamt zu, da mehr Wasser verdunstet und die Atmosphäre mehr Wasser aufnehmen kann. Nach den Modellsimulationen verstärkt sich der Niederschlag hauptsächlich über Land (*Roeckner 2004*). Der Wasserkreislauf intensiviert sich dadurch, und die Wahrscheinlichkeit von Starkniederschlägen steigt an (Abb. 9.4). Aufgrund dieses Prozessverständnisses und der Modellrechnungen wird auch mit einer Zunahme der Intensität von Starkniederschlägen und Hochwasser gerechnet. Nach *IPCC 2007* haben im 20. Jahrhundert global die Starkniederschläge zugenommen.

Nach dem verheerenden Hochwasser 2002 an der Elbe hat *Mudelsee 2003* die historischen Hochwasserdaten von der Elbe und Oder ausgewertet und für die vergangenen 80 bzw. 150 Jahre keinen signifikanten Anstieg der Hochwasserauftrittsrates festgestellt, während dagegen der Pegel des Rheins in Köln – wenn auch unter erheblichen Fluktuationen – einen an-

steigenden Trend aufweist (Jonas 2005). Caspary 2004 hat in einer groß angelegten Studie für das KLIWA Projekt herausgefunden, dass in Süddeutschland seit den 70er Jahren die Hochwasserpegel (90 Pegel) zugenommen haben.

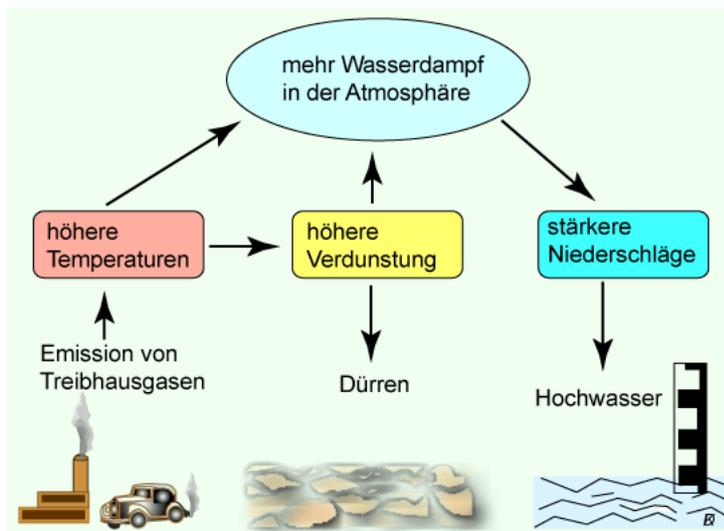


Abb. 9.4: Schematische Darstellung der Auswirkungen der Erhöhung des Wasserdampfgehaltes in der Atmosphäre. Die Folgen sind mehr Dürren und an anderen Orten mehr Niederschläge (Kasang, HBS 2005)

Auch wenn im globalen Mittel die Aussagen über die Intensivierung des Wasserkreislaufes gelten, zeigt die Auswertung der Hochwasserdaten, dass regional andere Einflussfaktoren dominieren können. Die räumliche Verteilung der Niederschläge hängt eng mit den horizontalen und insbesondere vertikalen Bewegungsvorgängen der Atmosphäre zusammen. Daher sind die Wetterlagen mit ihren spezifischen Zirkulationsmustern eine wichtige Einflussgröße für den Niederschlag. Die Änderung bestimmter Wetterlagen kann somit das Auftreten von Starkniederschlägen beeinflussen (Fricke 2002). Eine Auswertung für den Hohenpeißenberg in Bayern ergab, dass die Zunahme der Zahl der Tage mit Starkniederschlägen mit der Zunahme von Großwetterlagen einhergeht, bei denen Starkniederschläge bevorzugt auftreten. Eine deutschlandweite Analyse von Starkniederschlägen von 1901 bzw. 1951 bis 2000 zeigt eine Zunahme der Starkniederschlagstage und der Starkniederschlagsintensität. Im Winter traten höhere und signifikantere Trendzuwächse (30-35 %) auf als im Sommer (Zimmermann 2003, Schönwiese 2008). Jonas 2005, Schönwiese 2008 stellt zwar Änderungen der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen in Mitteleuropa fest, stimmt aber der generellen Aussage nicht zu, dass das Klima in Deutschland allgemein extremer geworden sei.

Auch die Europäische Umweltagentur stellt in ihrem Bericht 2008 (EEA 2008) fest, dass es in den vergangenen Jahrzehnten keinen eindeutigen Trend gibt für Hochwasserereignisse in Europa. Nach Modellrechnungen könnten jedoch die Hochwasser mit steigender Klimaerwärmung deutlich zunehmen (EEA 2008).

### 9.3 Stürme und Hurrikane

Die Diskussion um eine mögliche Zunahme von Stürmen und Hurrikanen ist in Fachkreisen immer noch im Gange und teilweise heftig umstritten.

Als Sturm werden Winde mit Geschwindigkeiten von mindestens 75 km/h oder Windstärke 9 Beaufort bezeichnet. Ein Sturm mit einer Windgeschwindigkeit von mindestens 118 km/h oder Stärke 12 Beaufort wird als Orkan bezeichnet. Stürme können entstehen, wenn hohe Druckgradienten (hohe Druckunterschiede auf relativ kurzer Distanz) auftreten. Diese sind als Sturmtief häufig im Einflussbereich starker Tiefdruckgebiete vorhanden.

#### 9.3.1 Stürme

Elsner 2008 hat nach Auswertung von Satellitendaten eine Verstärkung (Erhöhung der Windgeschwindigkeit) von tropischen Zyklonen im Nordatlantik in den vergangenen 30 Jahren gefunden. Abbildung 9.5 zeigt für verschiedene Teile in Europa keinen eindeutigen lang-

fristigen Trend des Sturmindex. In Zentraleuropa ist eher eine leichte Abnahme festzustellen. Deutlich wird, dass seit Beginn der 70er Jahre bis zu den 90er Jahre die Sturmhäufigkeit in Nordwesteuropa im Bereich der Nordsee zugenommen hat, aber auch, dass um 1880 schon einmal die gleichen Verhältnisse vorlagen. Ab Mitte der 90er Jahre ist dann die Sturmhäufigkeit wieder zurückgegangen. Die Windgeschwindigkeitsauswertungen, wie auch die Auswertungen niedriger Luftdruckwerte selbst, ergaben übereinstimmend eine überdurchschnittliche Häufigkeit von Stürmen und kräftigen Tiefdruckgebieten über dem Nordatlantik in den 90er Jahren. Da ein ähnliches Maximum Ende des 19. Jahrhunderts vorlag, kann es sich bei dem Anstieg auch um eine kurzperiodische Schwingung im Klimasystem handeln (*Lefebvre 2003*), was sich durch den anschließenden Rückgang der Sturmhäufigkeit bestätigte. Eine Zunahme der Windböen über Windstärke 6 wurde von *Otte 2000* für einige deutsche Stationen im Zeitraum 1969 – 1999 beobachtet. *Weisse 2005* fand im östlichen Nordatlantik und der Nordsee eine Zunahme der Sturmaktivität im Zeitraum 1958 bis 2002, die jedoch teilweise wieder zurückging, bzw. deren Anstiegsrate sich in den letzten Jahren wieder verlangsamte.

### Storm index

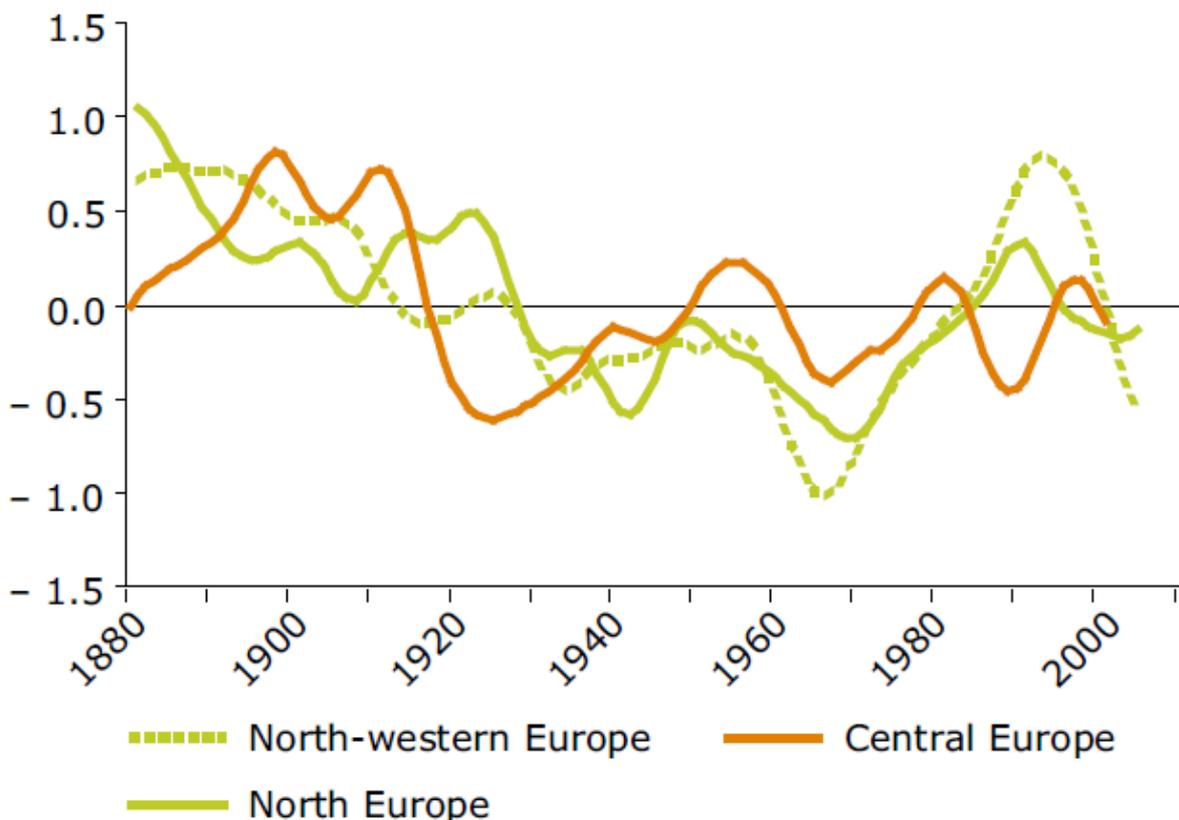


Abb. 9.5: Sturmindex für Nordwesteuropa, Nordeuropa und Zentraleuropa für den Zeitraum 1881 – 2005, positive Werte des Index bedeuten mehr Stürme. (Matulla 2007)

*Franke 2008* zeigt (Abb. 9.6), dass zwischen 1979 und 2007 von Jahr zu Jahr eine deutliche Variabilität der mittleren Windgeschwindigkeiten in der Deutschen Bucht aufgetreten ist, jedoch kein nennenswerter Trend. Insbesondere wird deutlich, dass zwischen 1880 und 1925 durchaus vergleichbar hohe mittlere Windgeschwindigkeiten herrschten wie in den windreichen 1990er Jahren.

Da repräsentative Windmessungen für einen längeren Zeitraum nicht verfügbar sind, wird für Aussagen über die Veränderung des Windfeldes häufig auf den geostrophischen Wind zurückgegriffen. Hierzu werden aus Luftdruckdaten rekonstruierte Windgeschwindigkeitswerte herangezogen. Die Ableitung der Windgeschwindigkeit aus Luftdruckdaten ist jedoch nicht immer verlässlich, insbesondere in topographisch bewegtem Gelände.

Für Mittel- und Westeuropa lässt sich nach *Matulla 2007*, *Rosenhagen 2009* keine langzeitliche Zunahme von Stürmen – an Stärke und/oder Häufigkeit – nachweisen. Auswertungen

von Zeitreihen, die zum Teil bis Ende des 19. Jahrhunderts zurückreichen, zeigen starke Schwankungen von Jahr zu Jahr und über lange Zeiträume. Verstärkte Sturmaktivität fand zu Beginn, in der Mitte und in den 90er Jahren des 20. Jahrhundert statt (Abb. 9.5).

Nach *IPCC 2007* haben sich die Sturmbahnen im Nordatlantik und Nordpazifik in den letzten Jahrzehnten polwärts verschoben haben, im Nordatlantik im Winter z.B. um ca. 180 km. Damit einhergehend sind eine Zunahme der Tiefdruckaktivität im Winter in den höheren Breiten und eine Abnahme in den mittleren Breiten des nordatlantischen Raumes festzustellen. Über die Zu- oder Abnahme der Sturmaktivitäten in den letzten 50 Jahren gibt es nach *IPCC 2007* unterschiedliche Aussagen. Nach *Matulla 2007* kann man im Winter und Frühjahr eine enge Korrelation zwischen der Nordatlantischen Oszillation (NAO) und der Sturmaktivität feststellen. Je höher der NAO-Index, desto kräftiger waren vor allem in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Nordostatlantischen Sturmaktivitäten.

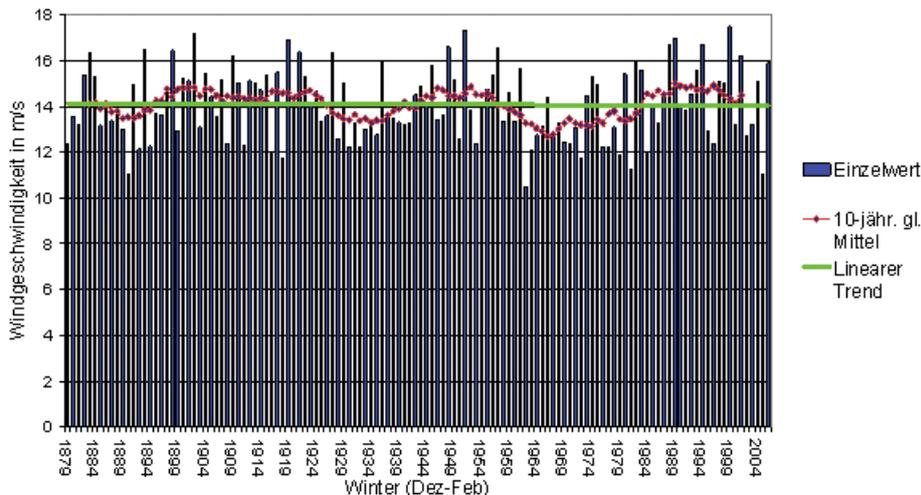


Abb. 9.6: Wintermittel des geostrophischen Windes für die Deutsche Bucht zwischen 1879/80 und 2006/07 (Einzelwerte und 10-jährig gleitendes Mittel und linearer Trend), *Franke 2008* (Klimastatusbericht 2008)

Modellrechnungen im Rahmen des EU-Projektes PRUDENCE ergaben, dass unter künftigen klimatischen Bedingungen Sturmflutextreme an der Nordseeküste zunehmen könnten (*Woth 2005, Barring 2004*). Eine Zunahme der Tiefdruckaktivitäten für Nordwesteuropa hat *Ulbrich 1999* für eine Kohlendioxid-Verdoppelung berechnet (Abb. 9.7). *Leckebusch 2008* hat anhand von Modellrechnungen (multi ensemble) für das 21. Jahrhundert eine globale Abnahme der extremen Wirbelstürme aufgrund der anthropogenen Klimaerwärmung berechnet, jedoch nicht für sog. Hot spots wie den Nordost-pazifischen und Nordost-atlantischen Bereich, der auch das westliche Zentraleuropa betrifft. *Donat 2010* hat die mit neuen Modellrechnungen Zunahme der Stürme und Windgeschwindigkeiten in diesem Bereich bestätigt.

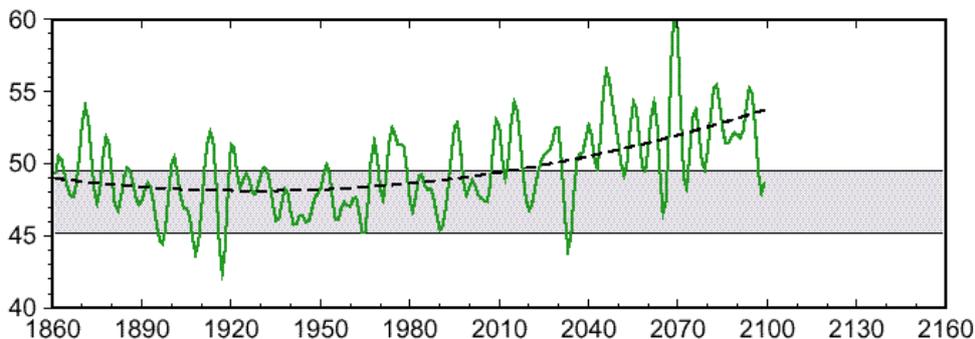


Abb. 9.7: Die Abbildung zeigt nach Modellrechnungen die Veränderungen der Tiefdruckaktivität (geopotentielle Meter) über Nordwesteuropa bei Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration (*Ulbrich 1999, Kasang, HBS 2005*)

Von *Storch 2005, Woth 2005* haben für die deutsche Nordseeküste die im Jahr 2070 zu erwartenden Sturmfluten berechnet und kommen zu einer Erhöhung bei einem sich fortsetzenden Klimawandel von ca. 70 cm. 30 bis 40 cm sind die Folgen erhöhter Sturmwasserstände, und 20 bis 40 cm sind die Folgen der thermischen Wasserausdehnung aufgrund der höheren Temperaturen sowie des Abschmelzens von Teilen des Grönlandeises und der Antarktis. Für

Deutschland wird nach den regionalen Klimamodellrechnungen bis Ende dieses Jahrhunderts im Mittel nur eine geringfügige Erhöhung der Sturmtage (1 – 2 Tage) und Intensitäten (0 - 2 %) berechnet (<http://www.regionaler-klimaatlas.de/>).

### Stand der Diskussion

Diskutiert wird in der Fachwelt, ob künftig bei einer weiteren Klimaerwärmung die Sturmhäufigkeit und/oder Sturmstärke zunehmen wird. Da infolge der zu erwartenden stärkeren Temperaturerhöhung in höheren Breiten der Temperaturgradient zwischen Äquator und Pol kleiner wird, sollte es eher zu einer Verringerung der Sturmaktivität kommen. Nach *Schönwiese 2008* ist es sogar möglich, dass als Folge der meridional unterschiedlichen Erwärmung der meridionale Luftdruckgradient in der gemäßigten Klimazone abnimmt. Auch eine weitere polwärtige Verlagerung der Sturmbahnen wird für möglich gehalten (*Bengtsson 2006, IPCC 2007*). *Ulbrich 2009* bestätigt in einem Review Beitrag die Aussagen des *IPCC 2007*, dass in einer wärmeren Welt die außertropischen Stürme generell abnehmen werden aber in bestimmten Bereichen des Nordatlantiks und Nordpazifiks die Stärke der Stürme zunehmen wird. *Bengtsson 2009* sieht nach Modellrechnungen keine großen Veränderungen für außertropische Wirbelstürme infolge des Klimawandels. Die größte Veränderung ergibt sich aufgrund des höheren Wasserdampfgehaltes in einer wärmeren Welt für die Niederschlagsmenge, die um bis zu 11 % zunehmen wird; regional können die Änderungen noch höher sein.

Modellrechnungen für die deutsche Nordseeküste von *von Storch 2005* ergeben eine Erhöhung der Sturmfluten und nur geringfügige Veränderungen der Sturmtage (s.o.).

### 9.3.2 Hurrikane (tropische Wirbelstürme)

Ein Hurrikan hat eine Windgeschwindigkeit von Orkanstärke, also Windstärke 12 (das entspricht mehr als 118 km/h). Der Hurrikan Katrina vom September 2005, mit seinen verheerenden Folgen für New Orleans und Umgebung, hat die Diskussion um einen möglichen Beitrag der globalen Erwärmung hinsichtlich der Intensität und der Häufigkeit von tropischen Wirbelstürmen neu entfacht. Das Jahr 2005 hat mit 27 – darunter 15 Hurrikane - die höchste Anzahl an tropischen Wirbelstürmen seit Beginn der Aufzeichnungen hervorgebracht ([www.noaa.gov](http://www.noaa.gov)) (Abb. 9.9). 1995 – 2005 hat sich die Hurrikanaktivität wieder verstärkt. In der Fachwelt ist ein Streit im Gange, ob die Zahl der Hurrikane in den vergangenen Jahrzehnten zugenommen hat oder die beobachtete Zunahme nur auf die verbesserte Beobachtung insbesondere durch Satelliten zurückzuführen. Während *Mann 2007, 2009* einen deutlichen Anstieg der Hurrikanaktivität in den vergangenen Jahrzehnten fand, hat *Landsea 2007* die früheren Beobachtungsdaten korrigiert und stellt dann nur einen geringen Anstieg in jüngster Zeit mehr fest. Insbesondere die Beobachtung, dass vor 1966 wesentlich mehr Hurrikane ins Land „eingefallen“ (Landfall) sind, als danach, nimmt *Landsea* als Hinweis, dass zu dieser Zeit nicht alle Hurrikane erfasst wurden. Das gilt unter der Annahme, dass der prozentuale Anteil der Hurrikane, die ins Land ziehen, früher in etwa gleich war, wie heute, was von *Mann 2007* bezweifelt wird. Außerdem werden heute auch sehr kurzzeitige tropische Stürme von 1 bis 2 Tage Dauer erfasst, die früher mangels ausreichender Beobachtungsstationen nur teilweise erfasst wurden. *Landsea* hat damit korrigierte Daten ab 1850 vorgelegt, wonach – neben den multidekadischen Schwankungen – nur ein geringer Anstieg seitdem festzustellen war (*Landsea 2010*). *Landsea* schließt zwar nicht aus, dass der beobachtete Anstieg an kurzzeitigen Wirbelstürmen ein echtes Klimasignal darstellt, hält es aber für plausibler, dass die Zunahme auf verbesserte Beobachtungen in Qualität und Quantität sowie der besseren Auswertetechniken zurückzuführen ist.

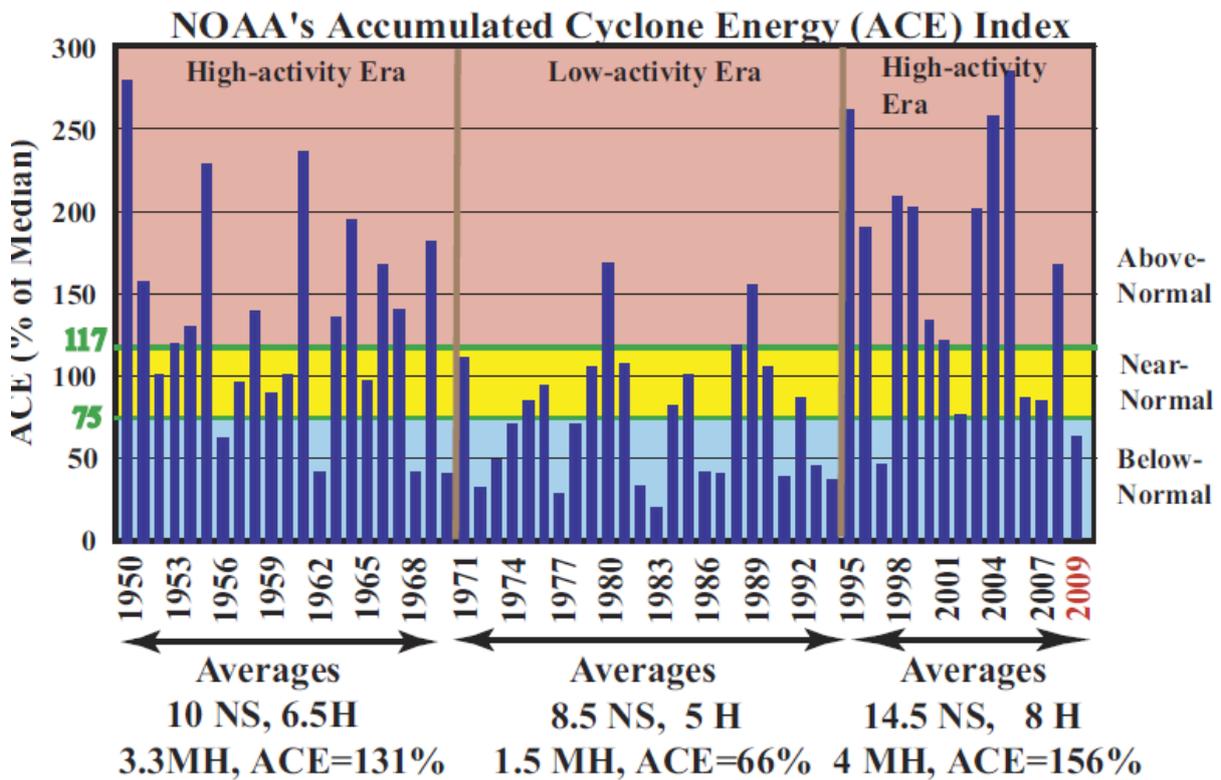
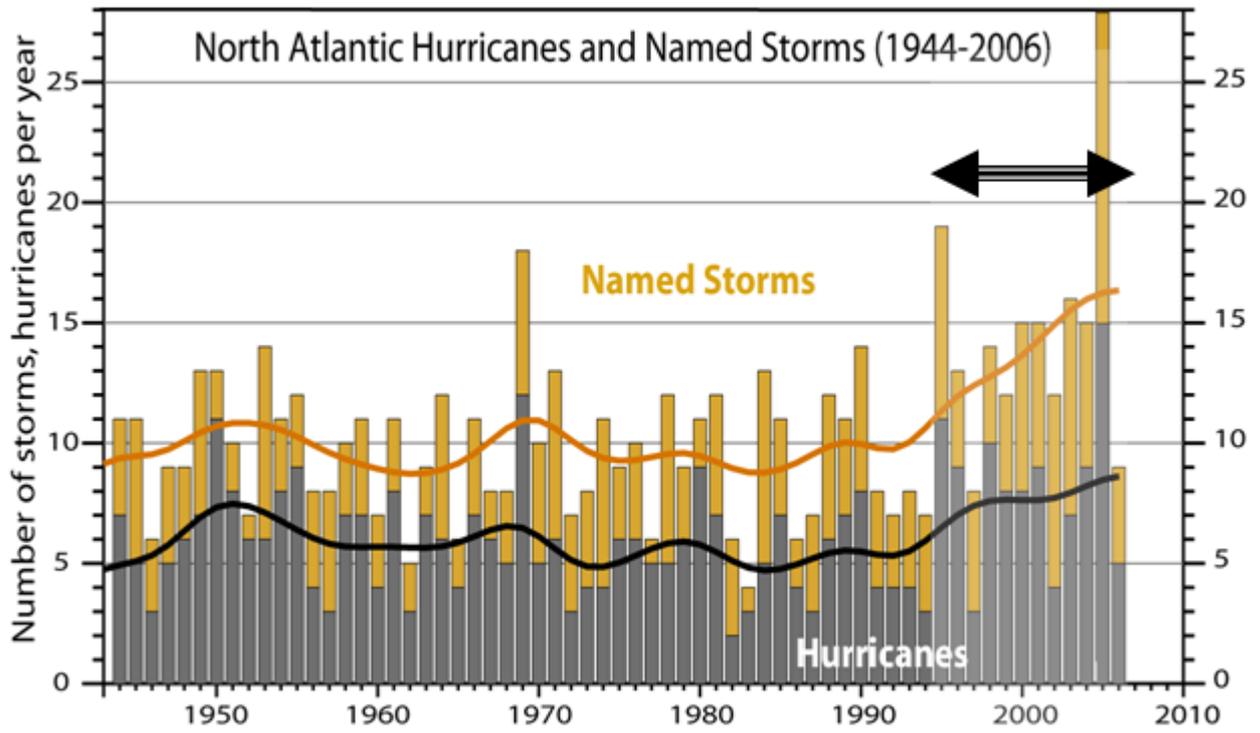


Abb. 9.9: oben: Anzahl der Stürme und Hurrikane im Nordatlantik 1944 - 2006 (Pachauri 2007)  
 unten: ACE Wert 1950 – 2009 ausgedrückt als Prozentsatz vom Mittelwert 1951 – 2000. ACE ist ein Windenergie-Index, der die kombinierte Stärke und Dauer von Wirbelstürmen misst. Der gelbe Bereich entspricht der „normalen“ Hurrikansaison. (Quelle: [http://www.cpc.noaa.gov/products/expert\\_assessment/hurrsurvey\\_2009.pdf](http://www.cpc.noaa.gov/products/expert_assessment/hurrsurvey_2009.pdf))

Dekadische Schwankungen der Hurrikan-Tätigkeit wurden bereits in den 40er und 50er Jahren beobachtet. In den 70er und 80er Jahren nahm die Hurrikantätigkeit deutlich ab. Als Ursache für die dekadischen Schwankungen wird eine entsprechende Schwankung der Ozean-temperatur angenommen, die möglicherweise mit der Variation der thermohalinen Zirkulation zusammenhängt.

Die Hurrikansaison 2008 war die viert- bzw. fünftstärkste seit 1944 mit 16 benannten („named“) Stürmen, davon 8 Hurrikane und 5 schwere Hurrikane (Stärke über 3) ([http://www.noaanews.noaa.gov/stories2008/20081126\\_hurricanesseason.html](http://www.noaanews.noaa.gov/stories2008/20081126_hurricanesseason.html)). In der atlantische Hurrikansaison 2009 traten 9 tropische Stürme (named storms) auf, von denen 3 zu Hurrikane und 2 zu schweren (major) Hurrikane wurden, damit lag 2009 60 % unter dem „Normalwert“. Als Ursache wird das im Juni 2009 einsetzende El Nino Ereignis angenommen ([http://www.cpc.noaa.gov/products/expert\\_assessment/hurrsummary\\_2009.pdf](http://www.cpc.noaa.gov/products/expert_assessment/hurrsummary_2009.pdf)). 2010 liegt (Stand (Anfang November) über dem Normalwert mit 19 tropischen Stürmen, davon 12 Hurrikane und 5 schwere (major) Hurrikane,

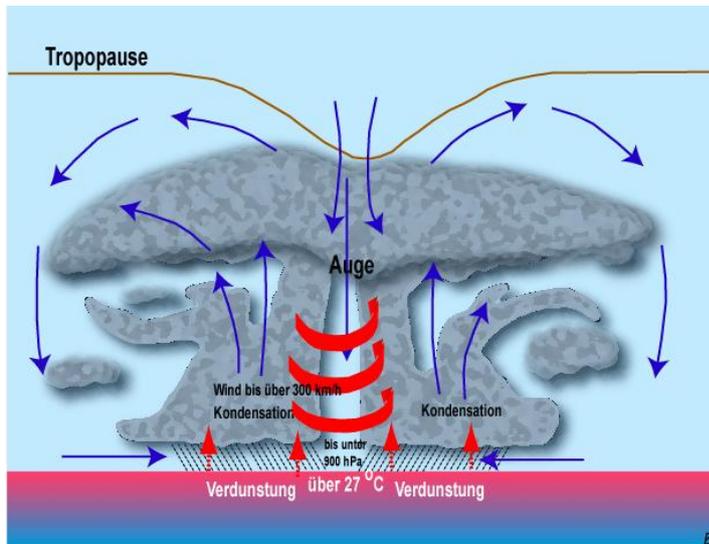


Abb. 9.8: Entstehung und Aufbau eines Hurrikans ( Kasang, HBS 2005)



Abb. 9.9: Hurrikan über Florida, USA ([www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2005/hurricanes05.html](http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2005/hurricanes05.html))

### Was ist ein Wirbelsturm?

Überall in tropischen Meeren entstehen Wirbelstürme, wenn das Meer warm genug ist und weitere Voraussetzungen vorliegen (Abb. 9.8, 9.9). Je nach der Gegend, in der sie auftreten, werden sie unterschiedlich genannt: Hurrikan in Amerika, im Atlantik und Ost-Pazifik; Taifun, im nördlichen Westpazifik bei Japan und China; Zyklon im Indischen Ozean und vor Ost-Afrika, Willy-Willy in Australien. Voraussetzungen für die Entstehung eines Wirbelsturms sind:

- Das Wasser muss eine Mindesttemperatur von über 26 °C haben.
- Die Luft muss voller Feuchtigkeit sein.
- Das Meer braucht eine gewisse Mindestgröße, wie Atlantik, Pazifik, Indischer Ozean.
- Die Höhenwinde dürfen nicht stark unterschiedlich wehen wie die Oberflächenwinde, also keine großen Scherwinde.
- Eine Wellenstörung (Easterly Wave) oder ein außertropisches Tief werden als Startmechanismus gebraucht.
- Die feuchtwarme Luft steigt auf und zieht weitere Luftmassen nach sich.
- Die kondensierende Luftfeuchtigkeit bildet Gewitterwolken und setzt zusätzliche Energie frei, wodurch der aufsteigende Luftstrom verstärkt wird.
- Die aufgestiegene Luft wird durch den hohen Luftdruck nach außen gedrückt.
- Durch die Erdumdrehung (Corioliskraft) wird der Sturm in Drehung versetzt (auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn und auf der Südhalbkugel entgegengesetzt).
- In der Mitte bildet sich ein windstilles Auge, in dem sich starke Aufwinde am Rande nach oben schrauben.
- In der Mitte des Auges wird die Luft nach unten gesaugt, und es bildet sich ein extrem niedriger Luftdruck.

Wirbelstürme können einen Durchmesser von über 500 km und eine Höhe von 15 km haben und über 250 km/h schnell sein. Je wärmer die Meere sind und je größer die Meerwasserregionen, desto häufiger und desto zerstörerischer können Hurrikane sein. Das lässt die Vermutung zu, dass eine Klimaerwärmung zu häufigeren und stärkeren Wirbelstürmen führen wird.

### **Diskussion um den anthropogenen Einfluss**

Indizien für einen möglichen anthropogenen Einfluss haben die US-Forscher *Emanuel 2005* und *Webster 2005* zusammengetragen. Webster hat die Anzahl, Dauer und Intensität tropischer Zyklone in den vergangenen 35 Jahren untersucht (Abb. 9.9). Bei angestiegener Meeresoberflächentemperatur sind die Anzahl und der Anteil von Hurrikanen der Stärke 4 und 5 stark angestiegen. Das gilt insbesondere für den Nordpazifik, den Indischen und südwestpazifischen Ozean, aber am wenigsten für den Nordatlantik.

Die Auswertung von tropischen Wirbelstürmen seit Mitte des letzten Jahrhunderts durch *Emanuel 2005* hat ergeben, dass die Gesamtenergie der Wirbelstürme deutlich zugenommen hat. Emanuel hat in seinem so genannten PDI-Index die Größe der vom Sturm betroffenen Erdoberfläche, die Windgeschwindigkeit, den Radius des Wirbelsturms sowie die Dauer zusammengefasst. Das Ergebnis war eindeutig; Die Energiemenge, die von nordatlantischen und südpazifischen Wirbelstürmen freigesetzt wurde, nahm seit den 70er Jahren deutlich zu. Ursache hierfür ist die Zunahme sowohl der Dauer von Hurrikanen als auch der maximalen Windgeschwindigkeiten im Atlantik und Pazifik um 50 % in den letzten 50 Jahren. Emanuel sieht hierdurch die Simulationen bestätigt und geht davon aus, dass die Hurrikanenergie eng mit den Meerestemperaturen verbunden ist und die Klimaerwärmung widerspiegelt.

Mit den verschiedenen Aussagen zur Ursache des Anstiegs der Hurrikane befasst sich auch das *IPCC 2007*: „Beobachtungen belegen eine zunehmende Aktivität starker tropischer Wirbelstürme im Nordatlantik seit ungefähr 1970, verbunden mit einem Anstieg der tropischen Meeresoberflächentemperaturen. Eine zunehmende Aktivität starker tropischer Wirbelstürme in einigen anderen Regionen, wo größere Bedenken bezüglich der Datenqualität bestehen, wird ebenfalls vermutet“ (*IPCC 2007*). Auch nach einer Studie von *Elsner 2008* hat die Stärke tropischer Wirbelstürme zugenommen. Am deutlichsten war der Trend über dem Atlantik und dem nördlichen Teil des Indischen Ozeans, Der Anstieg gehe auf höhere Wassertempe-

raturen zurück. Nach *Latif 2007* verstärkt eine Abnahme der vertikalen Windscherung die Hurrikanaktivität im Nordatlantik.

Nach *Emanuel 2008* lassen im Mittel die Klimamodelle für die Zukunft eine deutliche Zunahme der Tropensturmstärke erwarten. Allerdings fällt diese Zunahme deutlich geringer aus, als es der beobachtete Zusammenhang zwischen Temperatur und Stürmen in den vergangenen Jahrzehnten nahelegt. Und verschiedene Modelle zeigen stark unterschiedliche Ergebnisse, selbst im Vorzeichen - ein Teil der Modelle zeigt eine Zunahme, ein Teil eine Abnahme der Sturmstärken bzw. Sturmhäufigkeiten. Ursache für diese Unterschiede ist wie *Rahmstorf* in seinem [www.wissenslogs.de](http://www.wissenslogs.de) 2008 schreibt, „dass Tropenstürme zumindest in ihrem Kern kleinskalige Phänomene sind, die von den derzeitigen globalen oder regionalen Klimamodellen nur unzureichend aufgelöst werden können“. Nach *Vecchi 2007* ist eine Ursache für die berechnete Abnahme der Hurrikanhäufigkeit eine stärkere vertikale Windscherung aufgrund der Klimaänderung. *Bender 2010* zeigt, dass sich bis Ende des 21. Jahrhunderts die starken Wirbelstürme (Kategorie 3 – 5) nahezu verdoppeln dürften, trotz Abnahme der Häufigkeit der tropischen Wirbelstürme. Die größte Zunahme wird den Modellrechnungen nach im westlichen Atlantik, nördlich von 20° Nord erwartet. *Bengtsson 2007* erwartet nach Modellrechnungen mit dem Hamburger Klimamodell ECHAM5 des MPI-M eine Verringerung der Anzahl der tropischen Wirbelstürme um ca. 10 % aber eine Verstärkung der Intensität der bereits schon starken Wirbelstürme. Die Anzahl der Wirbelstürme mit Windgeschwindigkeiten über 50 m/s wird sich danach insbesondere im Östlichen Pazifik und Atlantik um bis zu 30 % erhöhen und die Anzahl wird dort mehr oder minder gleich bleiben.

**Fazit:** Die Rechenmodelle müssen offensichtlich noch erheblich verbessert werden, um verlässliche Aussagen über die künftige Entwicklung der Sturmstärken und Sturmhäufigkeit zu erhalten.

## 9.4 Eis

In Gletschern und Eiskappen sind erhebliche Wassermassen gebunden, die einem Meeresspiegeläquivalent von etwa 70 m entsprechen (Gletscher und kleinere Eiskappen ca. 51 cm, Grönlandeis ca. 7,2 m, Antarktischer Eisschild ca. 61,1 m). Das Verhalten dieser Eismassen bei einer globalen Erwärmung hat einen entscheidenden Einfluss auf unser Klima. Die größten zusammenhängenden Eismassen konzentrieren sich in den Eisschilden der Polargebiete, auf Grönland und in der Antarktis. Sie enthalten etwa 99% des gesamten Eisvolumens der Erde und enthalten etwa 80% der globalen Süßwasservorräte.

Aufgrund der deutlich niedrigeren Oberflächentemperaturen dürfte die Antarktis merklich stabiler sein (*Greve 2003*). Bei einem Meeresspiegelanstieg von etwa 5 m wären zahllose küstennahe Flachländer mit ca. 2 Milliarden Einwohnern hiervon betroffen. Bei 1 m Anstieg wären an den deutschen Küsten 3 Mio. Menschen betroffen.

### 9.4.1 Gletscher

Insgesamt gibt es weltweit rund 160 000 Gletscher und Eiskappen mit einer Gesamtfläche von 685 000 km<sup>2</sup> (<http://www.grid.unep.ch/glaciers/index.php>). Das Anwachsen und der Rückzug von Gletschern sind zunächst natürliche Vorgänge, die in der Vergangenheit immer wieder aufgetreten sind. Wie die Abbildungen 9.10 und 9.11 zeigen, haben einige Gletscher bereits vor Beginn der Industrialisierung begonnen, sich zurückzuziehen. Die Mehrzahl der genau untersuchten Gletscher (30 „Referenz“Gletscher in 9 weltweit verteilten Gebirgsregionen) schmelzen seit Jahrzehnten deutlich ab. Der Verlust an mittlerer Massenbilanz hat sich in den vergangenen Jahren beschleunigt (Abb. 9.10), und die Gletscher mit einem Zuwachs sind weniger geworden. In der Zeit von 1996 bis 2006 hat sich das Abschmelzen der 30 „Referenz“Gletscher beschleunigt, insgesamt waren es 0,58 m Wasser-Äquivalent (*Zemp 2009*). Im World Glacier Monitoring Service (WGMS) ([www.wgms.ch](http://www.wgms.ch)) Zürich werden seit 1986 die weltweiten Daten über das Verhalten der Gebirgsgletscher zusammengetragen. Es enthält Daten von rund 100 000 Gletschern. Von 228 Gletschern wurde seit 1946 eine Massenbilanz erstellt (*Zemp 2009*).

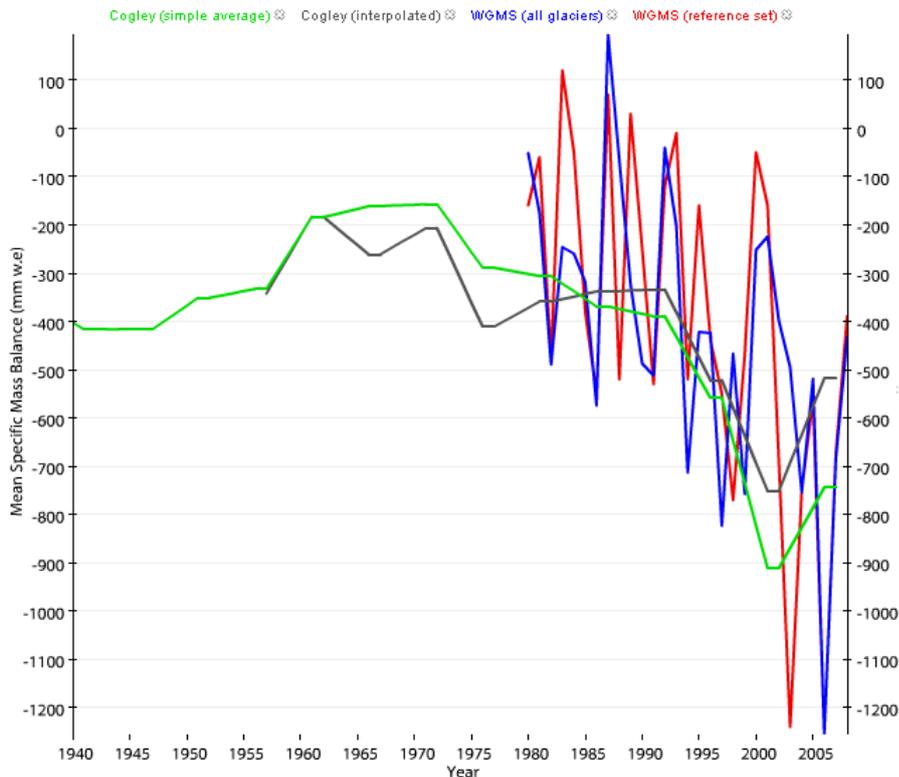


Abb. 9.10: Jährliche Änderung der globalen Gletscherdicke in mm/Jahr Wasseräquivalent 1940 – 2009. Blau: Alle Gletscher, rot: Referenzgletscher. Auffällig sind die jährlichen starken Schwankungen. (<http://www.ncdc.noaa.gov/bams-state-of-the-climate/2009-time-series/?ts=glacier>), Grün und schwarz nach Cogley 2009

In Europa war der Anstieg bis ca. 1995 auf einen Zuwachs in Skandinavien zurückzuführen. In den Alpen verringerte sich seit 1850 das Volumen der Gletscher um durchschnittlich ca. 50 %, deren Flächen gingen im gleichen Zeitraum um ca. 30 – 40 % zurück (Haeberli 2005). Starke Verluste ergaben sich in Patagonien, Alaska und Himalaya (Abb. 9.11).

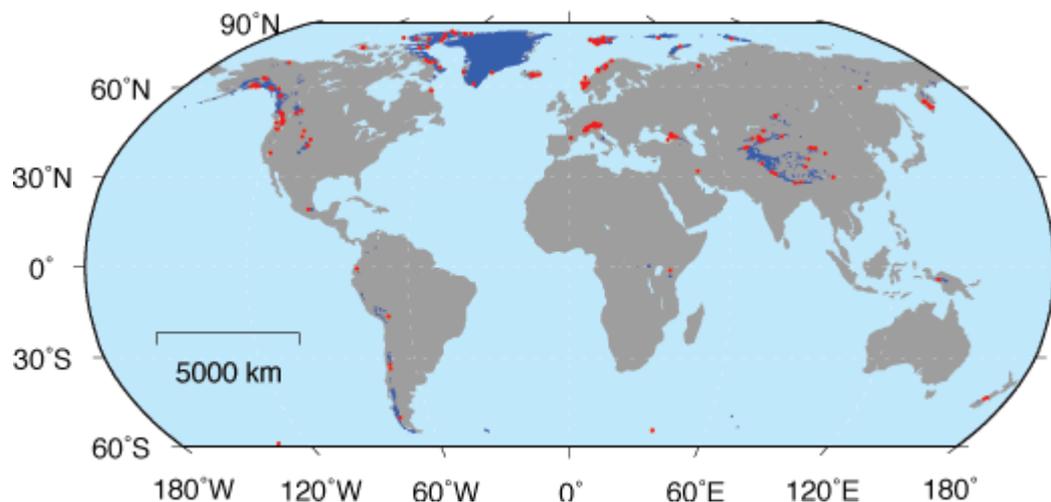


Abb.9.11: Gletscherbedeckte Regionen der Erde (blau) und Gletscher (rot, außer Grönland und antarktische Eisflächen), die für die Ermittlung der globalen zeitlichen Änderung der Massenbilanz verwendet wurden. (<http://nsidc.org/glims/glaciarmelt/index.html>)

Die Eismassenbilanz ist in den vergangenen Jahren negativ. Aussagen über die globalen Veränderungen lassen sich aufgrund der Satellitenbeobachtungen mit immer größerer Genauigkeit machen, auch wenn die Massenbilanzierung einige Unsicherheiten aufweist. Inzwischen werden die ersten Gletscher in den Alpen mit Kunststoffolien abgedeckt, um ein weiteres Abschmelzen im Sommer zu verhindern (Teile des Gurschengletschers bei Andermatt, dpa, 10.05.2005, Zugspitze, sueddeutsche.de, 29.05.09).

Der Rückzug der Gebirgsgletscher vor 1900 wird nach statistischen Auswertungen der Simulation mit dem Klimamodell ECHAM4 von *Bengtsson 2004*, wie bereits schon von *Reichert 2002*, als ein von natürlichen Schwankungen dominierter Prozess erklärt, während derjenige in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts höchstwahrscheinlich auf anthropogene Effekte zurückzuführen ist (*Bengtsson 2004*). Nach *Bindschadler 2006, Shepherd 2007* hat sich in beiden Hemisphären das Abfließen der Gletscher ins Meer beschleunigt. Als Ursache sieht er das beobachtete Aufströmen von warmem Wasser aus mittlerer Tiefe an, das das Schmelzen der fließenden Gletscherzunge von unten verstärkt. Nach *IPCC 2007* hat sich der abgeschätzte Beitrag von Gletscher und Eiskappen zum Meeresspiegelanstieg beschleunigt: 1961 – 2003  $0,5 \pm 0,18$  mm/Jahr zu 1993 – 2003  $0,77 \pm 0,22$  mm/Jahr (*IPCC 2007*).

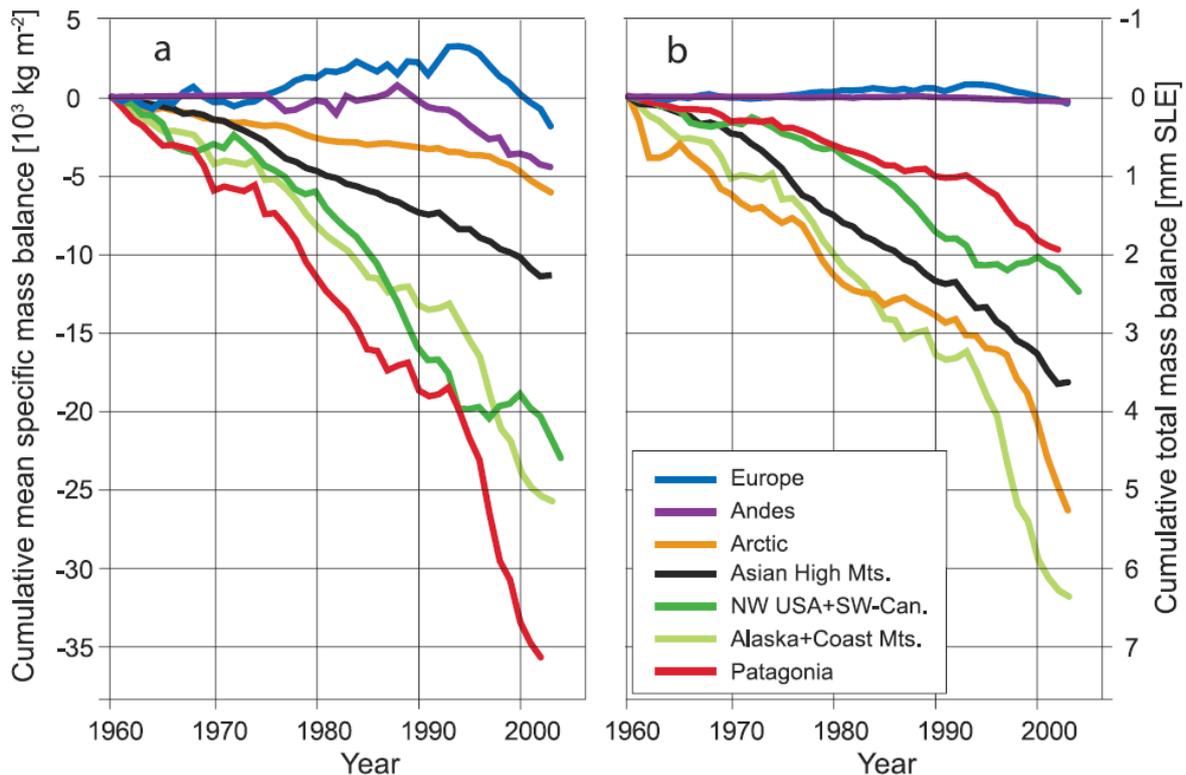


Abb. 9.11: Kumulierte mittlere Massenbilanz (a) und kumulierte mittlere Gesamtmassenbilanz (b) der Gletscher und Eiskappen, berechnet für große Regionen. Mittlere spezifische Massenbilanz zeigt die Stärke der Klimaänderung in der betreffenden Region. Die Gesamtmassenbilanz ist der Beitrag jeder Region zum Meeresspiegelanstieg (SLE) in mm. (*IPCC 2007*)

**Fazit:** Die Gletscher schmelzen in den vergangenen Jahrzehnten weltweit verstärkt ab. Die Modellrechnungen zeigen aufgrund des Klimawandels eine weitere Zunahme des weltweit zu beobachteten Rückgangs der Gletscher mit entsprechendem Anstieg des Meeresspiegels.

#### 9.4.2 Antarktis

Das Eis am Südpol umfasst heute etwa 90 % des festen Wassers auf der Erde. Im Eispanzer der Westantarktis sind 75 %, das sind mehr als 3 Mio. Kubikkilometer, Süßwasser eingefroren. Würde er abtauen, stiege der Meeresspiegel weltweit um 5 Meter. Der ostantarktische Eisschild dagegen erreicht eine maximale Höhe von 4.030 m und eine maximale Eisdicke von 4.776 m. Während sich die Fachleute einig sind, dass die Eisdecke auf der Ostseite des Kontinents relativ stabil ist, ist das künftige Verhalten der westantarktischen Eisdecke strittig. So wurde befürchtet, dass die Eisströme in Richtung Ross-See ins Rutschen kommen könnten (Abb. 9.12).

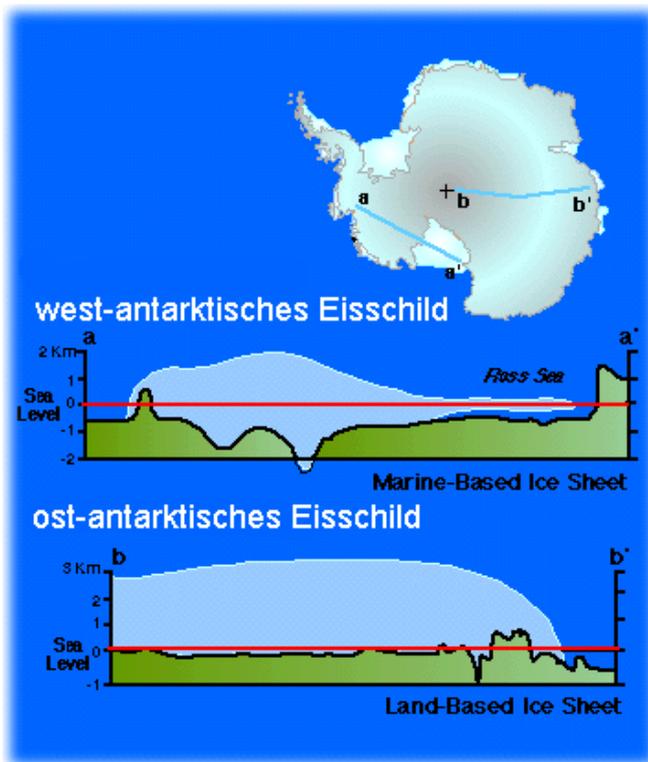


Abb. 9.12: Aufbau der Antarktis: Das westliche Eisschild bildet den kleineren Teil der Antarktis und ist gegenüber einem möglichen Abschmelzen weniger stabil als der Ostteil ([http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Zukunft\\_der\\_Arktis/Eisschmelze\\_3tz.html](http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Zukunft_der_Arktis/Eisschmelze_3tz.html))

Nach Bewertung der verschiedenen Auswertungen der Daten und Techniken kam *IPCC 2007* zu der Aussage, dass die Massenbilanz der gesamten antarktischen Eisfläche für den Zeitraum 1993 – 2003 im Bereich Zuwachs um 50 Gt/Jahr – Abnahme um 200 Gt/Jahr ergab. Dies ergibt einen Beitrag zum Meeresspiegelanstieg von 0,21 mm/Jahr (*IPCC 2007*). Nach *Pritchard 2009* und *Chen 2006* hat sich das Gletschereis nicht nur an den Rändern Grönlands sondern auch in der Antarktis in den vergangenen Jahren in weiten Bereichen verstärkt ausgedünnt (Abb. 9.13). Dies haben satellitengestützte Laserhöhenmessungen ergeben. Mit dem 2003 gestarteten ICESat Satelliten der NASA wurden hierzu in der 5-Jahresperiode (2003 – 2007) 43 Millionen Messungen in der Antarktis und 7 Millionen in Grönland ausgewertet. *Pritchard 2009* vom British Antarctic Survey stellte fest, dass das Eis in Grönland und der westlichen Antarktis schneller schmilzt als erwartet. *Velicogna 2009* bestätigt nach Auswertungen der satellitengestützten Schweremessungen (GRACE) eine Beschleunigung des Eismassenverlustes im Zeitraum 2002 – 2009.

Neue Auswertungen von *Steig 2009* wurde für den Zeitraum 1957 – 2007 im Mittel einen Temperaturanstieg für die Antarktis von 0,5° C festgestellt – auch wenn es in Teilbereichen eine Abkühlung gegeben hat. Die Troposphäre über der Antarktis hat sich nach einer neuen Studie (*Turner 2006*) in den letzten 30 Jahren um 0,5 bis 0,7 °C/Jahrzehnt ebenfalls stark erwärmt. Als Ursache hierfür wird eine beobachtete Verstärkung von warmen westlichen Winden (westerlies) durch Änderung der „Southern Annular Mode“ in den vergangenen Jahrzehnten vermutet.

Ein Ende 2009 veröffentlichter Bericht des Wissenschaftlichen Ausschusses für Antarktisforschung (Scientific Committee on Antarctic Research – *SCAR 2009*) hat den **derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand** zusammengefasst. Demnach hat der Verlust stratosphärischen Ozons den antarktischen Polarwirbel, ein kreisförmiges Windsystem rund um den Südpol, verstärkt und die Wetterverhältnisse rund um den Kontinent verändert. Im Sommer und Herbst hat sich die Westwinddrift über dem Südlichen Ozean um 15 Prozent erhöht. Diese Veränderungen haben die Antarktis klimatisch noch stärker isoliert, so dass sich die Oberflächentemperatur über dem Großteil des Kontinents in den letzten 30 Jahren kaum

verändert hat. Die größte Meeresströmung auf der Erde (der Antarktische Zirkumpolarstrom) hat sich schneller erwärmt als der globale Ozean im Ganzen. In den letzten 50 Jahren gab es in der Gesamtantarktis keine signifikanten Veränderungen im Schneefall, obwohl der Schneefall regional an der Antarktischen Halbinsel zugenommen hat. Die stärkeren Westwinde haben außerdem zu einer erheblichen sommerlichen Erwärmung auf der Ostseite geführt. Bei der zu erwartenden Erholung der Ozonschicht wird mit einer Trendumkehr und einer stärkeren Erwärmung in der Antarktis gerechnet.

Der Eisschild ist in der Westantarktis erheblich dünner geworden, insbesondere entlang des „Amundsenmeeres“. Auch einige wenige Küstengebiete in der Ostantarktis zeigen diese Tendenz. Der Verlust von Schelfeis im Osten der Antarktischen Halbinsel, z.B. des Larsen B-Schelfeises, ist in erster Linie das Ergebnis regionaler Erwärmung, verursacht durch die Verstärkung westlicher Winde infolge des Ozonlochs. 90 Prozent der Gletscher auf der Antarktischen Halbinsel haben sich in den letzten Jahrzehnten zurückgezogen. Von diesen Gebieten abgesehen hat sich das Gros des antarktischen Inlandeises in den letzten Jahrzehnten wenig verändert (Abb. 9.13). Während die Meereisbedeckung des Arktischen Ozeans in den letzten Jahrzehnten deutlich abnahm, hat sie in der Antarktis seit 1980 um 10 Prozent zugenommen, vor allem im Gebiet des Rossmeeres. Diese Zunahme ist bedingt durch die rund um den Kontinent stärker gewordenen Winde, Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation und den isolierenden Effekt des Ozonlochs (SCAR 2009).

Bei einer Fortsetzung der bisherigen Bewegungsrate wäre die westantarktische Eisdecke in maximal 700 Jahren vollständig abgetragen. Aktuelle globale Modellstudien (IPCC 2007) projizieren, dass der antarktische Eisschild zu kalt für ein verbreitetes Schmelzen an der Oberfläche bleibt und dass ein Massenzuwachs aufgrund zunehmender Schneefälle zu erwarten ist. Allerdings könnte ein Netto-Eismassenverlust auftreten, wenn der dynamische Eisabfluss die Massenbilanz des Eisschildes dominiert (IPCC 2007). Ein vollständiges Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes würde einen Beitrag zum Anstieg des Meeresspiegels von etwa 5 m bewirken.

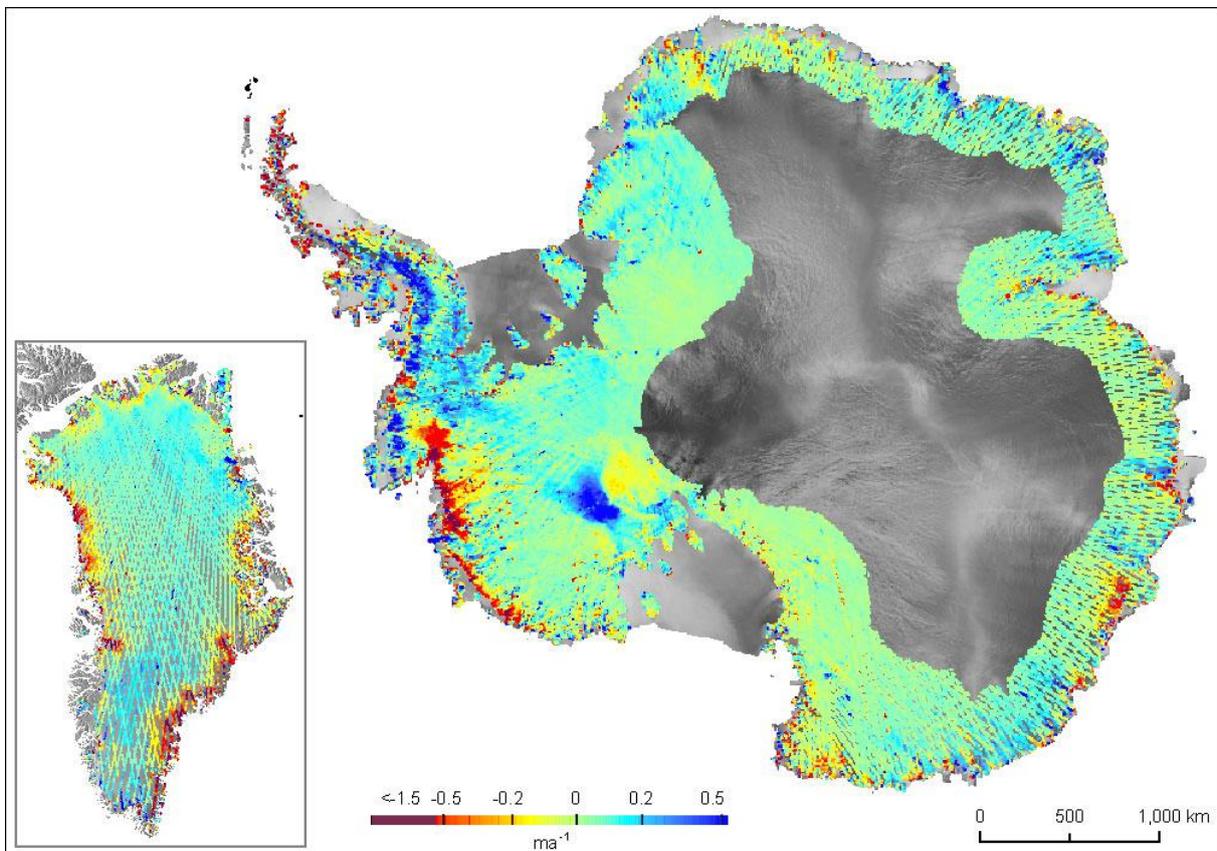


Abb. 9.13: Ausgedehnte Ausdünnung der Gletscher in Grönland und der Antarktis nach Satellitenmessungen 2003 – 2007, roter Bereich zeigt die stärkste Ausdünnung (Pritchard 2009).

[http://www.antarctica.ac.uk/press/press\\_releases/press\\_release.php?id=989](http://www.antarctica.ac.uk/press/press_releases/press_release.php?id=989), BAS

## Stand der Diskussion

Die Klimawissenschaft war sich lange nicht einig, ob durch den zu erwartenden erhöhten Schneefall das Abschmelzen an den Rändern ausgeglichen wird. Neuere Ergebnisse weisen jedoch auf ein Überwiegen des Abschmelzens hin, insbesondere durch den beschleunigten Abfluss von Gletscher in der Westantarktis. Ungeklärt ist weiterhin, wie stark das Abschmelzen der Eisschilde den Anstieg der weltweiten Meeresspiegel beschleunigen wird.

### 9.4.3 Arktis

Satellitendaten zeigen (*IPCC 2007*), dass die Meereisdecke am Nordpol in den vergangenen 25 Jahren stark geschrumpft ist, und zwar um ca. 9 % (im Frühjahr und Sommer um 15 bis 20 %), gleichzeitig hat sich die Meereisdicke um 15 % und teilweise bis zu 40 % verringert (Abb. 9.13) Das Meereis bedeckt in der Arktis immerhin eine Fläche von der Größe der USA. Die Meereisentwicklung ist aber - wie Auswertungen der letzten 50 Jahre gezeigt haben - durch dekadische Schwankungen gekennzeichnet.

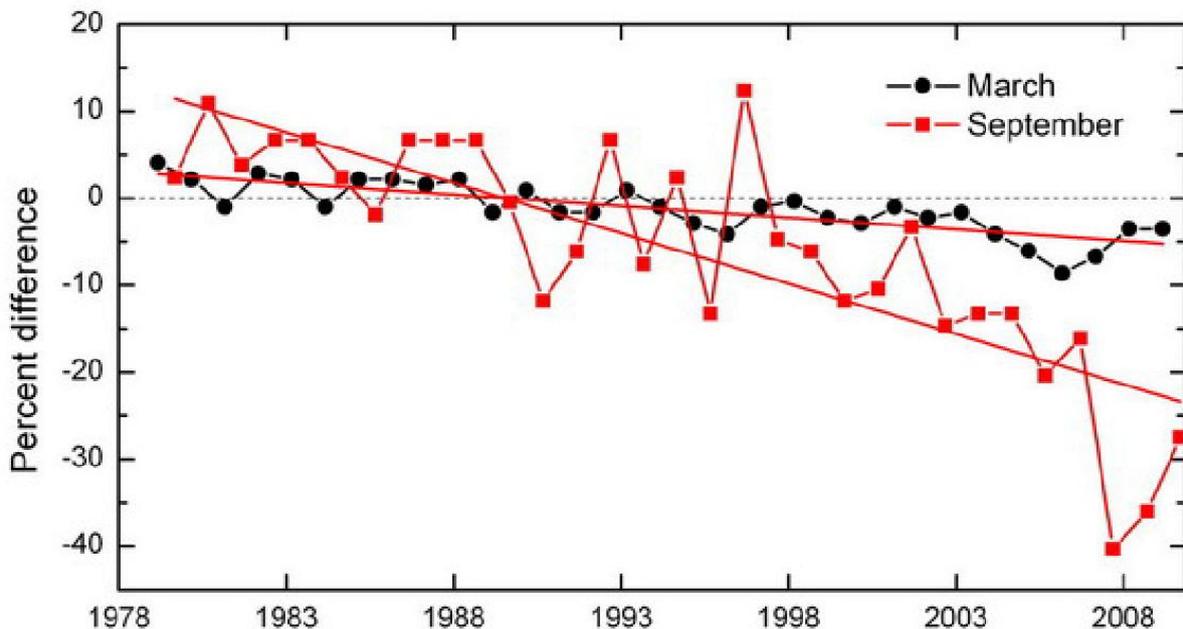


Abb. 9.14: prozentuale Veränderung der Eisausdehnung in der Arktis 1978 – 2009 für März (Monat mit größter Eisausdehnung) und September (Monat mit geringster Eisausdehnung) relativ zur Periode 1979 – 2000 (*Richter-Menge 2009*)

Das Schmelzen des Sommereises in der Arktis wird als ein weiteres Indiz für die globale Erwärmung gewertet. Die Forscher stellten eine Beschleunigung des Abtauens fest, die bei einer Fortsetzung dieses Trends (- 5 %/Dekade) über die Schwankungsbreite der letzten 100 Mio. Jahre hinausgehen wird. Als Folge wird mit einem weltweiten Anstieg des Meeresspiegels gerechnet. Außerdem hat auch die Meereisdicke zwischen 2004 und 2008 um 0,6 m abgenommen (*Richter-Menge 2009*).

Die Ursachen dieser Schwankungen sind noch nicht im Detail verstanden (*IPCC 2007*). Eine der Ursachen ist sicher die ebenfalls dekadisch schwankende Arktische Oszillation, die in ihrer positiven Phase einen stärkeren Polarwirbel (polar vortex) erzeugt (*Budikova 2009*). Weiter wird ein Zusammenhang mit der in den vergangenen 40 Jahren beobachteten verstärkten Wolkenbildung vermutet, die zu einer Reduktion der Albedo führt und damit zu einem Rückgang der Eisbedeckung (*Ikeda 2003, Chapin III 2005, Overpeck 2005, Wang 2005*).

Wie Infrarotmessungen von Satelliten gezeigt haben, hat sich die Temperatur der Meeresoberfläche in der Arktis deutlich erhöht. Weiterhin wurde ein Anstieg der Lufttemperatur von 0,5 °C pro Jahrzehnt in den vergangenen 30 Jahren beobachtet. Das Schmelzen von Meereis lässt zwar den Meeresspiegel nicht steigen, verstärkt aber den Erwärmungstrend, da die Eisschicht das Sonnenlicht stärker reflektiert als die Meeresoberfläche. Diese Meer-Eis-Albedo-Rückkoppelung kann starke Auswirkungen auf das Klima der Erde haben. Falls dieser Trend so anhält, könnte das Meereis bis 2080 ganz verschwunden sein (*ACIA-Bericht*

2005). Wie Hansen 2004a nachweist, verstärkt die anthropogen verursachte Rußbedeckung noch zusätzlich die Wirkung der Albedo-Rückkoppelung. Ein Dunstschleier aus Aerosolen, der aus atmosphärischen Ferntransporten stammt, wurde über der Arktis vom AWI 2005 festgestellt (Ritter 2005) und wirkt sich, wie die Modellrechnungen zeigen, auf das globale Klima aus (Dethloff 2006, Stone 2010).

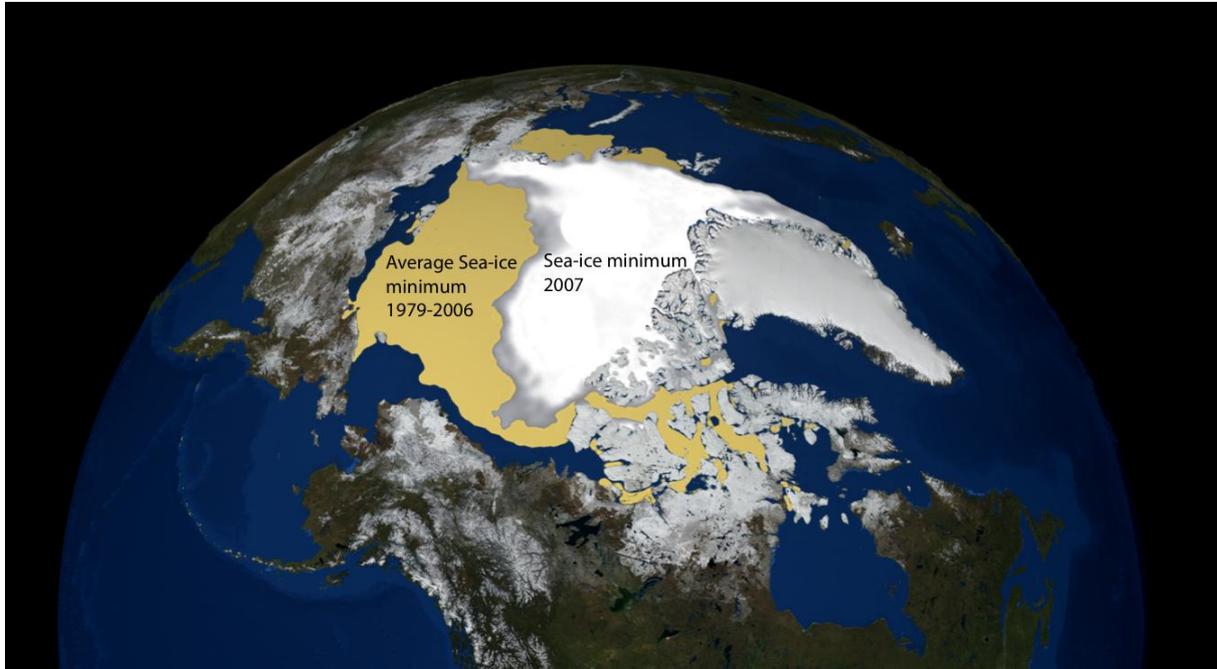


Abb. 9.13: Die Ausdehnung des arktischen Meereises ist 1979 – 2007 nach Satellitenauswertungen der NASA um 20 % zurückgegangen (Quelle: NASA), Quelle: copenhagendiagnosis.com

Die durchschnittlichen Temperaturen in der Arktis sind nach IPCC 2007 in den letzten 100 Jahren fast doppelt so schnell gestiegen wie im globalen Mittel. Die arktischen Temperaturen weisen eine hohe dekadische Variabilität auf, so wurde auch von 1925 bis 1945 eine warme Periode beobachtet, die sich zwischen 1940 – 1976 deutlich abgekühlt und seitdem wieder sehr stark erwärmt hat. Der Temperaturanstieg hat sich in den letzten Jahren noch verstärkt (Chylek 2009) (Abb. 9.14). (Abb. 9.14). Die Erwärmung 1935 - 1945 ist nach Bengtsson 2004, Chylek 2009 auf natürliche Ursachen wie die AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) zurückzuführen. Für die Erwärmung in den vergangenen drei Jahrzehnten dürfte neben natürlichen Ursachen wie der Änderung der Arktischen Oszillation (AO) bzw. der AMO auch der Treibhauseffekt und Aerosole eine Rolle spielen (Johannessen 2004, Chylek 2009). Nach Auswertungen von Shindell 2009 haben die Zunahme der Rußaerosole und Abnahme der Sulfataerosole den größten Beitrag zur Erwärmung der Arktis in diesem Zeitraum verursacht. Mit der Erwärmung der Arktis in den letzten drei Jahrzehnten ist auch die Eisbedeckung des arktischen Ozeans zurückgegangen. Ein Anstieg des Meeresspiegels ist aber hierdurch wegen des Archimedisches Prinzip nicht erfolgt. Aus den Satellitendaten seit 1978 ist ersichtlich, dass die durchschnittliche jährliche Ausdehnung des arktischen Meereises um 2,7 % pro Jahrzehnt geschrumpft ist, wobei die Abnahme im Sommer mit 7,4 % pro Jahrzehnt größer ist. (Abb. 9.13). Im September 2010 wurde der drittniedrigste Wert nach 2007 und 2008 erreicht der Meereisausdehnung seit Beginn der Satellitenmessungen 1979 erreicht (<http://nsidc.org/arcticseaicenews/>). Die arktische Meeresoberflächentemperatur war 2010 höher als normal, aber niedriger als in den vergangenen drei Jahren.

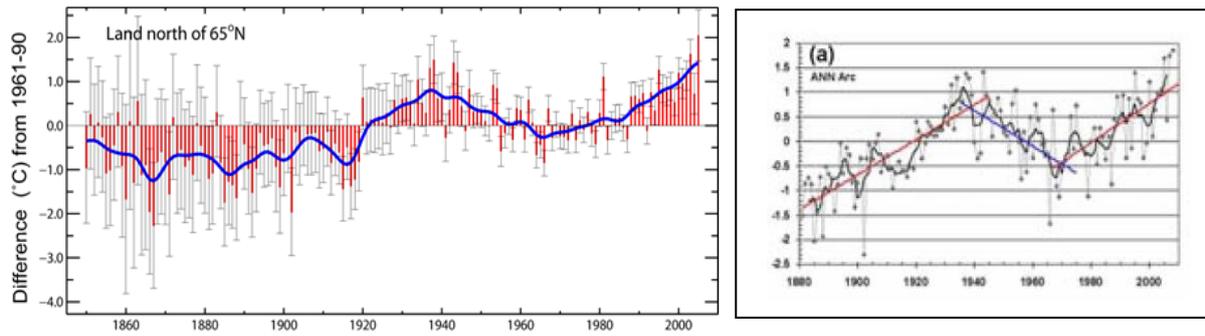


Abb. 9.14: Jährliche Anomalien der Landoberflächen-Lufttemperatur in der Arktis (65° - 90° nördlicher Breite) Zeitraum 1900 – 2005, bezogen auf den Zeitraum im Mittel von 1960 – 1990) (*IPCC 2007*), rechtes Bild: Temperatur-anomalien 1880 – 2008 in der Arktis (64 – 70° N), (*Chylek 2009*)

Modellrechnungen im Rahmen des ACIA-Programms lassen einen Temperaturanstieg bis zum Jahr 2100 von 3,5 bis knapp 6 °C für die Arktis erwarten. Zu ähnlichen Ergebnissen mit dem regionalen Klimamodell REMO, angetrieben durch das globale Modell ECHAM 4, kommt *Pfeifer 2005* vom Hamburger MPI. Unter Zugrundelegen des mittleren B2-Emissions-Szenario wurde für die gesamte Arktis eine mittlere Temperaturerhöhung von 5,5 °C für den Zeitraum 2070 - 2079 gegenüber 1970-1979 errechnet.

Nach den Modellrechnungen mit verschiedenen Emissionsszenarien für den vierten Bericht des *IPCC 2007* (AR4) ist bis 2100 mit einem deutlichen Rückgang der Meereseisfläche in der Arktis zu rechnen (s. Abb. 9.15). In einigen Projektionen von SRES-Szenarien verschwindet in der Arktis im letzten Teil des 21. Jahrhunderts das Meereis im Spätsommer fast vollständig. *Holland 2010* hat 14 Modellrechnungen (CMIP-3) für das 21. Jahrhundert ausgewertet. Danach schwanken die Ergebnisse je nach Anfangsbedingungen erheblich. Etwa die Hälfte der Modelle zeigen eine saisonale Eisfreiheit Ende des 21. Jahrhunderts und einige bereits 2050.

Der beobachtete Rückgang (rot) ist sogar noch stärker als die Modellrechnungen zeigen (Abb. 9.15). 1953 – 2006 ist das Meereis um -7,8 % pro Dekade zurückgegangen, dreimal größer als der Mittelwert der Multimodelle für den IPCC Bericht mit - 2,5 %/Dekade es berechneten (*Stroeve 2009*). Dieser Rückgang der Meereisbedeckung hat nach (*Screen 2010*) auch den Temperaturanstieg in der Arktis in den vergangenen 20 Jahren verstärkt.

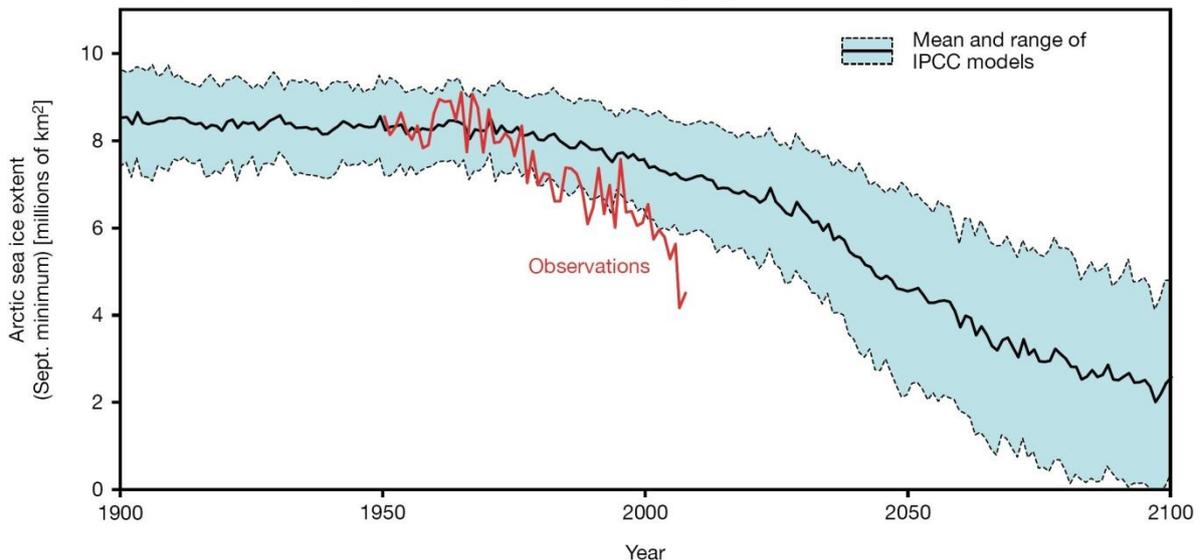


Abb. 9.15: Beobachtete und modellierte (berechnete arktische Meereisausdehnung Quelle: [www.copenhagendiagnosis.com](http://www.copenhagendiagnosis.com), (nach *Stroeve 2009*))

Diese klimatisch bedingten Veränderungen in der Arktis können erhebliche Folgen für das Klima der Erde haben. Das Auftauen des Permafrostbodens bringt große Mengen an Süßwasser in das Arktische Becken; damit ändert sich der Salzgehalt des Nordpolarmeeres, was zu Änderungen des ozeanischen Zirkulationsmusters führen kann. Auswirkungen auf den

Golfstrom – bis zum Abreißen der Förderbänder, die Wärme in den Norden transportieren - werden diskutiert und in Modellrechnungen untersucht (s. Kap. 4.4).

Temperaturen in der oberen **Permafrostschicht** haben generell seit den 1980er Jahren in der Arktis, Russland, Alaska und Kanada um bis zu 2 - 3° C zugenommen (*IPCC 2007, Richter-Menge 2009*). Das Ergrünen der riesigen Wald- und Tundragebiete (Russland, Kanada) und das Verschieben der Vegetationszonen im Norden, die immerhin ein Viertel der bewachsenen Landoberfläche der Erde bedecken, wurden durch Satellitenaufnahmen seit 1981 belegt (*Richter-Menge 2009*). Die Tundragebiete in Russland und Alaska ergrünten zwar in den vergangenen Jahrzehnten, aber neuere Messungen belegen, dass die Arktis zu einer Nettoquelle für Kohlendioxid und Methan geworden ist. Ursache hierfür ist die gestiegene mikrobielle Zersetzung des Bodens und die Freisetzung von Methan aus dem aufgetauten Permafrostboden, was wiederum den Treibhauseffekt verstärken wird. Nach *Schuur 2009* hängt die Menge des freigesetzten Kohlendioxids vom Alter des aufgetauten Permafrostbodens ab. Neben der verlängerten Vegetationsperiode ist ein weiterer positiver Effekt; dass das Nordpolarmeer künftig als Schiffroute nach Asien von Europa (und umgekehrt) von Interesse sein wird. Der Seeweg würde sich dadurch um bis zu 40 % verkürzen.

Im National Snow and Ice Data Center (<http://nsidc.org/>) geht man inzwischen davon, dass das Meer der Arktis nicht wie im Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) angenommen gegen Ende des 21. Jahrhunderts, sondern schon 2030 erstmals im Sommer eisfrei sein könnte. Nach *Markus 2009* hat sich die Eisschmelzsaison in den vergangenen 30 Jahren um 20 Tage pro Jahr verlängert.

### Stand der Diskussion

Die Frage nach den Ursachen dieser deutlichen Veränderungen wird in der Fachwelt intensiv diskutiert. Sind diese Veränderungen Teil eines natürlichen Zyklus seit Ende der „kleinen Eiszeit“, oder sind die zunehmenden Konzentrationen der Treibhausgase hierfür verantwortlich? Die hohe Komplexität des arktischen Klimasystems erschwert nach Ansicht des Alfred-Wegener-Instituts in Bremerhaven (AWI) verlässliche Prognosen, insbesondere da natürliche Klimaschwankungen eine große Rolle bei den Temperaturveränderungen in den letzten Jahrzehnten gespielt haben. Das AWI erklärt zu dem Forschungsprogramm PACES: „das Verständnis des polaren Klimasystems ist immer noch unvollständig, da das komplexe Atmosphäre-Land-Kryosphäre-Ozean-Ökosystem miteinander reagiert und eine Reihe von Rückkoppelungen hat, die noch nicht gut in den Klimamodellen (*IPCC 2007*) vertreten sind“. ([http://www.awi.de/fileadmin/user\\_upload/Research/Research\\_Program/Docs/PACES/PACES\\_Topic4\\_WP1.pdf](http://www.awi.de/fileadmin/user_upload/Research/Research_Program/Docs/PACES/PACES_Topic4_WP1.pdf)). Deswegen können nach *IPCC 2007* die Klimamodelle die für die beobachteten Änderungen verantwortlichen Prozesse wie Änderungen der Ozeantemperaturen, der Ozeanzirkulation und der Eisflüsse bisher (noch) nicht vollständig wiedergeben. Dennoch gehen alle Klimamodelle von einem weiteren Rückgang des arktischen Meereises in den kommenden Jahrzehnten infolge des anthropogen verursachten Klimawandels aus.

#### 9.4.4 Grönland

Grönland ist zu etwa 81% mit Eis bedeckt. Das Inlandeis stellt mit einer Fläche von 1,74 Mio. km<sup>2</sup> und einem Volumen von etwa 3 Mio. km<sup>3</sup> nach der Antarktis das zweitgrößte Eisvorkommen auf der Erde dar. Die bis zu 3000 m dicke und 1,7 Mio. km<sup>2</sup> große Eiskappe spielt eine besondere Rolle in der Klimadiskussion, da ein vollständiges Abschmelzen den Meeresspiegel um 7 m anheben würde.

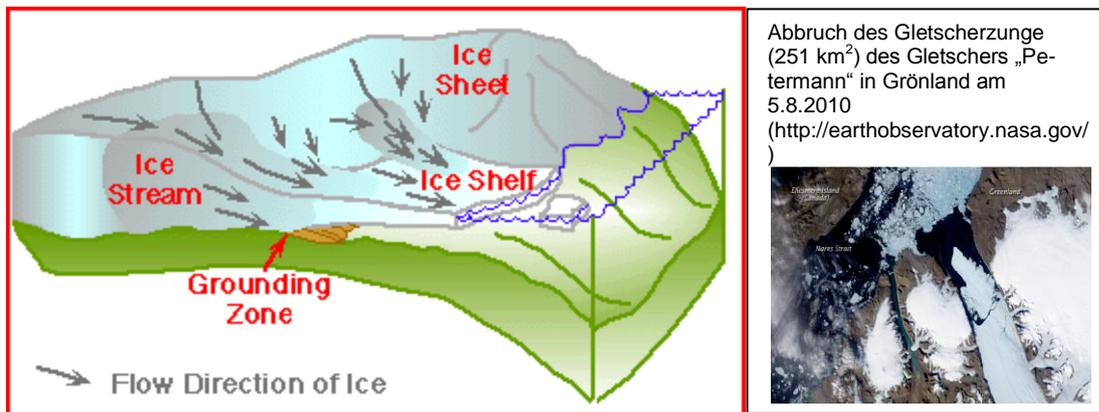
Viele neuere Untersuchungen haben sich mit der Eismassenbilanz Grönlands beschäftigt. Sie ergaben einen Zuwachs durch verstärkten Schneefall (seit 2000 4 cm/Jahr) im Innern und eine Abnahme durch beschleunigten Gletscherfluss an den Rändern. Diese Zunahme wurde mehr als ausgeglichen durch das beschleunigte Abschmelzen und Kalben der Gletscher an den Rändern Grönlands (*EEA 2008*). Im AR4 (*IPCC 2007*) wird zusammenfassend ausgeführt: „Die Eisflächen von Grönland und der Antarktis gehen sehr wahrscheinlich zurück, Grönland trägt ungefähr 0,2+-0,1 mm/Jahr und die Antarktis mit 0,2 +- 0,35 mm zum Meeresspiegelanstieg über der Periode 1993 – 2003 bei. 2005 hat sich offensichtlich der

Beitrag beschleunigt. Nach *IPCC 2007* wird der verstärkte Schneefall in den höheren Gebieten durch das Ausdünnen an den Küstengebieten mehr als ausgeglichen.

*Box 2009* hat den Temperaturtrend in Grönland über der Eisfläche für den Zeitraum 1860 – 2007 ausgewertet und festgestellt, dass in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts der Erwärmungstrend 1,33 mal größer war als in der Periode 1994 – 2007, jedoch der Erwärmungstrend im Winter jetzt 1.7 mal größer war. Box stellt weiterhin fest, dass die Temperaturen in Grönland sehr empfindlich auf Sulfataerosole vulkanischen bzw. anthropogenen Ursprungs reagieren, was die starke Abkühlung 1940 – 1970 verursacht hat.

Mit satellitengestützten Schweremessungen (GRACE) und Höhenmessungen mit Radar (SRALT) und mit Laser (ICESat), können Messungen mit immer besserer Genauigkeit durchgeführt werden. *Velicogna 2009* hat durch Auswertung dieser satellitengestützten Schweremessung (GRACE) eine Beschleunigung des Eismassenverlustes im Zeitraum 2002 – 2009 festgestellt. Auch *van de Wal 2008* und *van den Broeke 2009* hat mit den GRACE Messungen 2000 – 2008 einen gesamten Massenverlust Grönlands ca. 1500 Gt gemessen, was einem jährlichen Meeresspiegelanstieg von 0,46 mm entspricht. Ohne den verstärkten Schneefall wäre der Eismassenverlust doppelt so hoch.

Der gemessene Eiszuwachs insbesondere in größeren Höhenlagen um ca. 5 cm/Jahr, steht im Einklang mit den Klimamodellen, da wärmere und feuchtere Luft in dieser Gegend zu mehr Schneefall führen sollte. Andererseits hat sich in den vergangenen Jahrzehnten das Schmelzen der Grönlandeisfläche um 0,7 %/Jahr beschleunigt (Abb. 9.17).



Abbruch des Gletscherzunge (251 km<sup>2</sup>) des Gletschers „Petermann“ in Grönland am 5.8.2010 (<http://earthobservatory.nasa.gov/>)

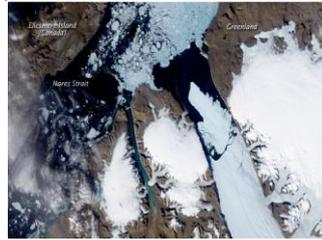


Abb. 9.16: Schema von in das Meer fließenden Gletscherströmen. Eine Beschleunigung durch die Klimaerwärmung wird befürchtet ([http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Zukunft\\_der\\_Arktis/Eisschmelze\\_3tz.html](http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Zukunft_der_Arktis/Eisschmelze_3tz.html))

Der Eismassenverlust hat sich durch Zunahme der Fließgeschwindigkeiten der Gletscher im letzten Jahrzehnt von 90 auf 220 Kubikkilometer pro Jahr erhöht. Der Eismassenverlust ist, wie von *Sole 2008* bestätigt wurde, größer bei Gletscher, die ins Meer münden. Ein neues Beispiel ist der Abbruch der Gletscherzunge des Gletschers Petermann in Grönland mit einer Fläche von 251 km<sup>2</sup> am 5. August 2010 (Abb. 9.16 rechts).

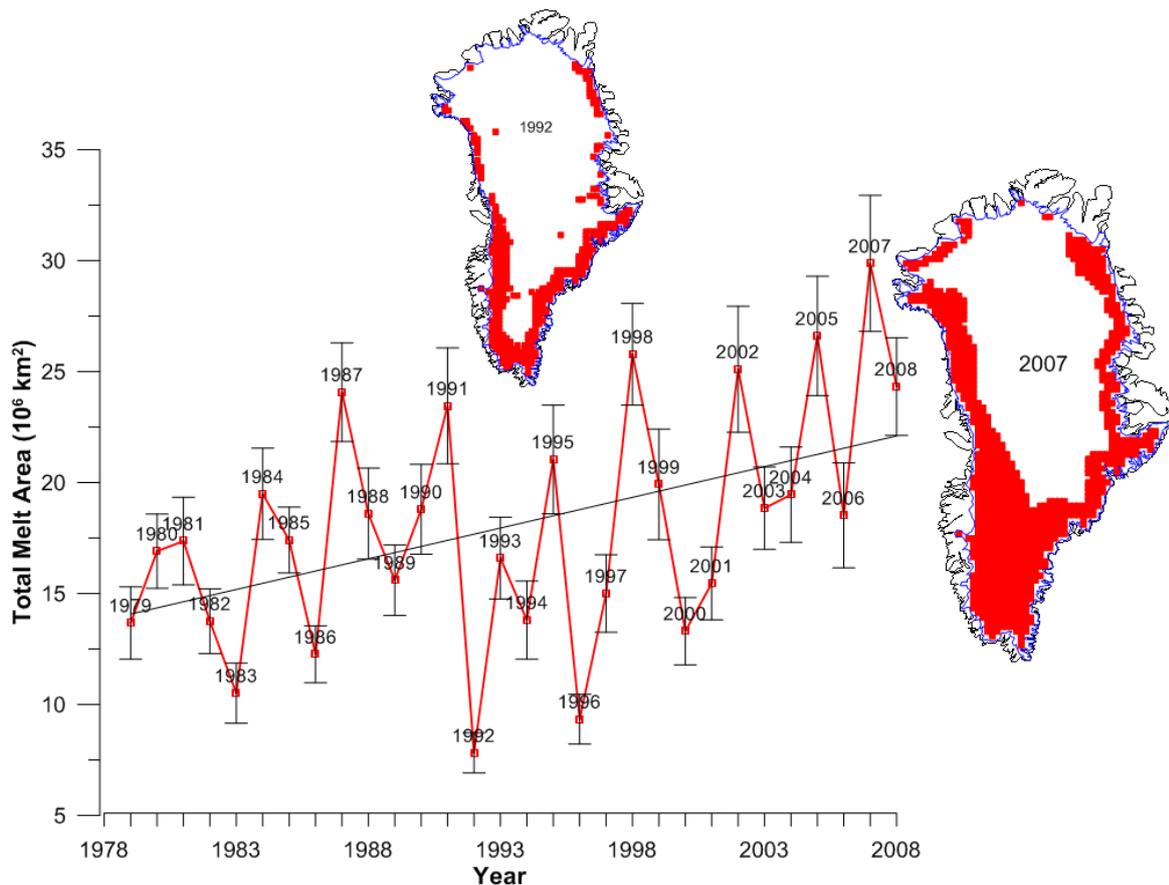


Abb. 9.17: Ausdehnung der Abschmelzfläche auf Grönland nach Satellitendaten. Gezeigt sind die beiden Jahre 1992 (nach dem Ausbruch des Pinatubo) und 2007 sowie die zeitliche Entwicklung. Die roten Bereiche sind die eisfreien Gebiete von April – Oktober. Quelle: [www.copenhagendiagnosis.com](http://www.copenhagendiagnosis.com)

Das Schmelzgebiet des Grönlandeises hat sich seit 1979 um ca. 30 % vergrößert (s. Abb. 9.17). Neuere Messungen von *van de Wal 2008* haben zeitweise eine Verlangsamung der Gletscherschmelze an der Westseite Grönlands (Jacobshavn) ergeben. In Summe verbleibt jedoch eine Zunahme des Eisabbruchs. Das Schmelzwasser trägt auch zur Abnahme des Salzgehaltes des umgebenden Ozeans bei.

### Stand der Diskussion

Die Messungen der Veränderungen der grönländischen Eis- und Schneemassen haben inzwischen ein Überwiegen des Abschmelzens ergeben.

Auch die Modellrechnungen zeigen ein Abschmelzen des Grönlandeises bei einem fortwährenden Anstieg der Erwärmung in den nächsten 100 Jahren. Modellrechnungen (*Huybrechts 2005*) ergeben, dass eine globale Erwärmung von 3 °C ausreichen würde, um das Grönlandeis rapide abschmelzen zu lassen. Ein vollständiges Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes würde einen Beitrag zum Anstieg des Meeresspiegels von bis zu 7 m bewirken (*IPCC 2007*). Der Unsicherheitsbereich ist bei diesen Modellrechnungen noch sehr hoch, da insbesondere nicht klar ist, ob die positive Rückkoppelung des beschleunigten Abschmelzens an den Rändern weiter erhalten bleibt (*EEA 2008*).

Dieser Prozess könnte bei einem weiteren Anstieg der Treibhausgase bereits 2050 unwiderumkehrlich in Gang gesetzt werden. *Hansen 2007* befürchtet, dass dieser Prozess wesentlich schneller erfolgen kann, zum einen durch die positive Rückkoppelung infolge Verringerung der Eisfläche und damit einhergehende verstärkte Erhöhung der Albedo, sowie durch verstärktes Abschmelzen von Gletschermassen, wenn sie an den Rändern einmal ins Gleiten kommen. Dieses Verhalten kann von den Klimamodellen nicht vollständig erfasst werden.

Auch ein Vergleich mit paläoklimatischen Daten zeigt nach *Overpeck 2006*, dass der Meeresspiegelanstieg aufgrund der Erwärmung in den Polarregionen viel schneller erfolgen könnte, als bisher angenommen.

Abb. 9.18 zeigt zusammenfassend die in den vergangenen Jahrzehnten beobachteten Veränderungen in der Kryosphäre.

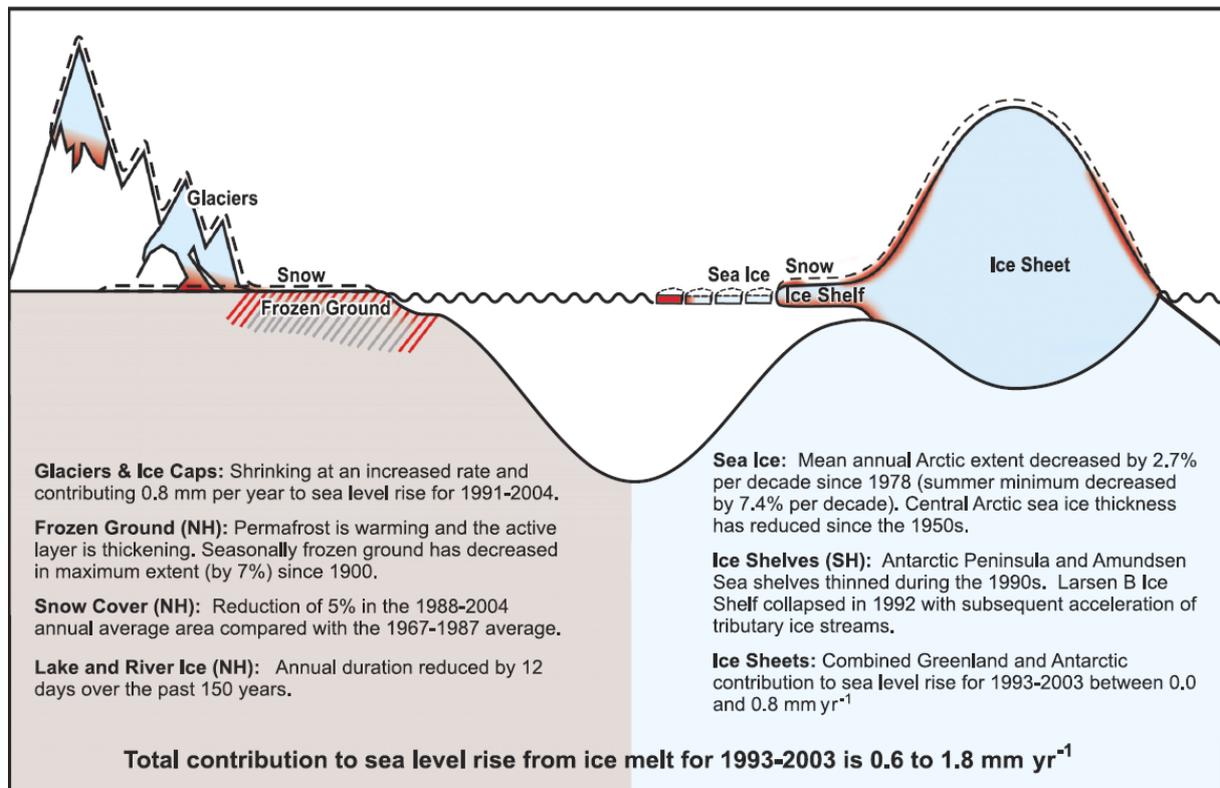


Abb. 9.18: Zusammenfassung der beobachteten Veränderung in der Kryosphäre (Gletscher und Eiskappen, Permafrost, Schneebedeckung, See- und Flusseis, Meereis, Schelfeis, Eisflächen). (*IPCC 2007*)

## 9.5 Ozean

Der Ozean nimmt 71 % der Erdoberfläche ein und wandelt die Strahlungsenergie der Sonne hauptsächlich in der obersten Schicht des Ozeans in Wärmeenergie um. Außerdem bewirkt die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser, dass der Ozean vor allem im jahreszeitlichen Wechsel auf die Temperaturschwankungen der Atmosphäre ausgleichend wirkt.

Innerhalb von 10 Jahren wurde ein globales Ozeanbeobachtungssystem mit dem Namen "Argo" aufgebaut. 2007 wurde sein erstes großes Ziel erreicht. 3000 autonome Messroboter übermitteln kontinuierlich Daten wie Temperatur, Salzgehalt und Druck aus allen Ozeanen. Automatisch tauchen sie bis in Tiefen von 2000 m ab, steigen alle 10 Tage wieder an die Meeresoberfläche auf und senden die Daten an Satelliten. Aus der veränderten Position der Messsonden kann auch die Strömungsrichtung und -geschwindigkeit bestimmt werden. Die Ergebnisse haben bereits zahlreiche neue Erkenntnisse gebracht (<http://www.german-argo.de/>).

### 9.5.1 Erwärmung und Versauerung der Meere

In den vergangenen 40 Jahren haben sich die Ozeane der Welt vor allem aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes erwärmt (Abb. 9.18). Zu diesem Schluss kommen das *IPCC 2007*, *Levitus 2009*, *Lyman 2010*, *Trenberth 2009, 2010*. Der lineare Trend des Wärmehaltes der Ozeane (OHC, Ocean Heat Content) in der oberen 700 m Schicht betrug 1969 - 2008  $0,40 \times 10^{22}$  J/Jahr und 1955 - 2008  $0,22 \times 10^{22}$  J/Jahr (Abb. 9.18). *Lyman 2010* kommt nach Auswertung von Daten u.a. tausender im Meer treibenden Tauchsonden des ARGO floats Projektes auf einen statistisch signifikanten Trend 1993 - 2008 von  $0,64 \text{ W/m}^2$  (bezogen auf die gesamte Erdoberfläche). Das Trendverhalten ist jedoch in den Ozeanen

nicht gleichmäßig, während der Atlantik und Pazifik nach 2005 eine Abnahme zu verzeichnen hatte, war das im Indischen Ozean nicht der Fall. Nicht erklärbar ist nach *Trenberth 2009, 2010* derzeit die Frage, warum seit 2004 die Zunahme des Wärmeinhaltes der Ozeane sich verlangsamt hat. Möglicherweise ist ein Teil der Wärme in den tieferen Ozean gegangen und die Messungen im Ozean sind unzureichend und die Unsicherheiten noch zu groß. Nach Korrektur der Daten aufgrund von Fehlern zeigt sich nach den neuesten Studien eine starke Erwärmung auch in den vergangenen Jahren (Abb. 9.18) (*Arndt 2010*).

Global und über die gesamte Wassersäule gemittelt ist die Temperatur des Ozeans seit 1955 nur um 0,04 °C angestiegen (*IPCC 2007*). Das liegt daran, dass sich bisher nur eine Oberflächenschicht (d. h. die durchmischte Deckschicht) von wenigen 100 m Tiefe erwärmt hat, die mittlere Ozeantiefe jedoch 3.800 m beträgt (*WBGU 2006*). Die globale Erwärmung der Meeresoberflächentemperatur (SST sea surface temperature) betrug 1850 – 2004 0,52° C (*Rayner 2006, IPCC 2007*), wobei im arktischen Bereich Temperaturerhöhungen um mehrere Grad auftraten und im Golfstrombereich vor der Küste der USA Abkühlungen von einigen Zehntel Grad.

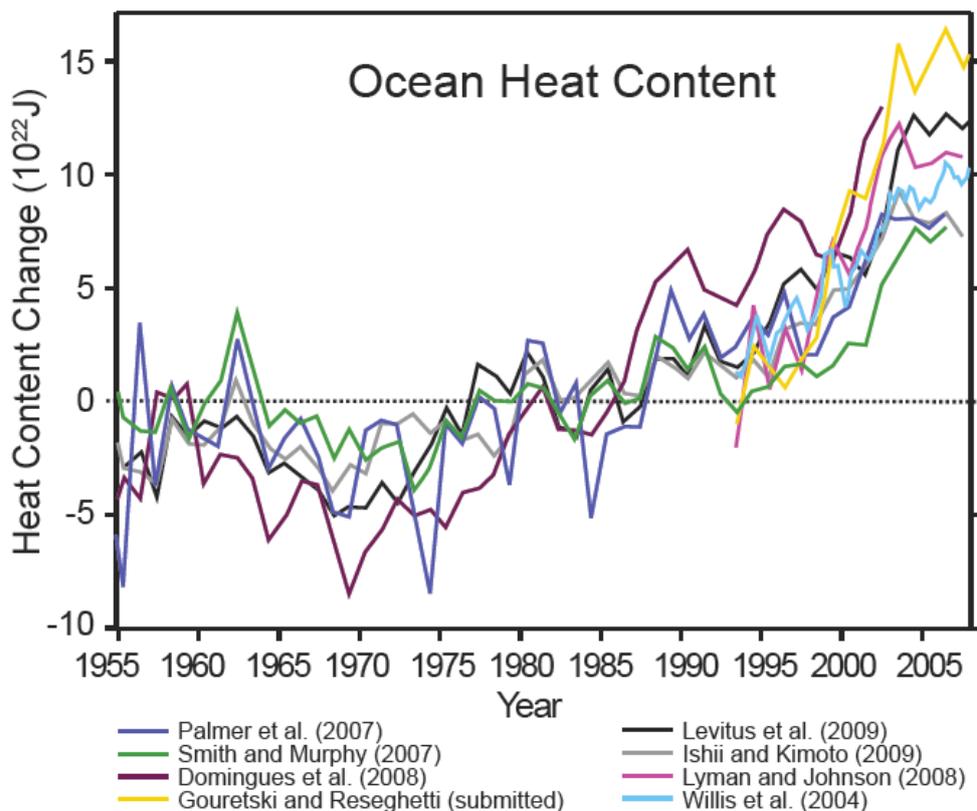


Abb. 9.18: Entwicklung der Änderung des Wärmeinhaltes in Joule ( $10^{22}$  J) des Ozeans 1955 – 2008 in der Schicht 0 – 700 m im Vergleich zur Referenzperiode 1955 – 2002, die verschieden farbigen zeigen unabhängige Auswertungen, die neuesten Studien in welchen die kürzlich entdeckten Fehler korrigiert wurden, zeigen die stärkste Erwärmung (*Arndt 2010*)

Beobachtungen haben gezeigt, dass 80 -90 % der gesamten Erwärmung der Erde (Ozeane, Atmosphäre, Kontinente, Kryosphäre) der letzten 40 Jahre in die Ozeane gegangen ist. Das Signal ist komplex mit einer vertikalen Struktur, die stark in den Ozeanen variiert. Diese Erwärmung kann nicht durch eine natürliche innere Klimavariabilität oder durch solare und vulkanische Antriebe erklärt werden, aber sie wird gut simuliert durch die Ergebnisse zweier anthropogen angetriebener Klimamodelle.

Die zusätzliche Aufnahme von  $\text{CO}_2$  an der Meeresoberfläche führt zu einer Versauerung des Ozeans. Der pH-Wert an der Ozeanoberfläche hat sich seit Beginn der Industrialisierung durch Zunahme der Säuremenge um 30 % um 0,1 reduziert und könnte nach Berechnungen bis Ende des 21. Jahrhundert um weitere 0,14 – 0,35 Einheiten zurückgehen (*IPCC 2007*). Kritische ökologische Folgen für Korallen und einige Planktonarten, die am Anfang der Nah-

rungskette für die Fische stehen, werden befürchtet (*IPCC 2007, WBGU 2006*). Viele kalkhaltige Skelettstrukturen von marinen Organismen können dann nicht mehr gebildet werden (*EEA 2008*).

### 9.5.2 Meeresspiegelanstieg

Ein Temperaturanstieg im Ozean führt zwangsläufig über die thermische Expansion zu einem Anstieg der Meeresoberfläche. Die geographische Ausbreitung von Meeresspiegelerhöhungen ist infolge der unterschiedlichen Erwärmung der Ozeane und Hebungs- und Senkungsprozessen an vielen Küstenlinien sehr unterschiedlich (Abb. 9.19). Das Abschmelzen von Festlandeis führt ebenfalls zu einem Meeresspiegelanstieg. Für 1 mm Anstieg müssen 360 Mrd. t Eis abschmelzen (*Trenberth 2009*). Ungefähr 60 % des Meeresspiegelanstiegs wird durch die Erwärmung verursacht und 40 % vom schmelzendem Landeis. Nach Berechnungen (*IPCC 2007*) ist im 20. Jahrhundert im globalen Mittel der Meeresspiegel um 0,17 (0,12 – 0,22) m angestiegen. Nach *IPCC 2007* ist von Auswertungen von Satellitenmessungen der globale mittlere Meeresspiegel 1993 – 2003 schneller angestiegen, ca. 3,1 (2,4 – 3,8) mm/Jahr (1961 – 2003 1,8 (1,3 – 2,3) mm/Jahr). Ob der schnellere Meeresspiegelanstieg eine dekadische Variabilität widerspiegelt oder eine Zunahme des Langzeittrends ist unklar (*IPCC 2007*). Neue Messungen von *Merrifield 2009* ergaben für den Zeitraum 1994 – 2008 einen mittleren Anstieg von 3,5 mm/Jahr (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2008/ann/bams/chapter3.pdf>). Nach *Arndt 2010* hat sich der Meeresspiegelanstieg 2004 – 2009 um ca. 15 % verlangsamt - mit regionalen großen Unterschieden.

Nach *IPCC 2007* wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ein Meeresspiegelanstieg von 0,18 – 0,59 m erwartet. Neben der thermischen Ausdehnung spielt auch das Abschmelzen von Eis – soweit es nicht im Meerwasser schwimmt - eine Rolle. Das Abschmelzen von Gebirgsgletschern dürfte im 20. Jahrhundert einen Beitrag zum Meeresspiegelanstieg von 2 – 5 cm ergeben haben (*IPCC 2007*).

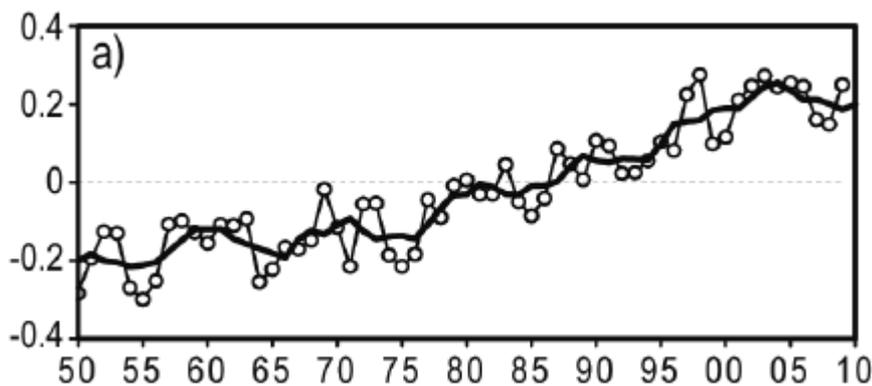


Abb. 9.19 : globaler Meeresspiegelanstieg 1950 – 2009 (*Arndt 2010*) Der gegenwärtige mittlere globale Meeresspiegelanstieg wird auf 3,1 mm/Jahr abgeschätzt (*IPCC 2007*), nach *Merrifield 2009* für 1994 – 2008 3,5 mm/Jahr, nach *Arndt 2010* 2004 – 2009 3,1 mm/Jahr

Der mit den Modellsimulationen des AR4 berechnete Meeresspiegelanstieg bis 2100 in Höhe von 20 – 30 cm berücksichtigt nicht das von einigen Wissenschaftlern befürchtete verstärkte Abschmelzen von Grönlandeis und Randbereichen der Antarktis (s. Kap. 9.4). Für den Nordatlantik wird ein zusätzlicher Meeresspiegelanstieg von 20 cm aufgrund der veränderten Meereszirkulation berechnet. *Rahmstorf 2006* fand eine semi-empirische Beziehung zwischen Meeresspiegelanstieg und Temperaturanstieg. Als Ergebnis könnte bis 2100 der Meeresspiegel 0,5 – 1,4 m über den Pegel von 1990 sein und damit viel höher als im AR4 projiziert. *Grinsted 2009* geht davon aus, dass *IPCC 2007* durch Nichtberücksichtigen der schmelzenden Eismassen den Meeresspiegelanstieg bis Ende des 21. Jahrhunderts um den Faktor 3 unterschätzt hat. Auch *Vermeer 2009* und *Rahmstorf 2010* gehen nach neuen Rechnungen mit den IPCC Szenarien davon aus, dass das *IPCC 2007* den Meeresspiegelanstieg bis Ende dieses Jahrhunderts deutlich unterschätzt hat und kommen je nach Szenario auf 1 – 2 m Meeresspiegelanstieg. Mehrere semi-empirische Studien kommen bei einem

weiteren Anstieg der Treibhausgase auf Werte von über einem Meter. Allein der Beitrag bei Verlust von Zweidrittel der Gletscher würde einen Anstieg von 40 cm bedeuten.

Abb. 9.20 zeigt, dass der aus Satellitenbeobachtungen gemessene Meeresspiegelanstieg 1993 – 2008 am oberen Rand der IPCC Szenarien liegt. Auch hier sind noch weitere Messungen und Beobachtungen sowie Modellrechnungen notwendig, um eindeutige Ergebnisse zu erhalten.

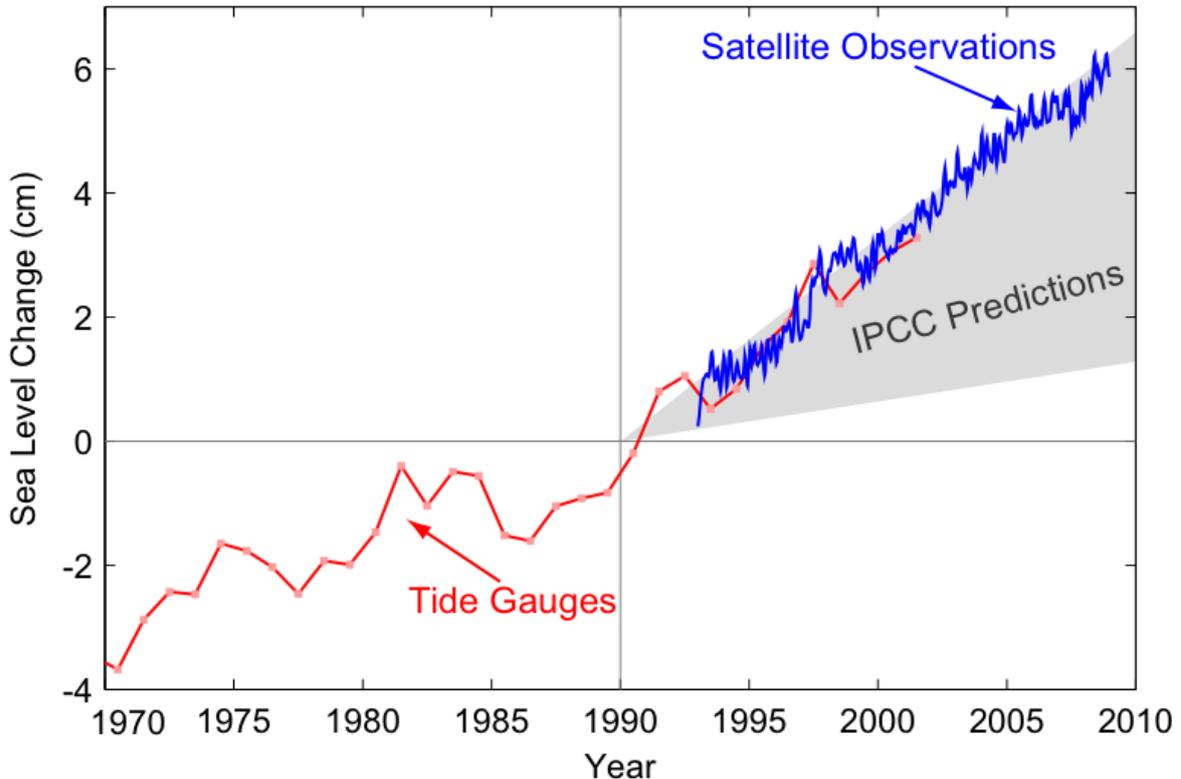


Abb. 9.20: Bandbreite des Meeresspiegelanstiegs gemäß den IPCC-Modellszenarien bis 2010 nach IPCC 2007, AR4 und Beobachtungen bzw. Satellitenmessungen. Die gemessenen Werte liegen am oberen Rand der IPCC Projektionen. Quelle: [www.copenhagendiagnosis.com](http://www.copenhagendiagnosis.com), 2009

Für Europa wird nach den Modellrechnungen ein um bis zu 50 % höherer Meeresspiegelanstieg berechnet als global.

**Stauseen** und andere künstliche Wasserreservoirare haben ebenfalls einen deutlichen Effekt auf den Meeresspiegel. *Chao 2008* hat eine Liste mit 29 484 künstliche Stauseen, die nach 1900 errichtet wurden, zusammengestellt. In den vergangenen 50 Jahren errichtete Staudämme sollen insgesamt etwa 10 800 Kubikkilometer Wasser enthalten sein, was etwa einen Meeresspiegelanstieg von -30 mm entspricht. *Chao* schätzt, dass dieses Zurückhalten des Wassers die Meeresspiegelerhöhungsrate in den vergangenen Jahrzehnten um etwa 0.55 mm pro Jahr reduziert hat.

## 9.6 Klimafolgen für Mensch, Natur und Umwelt

Die Klimafolgenforschung ist inzwischen zu einem eigenen Wissenschaftszweig geworden. So wurde in Potsdam vor einigen Jahren das Institut für Klimafolgenforschung (PIK) gegründet, das inzwischen u.a. einige regionale Studien (Deutschland, Brandenburg, Baden-Württemberg, Bayern) zu diesem Thema erarbeitet hat.

Die Folgen einer Klimaänderung (Temperaturanstieg, Niederschlagsveränderung, Meeresspiegelanstieg, usw.) können auf unterschiedliche Weise Mensch und Natur beeinflussen:

- Gesundheit (Kälte- und Hitzetote, Infekte, Vektor- und sonstige Krankheiten)
- Landwirtschaft (Ernteerträge, Bewässerung, Schädlinge)
- Wasserressourcen (Wasservorrat, Wasserqualität, Konkurrenz um Wasser)

- Küstengebiete (Erosion von Stränden, Überflutung von Inseln, Küstenschutz)
- Flora und Fauna (Artenverlust, Lebensraumveränderung, Gletscherschwund)
- Infrastruktur (Zerstörung durch Stürme und Überschwemmungen)
- Tourismus (weniger Wintersport, mehr Sommerurlaub z.B. an Nord- und Ostsee)

Nach *Schönwiese 2006* sind folgende positive (+) und negative (-) Auswirkungen einer Klimaänderung zu erwarten (Beispiele):

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

Das *IPCC 2007* geht zusammenfassend (Abb. 9.21) beispielhaft von folgenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökosysteme, Nahrungsmittel und Gesundheit aus:

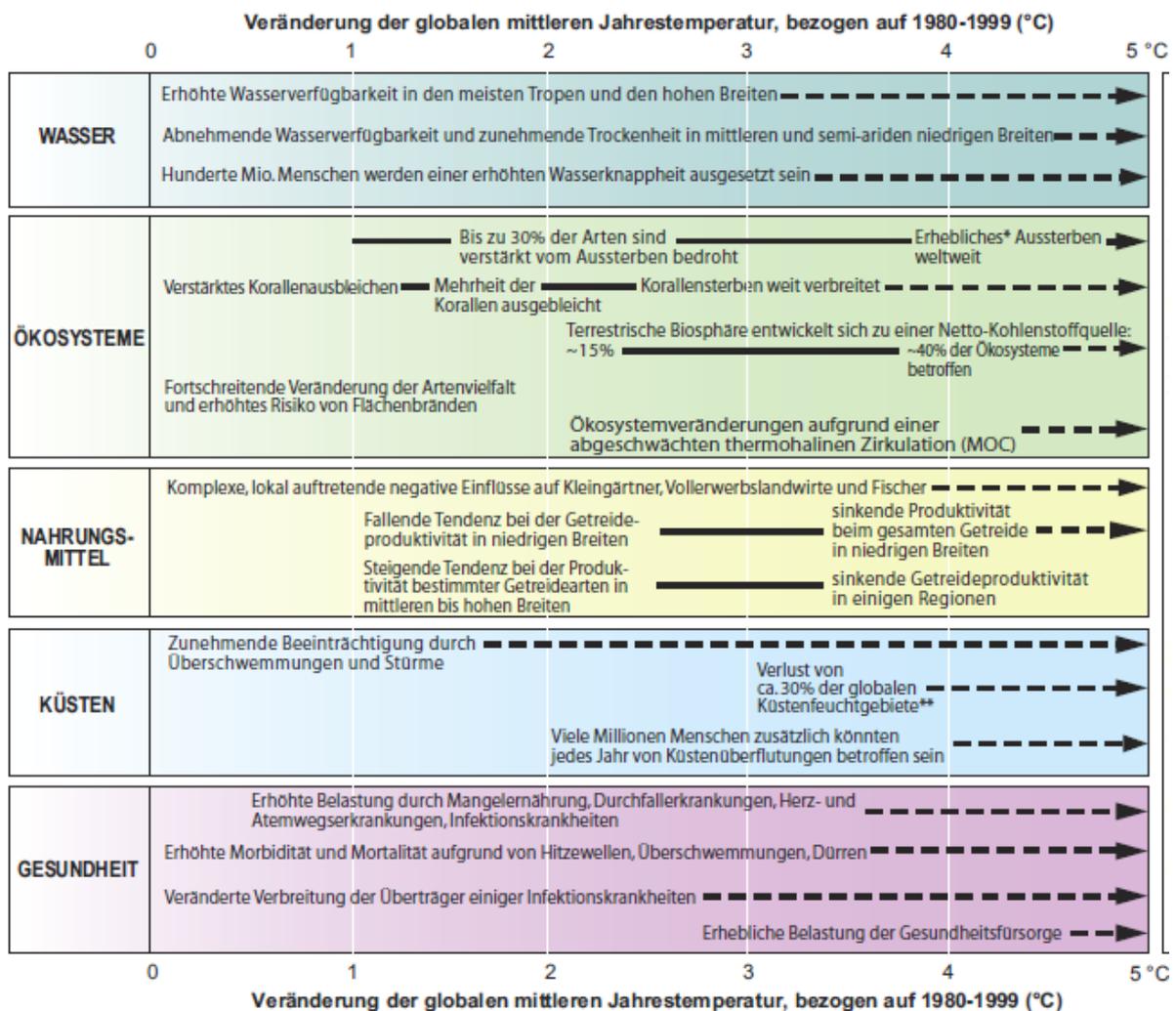


Abb. 9.21: Beispiele für Auswirkungen in Abhängigkeit von der mittleren globalen Erdoberflächenerwärmung (Auswirkungen werden je nach Ausmaß der Anpassung, Geschwindigkeit der Temperaturänderung und sozioökonomischem Entwicklungspfad unterschiedlich ausfallen) (*IPCC 2007, Synthesebericht*)

*Schröter 2005* berichtet in Modellstudien über die Verletzlichkeit des Ökosystems in Europa bei einem globalen Klimawandel von positiven wie negativen Folgen. Das Forschungsprojekt des PIK „Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme“ hat 2005 hierzu konkrete, regionale Ausführungen gemacht (<http://www.anpassung.net/>). Inzwischen werden eine ganze Reihe von Projekten zur Klimafolgenforschung gefördert und durchgeführt (<http://www.ufz.de/index.php?de=16032>), z.B.: **ALARM** - Assessing Large Scale Environmental Risks with tested Methods

**ECOLINK** - Understanding effects of environmental toxicants at population and community levels,

**MACIS** - Minimisation of and Adaptation to Climate change Impacts on Biodiversity, **TERENO** - (TERrestrial ENvironmental Observatoria), Schutzgebiete Deutschlands im Klimawandel - Risiken und Handlungsoptionen,

**FLOODsite** - Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies, NeWater - New Approaches to Adaptive Water Management under Uncertainty.

### 9.6.1 Schaden – Statistik und Kosten

Das Ausmaß von Schäden für die Menschheit aus Naturereignissen wird generell in erster Linie von der Zahl der Menschen bestimmt, die in exponierten Gebieten leben: Mit zunehmender Bevölkerungszahl steigen die Werte, die den Naturgefahren ausgesetzt sind, nahezu proportional an. Gerade Flussauen und Küstenregionen werden als attraktives, billiges Bauland für Wohnhäuser, Gewerbe- und Industriegebiete intensiv genutzt. Außerdem sind heute die Häuser wesentlich wertvoller als früher. Das treibt die Schadenshöhe bei Hochwasser oder Sturmfluten gewaltig in die Höhe (*Münchner Rück 2005, Müller 2008*). Mit dem Hochwasserschutzgesetz von 2005 soll in Deutschland dieser Entwicklung durch Ausweisung von „Retentionsflächen“ entgegengewirkt werden.

Nach Angaben der *Münchner Rück 2007* sind folgende Faktoren für die Zunahme der Naturkatastrophen verantwortlich:

#### Naturkatastrophen nehmen an Frequenz und Ausmaß zu Die wichtigsten Gründe

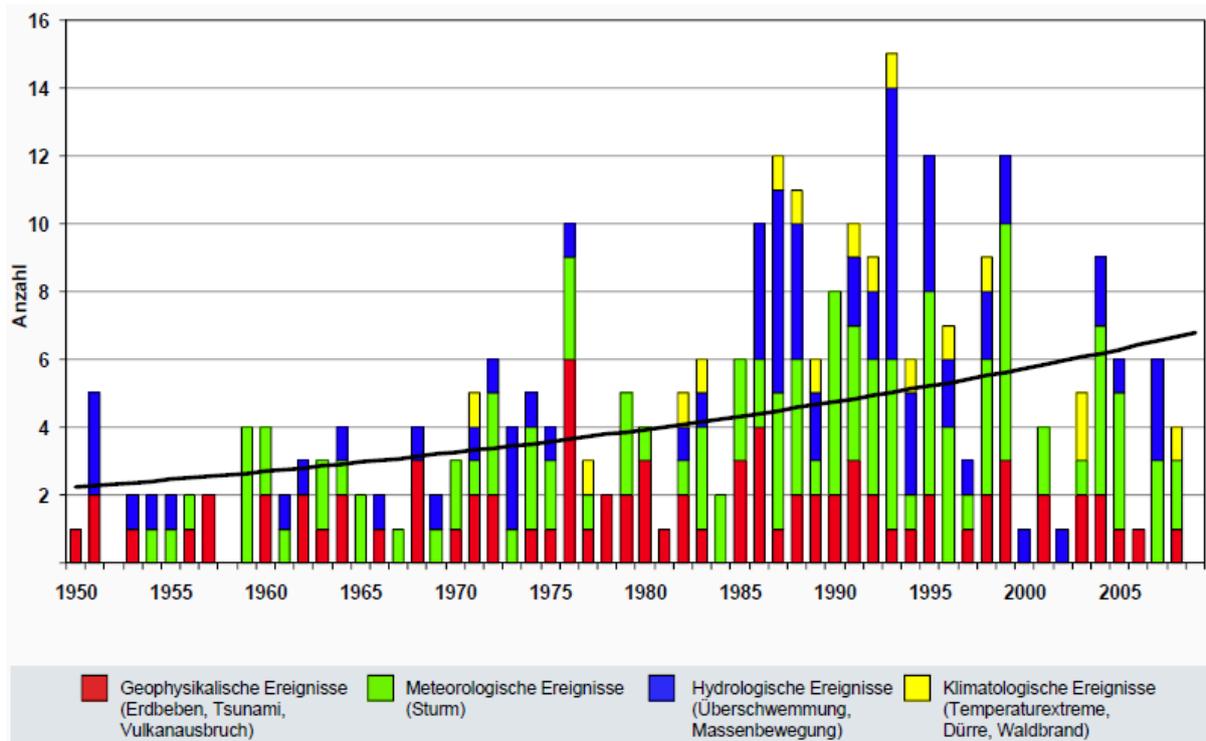
- Bevölkerungszunahme
- Steigender Lebensstandard
- Konzentration Bevölkerung und Werte in Großstadträumen
- Besiedlung und Industrialisierung stark exponierter Regionen
- Anfälligkeit moderner Gesellschaften und Technologien
- Änderung der Umweltbedingungen (Klimaänderung)

#### Statistik der Naturkatastrophen

Die insbesondere von der Versicherungswirtschaft wie der Münchner Rück aufgestellten Statistiken über wetterbedingte Naturkatastrophen (Abb.9.22) und deren volkswirtschaftliche

Schäden (Abb. 9.23) müssen kritisch betrachtet werden. Die Zunahme der Schadenssumme hat nicht zwangsläufig mit einer Zunahme der Stürme, Hochwässer oder Niederschläge zu tun. Häufig hat der Mensch selbst durch Besiedelung kritischer Bereiche wie Küstenzonen oder Uferbereiche von Flüssen zu einer Erhöhung der Schadenssumme beigetragen.

Die Vereinten Nationen gehen davon aus, dass sich alle 12 Jahre die Verluste durch Wetterereignisse verdoppeln. Obwohl die Zunahme an Verlusten dominiert wird von sozio-ökonomischen Faktoren (wie Bevölkerungszunahme, mehr Häuser in kritischen Gebieten, mehr Wohlstand, mehr und wertvollere Infrastruktur) gibt es Anzeichen, dass sich die natürlichen Faktoren auch ändern. Der Anteil des Klimawandels daran ist nicht bekannt (EEA 2008). Die beiden großen Naturkatastrophen im Sommer 2010 – die Trockenheit mit Waldbränden in Russland und Überschwemmungen in Pakistan stehen nach Ansicht der NOAA durchaus in einem Zusammenhang. Ein ungewöhnlich starker polarer Jetstream verlagerte sich nördlich von Moskau in Richtung Pakistan. Diese Wetterlage hielt über einen Monat an und brachte heiße Luft nach Russland und verhinderte Niederschlag. Das niedrige Luftdrucksystem, das normalerweise Regen bringen würde, wurde um den Jetstream herum südwärts nach Pakistan geleitet, wo es kombiniert mit schwerem Monsunregen riesige Überschwemmungen verursachte (<http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/?report=hazards#drought>).



© 2010 Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, GeoRisikoForschung, NatCatSERVICE – Stand Januar 2010

Abb. 9.22: Globale Entwicklung großer Naturkatastrophen 1950 – 2009 (Anzahl der Ereignisse), eingeteilt nach verschiedenen Schadensarten – 2006 gab es keine großen wetterbedingten Ereignisse (Münchener Rück 2010, [http://www.munichre.com/publications/302-06294\\_de.pdf](http://www.munichre.com/publications/302-06294_de.pdf))

Seit 1950 gab es nur 3 Jahre ohne „große Naturkatastrophen“: 1952, 1958 und 2009 ([http://www.munichre.com/publications/302-06294\\_de.pdf](http://www.munichre.com/publications/302-06294_de.pdf)).

Abbildung 9.24 zeigt für Deutschland, dass Stürme und Überflutungen den Großteil der Naturgefahren ausmachen. Die Abbildung zeigt einen Anstieg der Schadensfälle bei Naturereignissen wie Stürmen. Dies hat jedoch, wie die Münchener Rück auf Anfrage erklärte, nichts mit einem Anstieg der Sturmhäufigkeit zu tun.

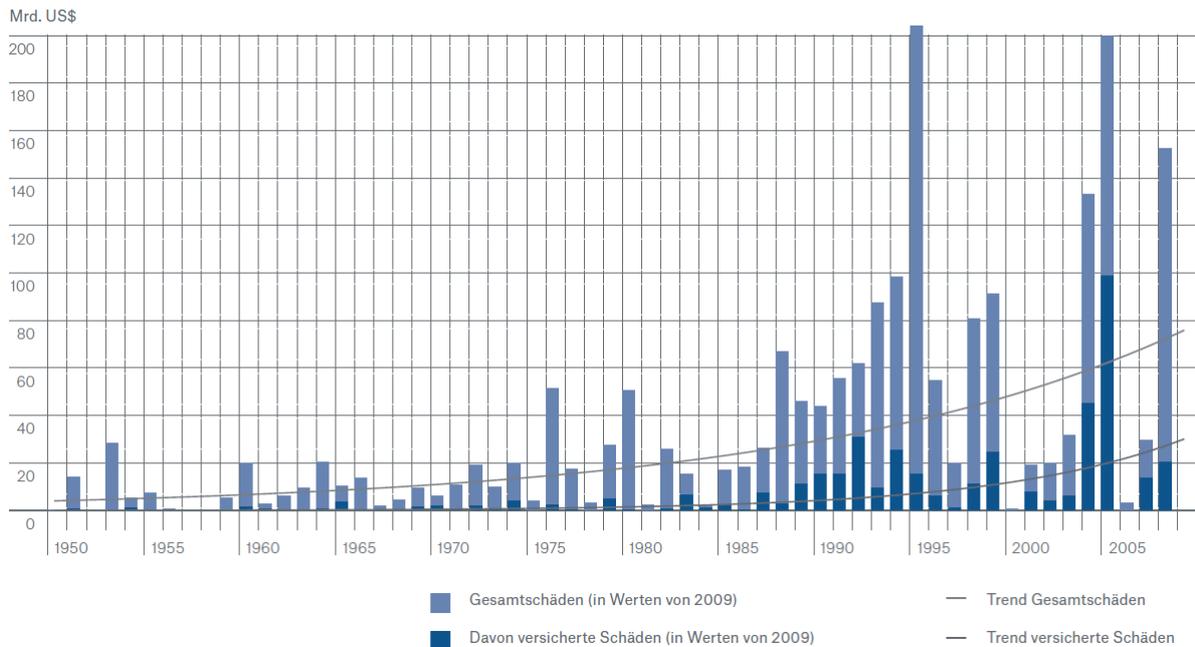


Abb. 9.23: globale Entwicklung großer Wetterkatastrophen 1950 – 2009 und volkswirtschaftliche Schäden. Gesamtschäden und versicherte Schäden – Absolute Werte und Langfristrends. Das Diagramm gibt die – auf heutige Werte hochgerechneten – Gesamtschäden und versicherten Schäden an. Die Trendkurven dokumentieren die Zunahme der Schäden ab 1950. (Münchener Rück 2010).

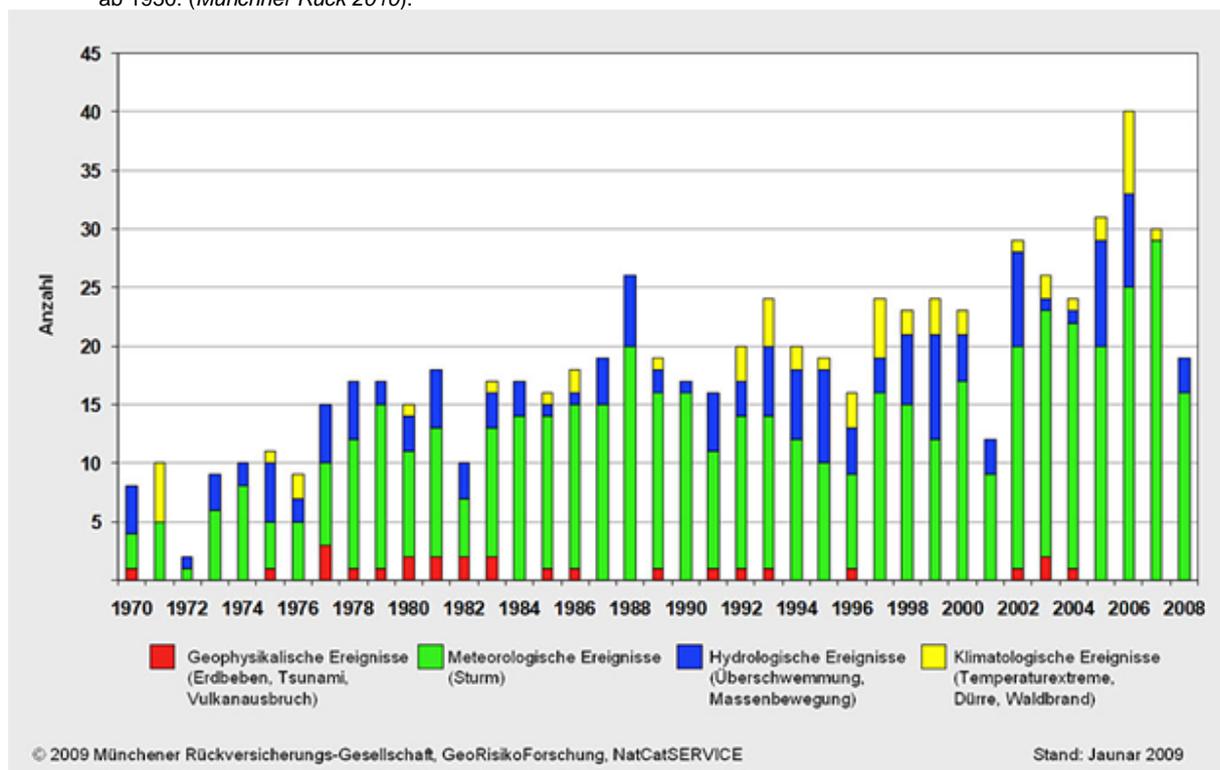


Abb. 9.24: Entwicklung der Naturkatastrophen in Deutschland 1970 – 2008; zu beachten ist, dass nur die Anzahl der Schadensereignisse dargestellt wird – unabhängig vom Ausmaß und der Schadenshöhe (Münchener Rück 2009)

Wie in den Kapiteln 9.1-9.5 dargestellt, ist bei einer andauernden Klimaerwärmung eine regional und im Ausmaß stark unterschiedliche Zunahme von Stürmen, Hochwasser, Sturmfluten, Überschwemmungen und Starkniederschlägen, Hitzeperioden und Dürren zu erwarten (Bartels 2006, von Storch 2005, IPCC 2007). Bei einem Anstieg des Meeresspiegels um 1 Meter werden, wie Abb. 9.25 zeigt, weltweit die rot eingezeichneten Küstengebiete betroffen sein.

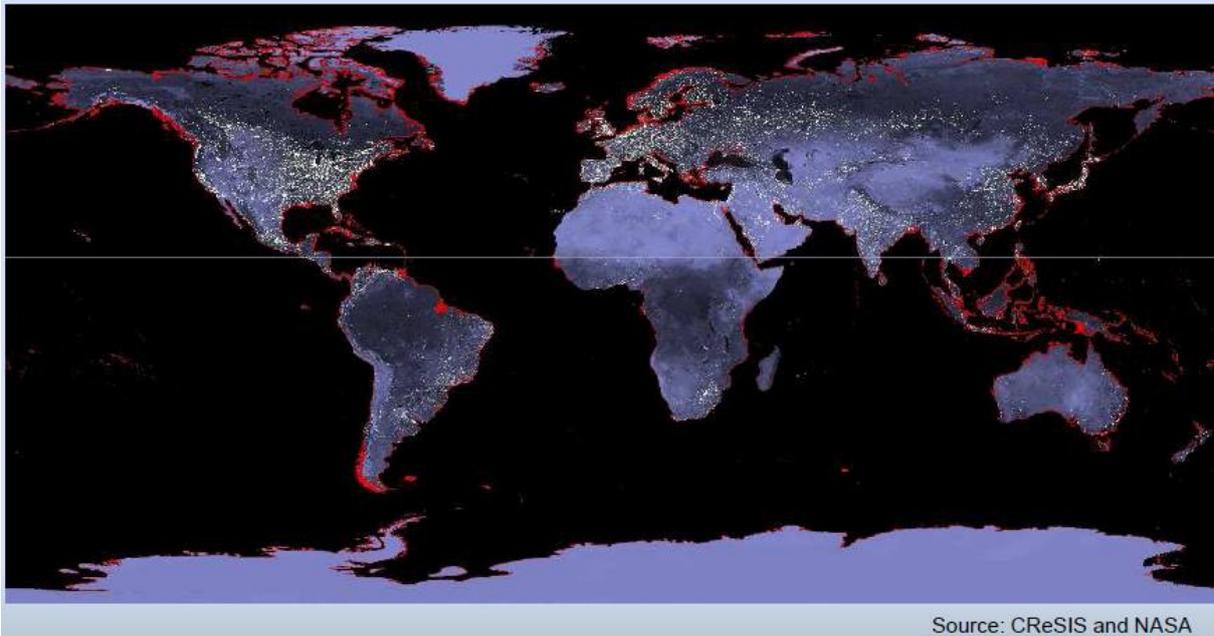


Abb. 9.25: Bei einem Anstieg des Meeresspiegels um 1 Meter werden weltweit die rot eingezeichneten Gebiete betroffen sein.

### 9.6.2 Gesundheit

Die *IPCC 2007 WG III* schätzt, dass der anthropogen verursachte Klimawandel im Jahr 2000 ca. 150 000 Menschenleben gekostet hat. Ein hohes Maß an Unsicherheit infolge Fehlens von zuverlässigen Langzeitdaten, des großen Einflusses von sozio-ökonomischen Faktoren und Änderungen im Immunverhalten sowie der Arzneimittelresistenz wird jedoch zugestanden (*Patz 2005*). Unbestreitbar ist, dass die Entwicklungsländer besonders gefährdet sind.

Neben den hitzebedingten Todesfällen (Extremfall Sommer 2003 mit 22 000 bis 45 000 Todesfällen in Europa) und Todesfällen infolge Ernährungsmangel sowie Überschwemmungen werden infektiöse Todesfälle betrachtet. Malaria und das Dengue-Fieber spielen dabei eine herausragende Rolle. Durch Wasser beeinflusste Krankheiten wie Diarrhö und Cholera spielen vor allem in Ländern wie Bangla Desch oder Peru eine Rolle. Für 2030 wird nach Angaben der WHO mit einer Verdoppelung der Todesfälle infolge der anthropogenen Klimaerwärmung gerechnet. Besonders gefährdet sind die Länder um den pazifischen und indischen Ozean, die durch starke Regenvariabilität – verursacht durch El Niño/Southern Oszillation – geprägt sind, und Afrika oberhalb der Sahara. Auch große Städte mit einem urbanen Wärmeinseleffekt können extreme klimatische Ereignisse verstärken.

Die Klimaänderung wird nach *IPCC 2007*, (Synthesereport) voraussichtlich den Gesundheitszustand von Millionen von Menschen – vor allem jener mit geringer Anpassungskapazität – in Mitleidenschaft ziehen, durch

- wachsende Unterernährung und Folgeerkrankungen, mit Auswirkungen auf Wachstum und Entwicklung von Kindern
- erhöhte Sterblichkeit sowie mehr Erkrankungen und Verletzungen aufgrund von Hitzewellen, Überschwemmungen, Stürmen, Bränden und Dürren;
- erhöhte Belastung durch Durchfallserkrankungen;
- vermehrte Häufigkeit von Herz- und Atemwegserkrankungen aufgrund höherer Konzentrationen von bodennahem Ozon, welche durch Klimaänderung bedingt sind, sowie
- eine veränderte räumliche Verbreitung der Überträger einiger Infektionskrankheiten.

Das EuroHEAT Projekt, in welchem v.a. die Klimafolgen von Hitzewellen auf die menschliche Gesundheit und das Gesundheitswesen betrachtet wurden, hat ergeben, dass hitzebedingte Krankheits- und Todesfälle durch entsprechende Vorsorgemaßnahmen weitgehend vermeidbar sind (*EEA 2008*). Die Klimaänderung wird voraussichtlich in manchen Fällen uneinheitliche Folgen haben – so z. B. eine Ab- oder Zunahme von Ausbreitungsgebieten und –

möglichkeiten der Malaria in Afrika. Studien in gemäßigten Gebieten haben gezeigt, dass die Klimaänderung voraussichtlich gewisse Vorteile für die Gesundheit mit sich bringen wird, wie z.B. einen Rückgang von durch Kälte verursachten Todesfällen. Insgesamt ist zu erwarten, dass weltweit – insbesondere in den Entwicklungsländern – die negativen Effekte steigender Temperaturen auf die Gesundheit die Vorteile überwiegen. Das Verhältnis zwischen positiven und negativen Auswirkungen für die Gesundheit wird von Ort zu Ort unterschiedlich sein und sich bei einem weiteren Temperaturanstieg im Verlauf der Zeit ändern. Faktoren, die einen direkten Einfluss auf die Gesundheit der Bevölkerung haben – wie z.B. das Bildungs- und Gesundheitswesen, die öffentliche Gesundheitsvorsorge so wie Infrastruktur und die wirtschaftliche Entwicklung – werden von entscheidender Bedeutung sein.

Nach *Hemmer 2007, Klasen 2009* kann die globale Erwärmung sowohl zum Auftreten von bisher nicht in Deutschland heimischen Erkrankungen, wie z. B. West-Nil-Fieber, Dengue, oder Leishmaniasen, als auch zur verstärkten Ausbreitung von Borreliose und Frühsommer-Meningoenzephalitis führen. Dagegen ist die Ausbreitung von Malaria und Cholera stärker von sozioökonomischen Faktoren abhängig.

### **Malaria**

Die durch die Anopheles-Stechmücken übertragene Malaria gehört weltweit zu den wichtigsten vektorübertragenen Krankheiten. Gegenwärtig leben in über 100 Staaten und Territorien 3 Milliarden Menschen oder 48 % der Weltbevölkerung in Malaria-gefährdeten Gebieten. 400-500 Millionen werden jährlich neu infiziert, und über eine Million Menschen, meistens Kinder unter fünf Jahre, sterben jedes Jahr an einer Malaria-Infektion. Über 80% der Malaria-Fälle ereignen sich in Afrika südlich der Sahara. *IPCC 2007* gibt nach Modellrechnungen ein sehr differenziertes Bild je nach Region und Szenario. Gebiete mit zurückgehenden Niederschlägen wie das Amazonasbecken, Mittelamerika oder Pakistan zeigen z.B. eine Abnahme des Malariarisikos. Ein höheres Risiko wird dagegen für die Hochlandgebiete in Ostafrika, in Mittelasien und China prognostiziert. In Europa hat sich das Tiger Mosquito, das mehrere Krankheiten übertragen kann, in den vergangenen 15 Jahren in 12 Ländern ausgebreitet.

Anpassungsmaßnahmen in der Gesundheitsvorsorge, Entwicklung neuer Medikamente oder Verhaltensänderungen des Menschen (Moskitonetze), die zu einer deutlichen Verringerung der Malariagefahr beitragen können, Verringerung der Armut, müssen berücksichtigt werden. *Reiter 2008* hält diese Faktoren wichtiger als der Klimawandel.

Nach *Kampen 2008* ist bei dem gegenwärtigen Stand des Gesundheitssystems z.B. in der EU eine Ausbreitung der Malaria mit der globalen Erwärmung auf lange Sicht höchst unwahrscheinlich. Schließlich gab es im 18. und 19. Jahrhundert selbst in gemäßigten Ländern wie England, Schweden und sogar Finnland zahlreiche Malariafälle, die durch entsprechende Maßnahmen ausgerottet werden konnten.

### **Dengue-Fieber**

Dengue wird durch verschiedene Viren hervorgerufen, welche durch bestimmte Moskitos übertragen werden, die vor allem das Blut von Menschen bevorzugen. Dengue ist primär eine städtische Krankheit in den Tropen und ist dort zu einem wesentlichen Gesundheitsproblem geworden. Die Übertragung auf den Menschen erfolgt während des ganzen Jahres mit einem Höhepunkt in den Monaten mit starken Regenfällen und hoher Feuchtigkeit. Jährlich erkranken 50 – 100 Mio. Menschen hieran. Die Hauptursachen für die gegenwärtig rasche Ausbreitung der Krankheit sind das allgemeine Bevölkerungswachstum, die rasche Urbanisierung, das Fehlen effektiver Mosquito-Bekämpfung und die grenzüberschreitende Verbreitung neuer Typen des Dengue-Virus.

Ähnlich wie bei Malaria ist auch der Ausbruch von Dengue-Epidemien abhängig von klimatischen Bedingungen, wenn auch aufgrund der Bevölkerungsdichte in den Städten weniger stark. Dengue-Epidemien treten in den Tropen vor allem in den Monaten mit starken Niederschlägen und hoher Feuchtigkeit auf und zeigen eine Korrelation zum ENSO-Phänomen. Die Entwicklung eines Impfstoffes ist schon weit vorangeschritten (*Wang 2009, Lazo 2010*).

## Zecken

In Mittel- und Nordeuropa sowie in den Vereinigten Staaten spielen als klimaabhängige Vektor-Krankheit vor allem die durch Zecken übertragene Meningoenzephalitis und die Lyme-Borreliose eine wichtige Rolle. Die Zeckenzephalitis ist eine Virusinfektion, die zu Erkrankungen der Hirnhaut, des Gehirns und des Rückenmarks führen kann, ohne dass es dagegen eine wirksame Therapie gibt. Die Lyme-Borreliose wird durch Bakterien verursacht und kann mit Hilfe von Antibiotika behandelt werden. In den 1990er Jahren ist die Verbreitung der Lyme-Borreliose in den Vereinigten Staaten (*Brownstein 2005*) stark angestiegen. Die Zeckenzephalitis ist zwar immer noch ein seltenes, aber zunehmendes, ernsthaftes Problem, da sie tödlich wirken kann. In endemischen Gebieten sind 1 – 4 % der Zecken infiziert. Milde Winter begünstigen die Überlebenschancen von Zecken und ihren Wirtstieren (kleineren Waldnagern und Rotwild) stark. Dadurch wird die Übertragungsintensität in den jeweils folgenden Jahren auf einem sehr viel höheren Niveau angesetzt, da nicht erst neue Populationen aufgebaut werden müssen. Auch Veränderungen im menschlichen Freizeitverhalten spielen eine Rolle.

Das frühere Einsetzen des Frühjahrs, der spätere Winterbeginn und mildere Wintertemperaturen haben auch in Skandinavien zu einer Ausweitung der durch Zecken übertragenen Enzephalitis geführt. Empirische Untersuchungen in Schweden haben einen Zusammenhang zwischen Klimadaten und der Verbreitung von Zeckenzephalitis hergestellt. Vor allem die in den letzten Jahrzehnten zunehmend milderen Wintertemperaturen, haben offensichtlich zu einer höheren Infektionsrate geführt (<http://www.euro.who.int/document/E89522.pdf>). Die Klimaänderung kann jedoch nicht alleinige Ursache des Ausbreitens der infizierten Zecken sein, da die Ausbreitung in Europa sehr heterogen ist (*EEA 2008*).

### 9.6.3 Ernährung

Der Einfluss des Klimawandels auf die zukünftige Ernährungssituation ist für die Menschheit von entscheidender Bedeutung. Auf die Anpassungsmöglichkeiten wie z.B. der Verwendung hitzeresistenter Pflanzen und dem Einsatz verstärkter künstlicher Bewässerung wird im *IPCC Bericht 2007* ausdrücklich eingegangen.

Hierzu zählt zum Beispiel die CO<sub>2</sub>-Düngung. Ein höherer CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre beschleunigt und verstärkt das Wachstum vieler Pflanzen und ergibt damit eine Verbesserung der Ernteerträge. Auch der beobachtete Holzzuwachs in den Wäldern Mitteleuropas – trotz Waldschäden – in den vergangenen Jahren ist ein Effekt der höheren CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre. Das funktioniert jedoch nicht bei allen Pflanzenarten gleichmäßig und nur solange, wie kein Mangel an anderen Nährstoffen bzw. Wasser für die Pflanzen besteht.

Nach *IPCC 2007* zeigen sogenannte C4-Pflanzen (tropische Gräser, Mais und Zuckerrohr) kein bzw. wenig (0 – 10 %) verstärktes Wachstum bei höherer Kohlendioxidkonzentration, aber weniger Transpiration, während die C3-Pflanzen (praktisch alle Bäume, die meisten Landwirtschaftsprodukte einschließlich Weizen und Reis) ihr Wachstum um 10 – 25 % verstärken. Eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration verringert die Wasserverdunstung (Transpiration) der Pflanzen durch teilweise Schließung der Blattöffnungen (stomata). Experimente haben gezeigt, dass bei einer Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Zuwachs bei einem jungen Kiefernwald 25 % betragen kann. Während in jungen Wäldern ein Zuwachs der Nettoprimärproduktion gefunden wurde, war dies bei älteren hohen Bäumen praktisch nicht der Fall. Für Getreide wurde ein entsprechender Zuwachs von 33 % gefunden (Abb. 9.25) (*IPCC 2007*).

Höhere Temperaturen fördern auch das Wachstum vieler Pflanzen, und die Vegetationsperiode wird dadurch verlängert. Zahlreiche Studien belegen, dass bei Weizen in mittleren und höheren Breiten bis etwa 3° Temperaturerhöhung um 20 – 30 % höhere Ernteerträge aufwiesen, das gilt auch für Mais, wenn z.B. Bewässerung angewendet wird (*EEA 2008*). Bestimmte Regionen in Europa, Russland, USA, Kanada und Teile Asiens werden davon durch höhere Ernteerträge zunächst profitieren (Abb. 9.26). Wie *Moeller 2010* in einer Studie mit Szenarienrechnungen nachwies, wird die EU durch die CO<sub>2</sub> Düngung bis 2050 „profitieren“ und sich höhere Ernteerträge ergeben. Es gibt offensichtlich eine Temperatur- Ober- und - Untergrenze für das Pflanzenwachstum und einen Temperaturbereich, in dem die maximale

Netto-Photosynthese bzw. der höchste Ertrag stattfinden. Bei einem zu starken Temperaturanstieg und/oder bei Wassermangel werden deswegen Ernteverluste auftreten. Die Hitzeperiode in Europa im Sommer 2003 war ein Beispiel hierfür; Messungen und Rechnungen (Ciais 2005) haben einen Rückgang der pflanzlichen Primärproduktion von ca. 30 % in dieser Zeit ergeben.

Die kritische Grenze für die globale Temperaturerhöhung wird häufig mit ca. 2 °C angegeben (IPCC 2007). Bei Temperaturanstiegen über 3-4 °C wird generell von überwiegend negativen Auswirkungen ausgegangen (IPCC 2007, OECD 2005). Afrika dürfte am wenigsten von einem Kohlendioxidanstieg profitieren, da die Temperaturen häufig bereits jetzt in einem kritischen Bereich liegen und der Wassermangel für bestimmte Gebiete noch verstärkt wird. Moeller weist in seiner Übersichtsarbeit (Moeller 2010) – wie bereits Schmidhuber 2007 - auf die hohe Bedeutung der sozio-ökonomische Entwicklung der Staaten hin, die entscheidender für die Ernährungslage sein kann, als die Auswirkungen des Klimawandels.



## Changes in crop yield (5 main staple cereals) from the present day to the 2080s

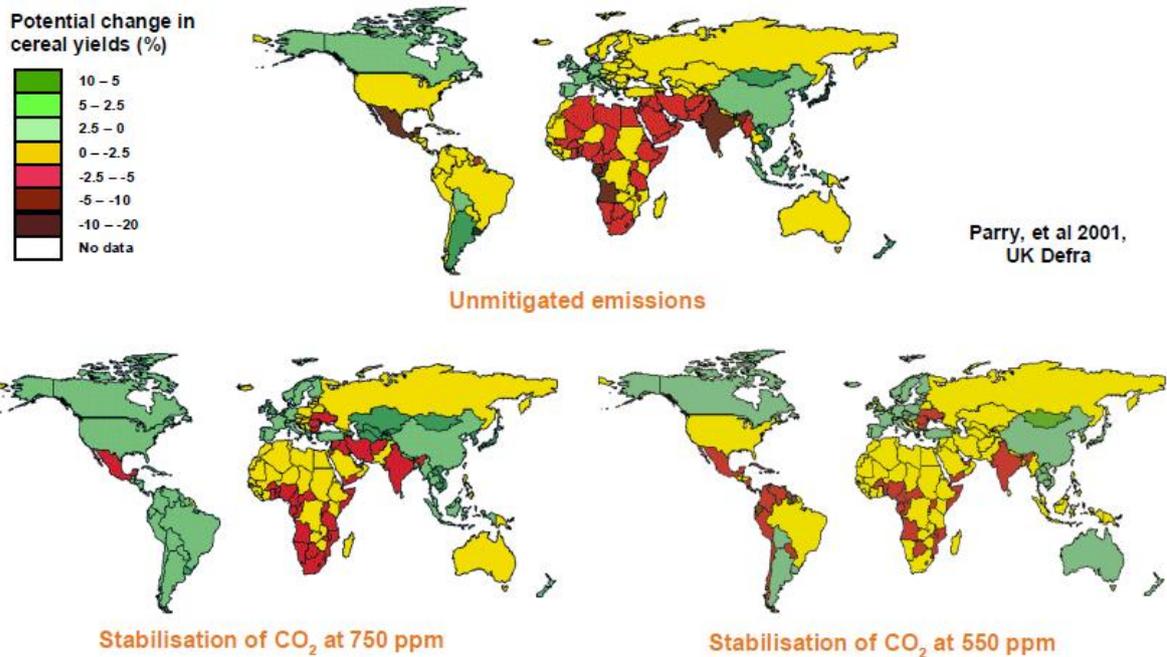


Abb. 9.26: Regional unterschiedliche Auswirkungen auf die Ernteerträge von Getreide bei verschiedenen Kohlendioxidkonzentrationen nach Modellrechnungen (Parry 2005, <http://www.stabilisation2005.com/day1/Parry.pdf>)

**Zusammenfassend** wird im IPCC 2007, WG II, SPM festgestellt:

Wenn der Anstieg der mittleren globalen Temperatur 1,5 - 2,5°C überschreitet, ist ein erhöhtes **Aussterberisiko** für ca. 20-30 % der bisher untersuchten Tier- und Pflanzenarten wahrscheinlich.

Bei einem Anstieg der lokalen mittleren Temperatur um bis zu 1-3°C wird für das **Ernteertragspotenzial** in mittleren bis hohen Breiten – abhängig von der Nutzpflanze – ein leichter Anstieg, bei Temperaturen oberhalb dieser Schwelle für einige Regionen ein Rückgang projiziert.

In **niedrigeren Breiten**, insbesondere saisonal trockenen und Tropengebieten, wird für das Ernteertragspotenzial eine Abnahme selbst bei geringem Anstieg der lokalen Temperatur (1-2°C) projiziert, was ein erhöhtes Hungerrisiko zur Folge haben würde.

**Global** gesehen wird bei einem Anstieg der lokalen mittleren Temperatur im Bereich von 1-3°C eine Steigerung des Potenzials für die Nahrungsmittelproduktion, bei einem Anstieg darüber hinaus hingegen eine Verringerung projiziert.

Bei zunehmender Häufigkeit von **Dürren und Überschwemmungen** wird ein negativer Einfluss auf die Produktion vor Ort, insbesondere in den für die Existenz notwendigen Sektoren

in den niedrigen Breiten, projiziert. Eine **Anpassung**, wie etwa veränderte Sorten sowie Anpflanzungs- bzw. Aussaatzeiten, ermöglicht – bei mäßiger Erwärmung – in mittleren bis hohen Breiten, die Getreideerträge auf derzeitigem oder höherem Niveau zu halten.

Global gesehen ist in der **Holzproduktion** bei einer Klimaänderung kurz- bis mittelfristig ein mäßiger Anstieg der wirtschaftlichen Ertragsfähigkeit – mit großen regionalen Schwankungen um den globalen Trend – zu verzeichnen.

Infolge fortschreitender Erwärmung sind bei der Verbreitung und Produktion bestimmter **Fischarten** regionale Veränderungen – mit projizierten nachteiligen Auswirkungen für Aquakulturen und Fischereien – zu erwarten.

#### 9.6.4 Anpassungsstrategien

Die Sensitivität, Adaptionfähigkeit und Verletzlichkeit von natürlichen und menschlichen Systemen, sowie die potentiellen Konsequenzen eines Klimawandels werden im Bericht der Arbeitsgruppe II des IPCC bewertet. Anpassung an den Klimawandel wurde in den letzten Jahren zu einer wichtigen politischen Priorität in den internationalen Verhandlungen zum Klimawandel. Viele internationale Berichte (UN, WHO, EU) beschäftigen sich mit diesem Thema. Besonders die am wenigsten entwickelten Länder (LDP) benötigen Hilfe, da sie am meisten unter den negativen Auswirkungen der Klimaänderungen zu leiden haben werden. Um die Folgen des Klimawandels zu minimieren, ist eine Diskussion über die Anpassung weltweit und auch in Deutschland im Gange.

Nach Ansicht des PIK (*Zebisch 2005*) muss ein Risiko- und Chancenbewusstsein auf dem Weg in ein an den Klimawandel angepasstes Deutschland geschaffen werden. Nach dem Vorsorgeprinzip müssten konkrete Anpassungsentscheidungen – wie z.B. eine Erhöhung der Deiche aufgrund steigender Hochwassergefahr – bald getroffen werden. Die Klimafolgen (Verwundbarkeit, Vulnerabilität) könnten in Deutschland in den meisten Regionen auf einen niedrigen Pegel verringert werden, wenn alle verfügbaren Adaptionmaßnahmen durchgeführt werden (*Zebisch 2005*). 2006 wurde hierzu beim Umweltbundesamt (UBA) das Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass) gegründet (<http://www.anpassung.net>). Ende 2008 wurde von der Bundesregierung die „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (DAS) beschlossen. Für die Bereiche Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei, Biologische Vielfalt, Bauwesen, Menschliche Gesundheit, Verkehr und Verkehrsinfrastruktur, Wasserhaushalt/ Wasserwirtschaft/ Meeresschutz, Boden, Tourismus, Industrie und Gewerbe, Energiewirtschaft und Finanzwirtschaft werden Handlungsoptionen in noch unterschiedlicher Detailtiefe skizziert und zum Teil erste mögliche Initiativen identifiziert, deren Umsetzung, soweit sie den Bund betreffen, in Angriff genommen werden sollen. Um die Gesundheitsauswirkungen von Hitze in Zukunft möglichst gering zu halten, hat der Deutsche Wetterdienst (DWD), wie viele andere europäische Wetterdienste auch, ein Hitzewarnsystem eingerichtet (*Koppe 2009*).

#### 9.7 „Gefährliche Klimaänderung“

Auf dem Weltgipfel in Rio de Janeiro wurde 1992 im Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen beschlossen, eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau anzustreben, das eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert. Dieser Grenzwert, ab dem es zu gefährlichen, nicht nachhaltigen (unsustainable) Auswirkungen aufgrund des Klimawandels für die Menschheit kommen soll, ist ein weiterer Diskussionspunkt. Auf dem Exeter Symposium 2005 – Avoiding Dangerous Climate Change – (*Schellnhuber 2005*) wurde dieses Thema ausführlich behandelt. Als Fazit wurde festgestellt, dass große Anstrengungen erforderlich sind, um eine 2-Grad-Grenze, die häufig als ein akzeptabler Wert einer globalen mittleren Temperaturerhöhung genannt wird, einzuhalten. Doch schon in einer um zwei Grad wärmeren Welt, so der Konferenzbericht, müssen sich Menschen auf Ernteauffälle, die Ausbreitung von Wüsten und Wasserknappheit für bis zu drei Milliarden Erdenbewohner einstellen.

Der Europäische Rat hat sich bereits 1996 für das Ziel ausgesprochen, die Erwärmung auf unter 2 °C zu beschränken. Die EU hat dieses Zwei-Grad-Ziel in Anlehnung an den vierten

Bericht des IPCC (AR4) 2009 in die Leitlinie umgesetzt, dass Industrieländer ihre Emissionen bis 2020 um 25 bis 40% und bis 2050 um 80 bis 95%, jeweils gegenüber 1990, verringern sollen. Hierzu müsste die Kohlendioxidkonzentration etwa bei 450 ppm bleiben (Meinshausen 2005). Hansen 2003, 2004 b, c sieht die Schwelle eher bei 1 °C, da er befürchtet, dass der Meeresspiegelanstieg wesentlich schneller erfolgen wird, wenn Teile des Grönländischen und Westantarktischen Eisschildes aufgrund von Instabilitäten in diesen Regionen schneller als ursprünglich angenommen abschmelzen werden. Eine weitere Gefahr wird in der Verlangsamung der Thermohalinen Zirkulation (THC) gesehen, ausgelöst durch Frischwasserzufuhr infolge schmelzenden Eises in der Polregion bzw. durch verstärkte Flusswasserströme aus Sibirien infolge Auftauens des Permafrostbodens.

Gegenüber den IPCC-Szenarien hat sich in den letzten Jahren die Zunahme der Treibhausgasemissionen – insbesondere von FCKW (Montreal Protokoll Gase) und bis 2007 Methan – abgeschwächt (s. Kap. 5.1). Andererseits wächst die Kohlendioxidkonzentration weiter an (Rahmstorf 2007); die Zuwachsrate aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe beträgt 2 %/Jahr. Die 2-Grad-Grenze kann nach Ansicht vieler Klimawissenschaftler nur eingehalten werden, wenn weltweit die Kohlendioxidemissionen sehr rasch zurückgefahren werden (IPCC 2007, Hansen 2007, Meinshausen 2009). In Abb. 9.27 ist als ein Beispiel hierfür das Alternativszenario der WEO/IEA gezeigt. Nach den Berechnungen einer neuen Studie von Meinshausen 2009 müssen hierfür die Treibhausgasemissionen bis 2050 gegenüber 1990 um mehr als die Hälfte reduziert werden. Röckner 2010 hat mit einem gekoppelten Klima-Kohlenstoffkreislauf-Modell des MPI-M die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen berechnet, die noch zulässig sind, wenn die 2° Grenze eingehalten werden soll. Im verwendeten Stabilisierungsszenario steigt die „erlaubte“ CO<sub>2</sub>-Emission von ca. 7 Gt C im Jahr 2000 auf einen Maximalwert von ca. 10 Gt C im Jahr 2015 an. Danach müssen die Emissionen deutlich reduziert werden, und zwar um 56 % bis zum Jahr 2050 und um fast 100 % gegen Ende dieses Jahrhunderts.

Wicke 2010 hat in einem PIK Report „Neue Strategien zur Realisierung des 2° Max. Zieles“ aufgezeigt. Danach sollte das Verteilungsprinzip „one human–one emissions right“ gelten: Von Beginn an gleiche Emissionsrechte für jeden einzelnen Menschen zwecks fairer und aktiver Einbindung der Entwicklungsländer. Im Einzelnen sollten jedem Land zwischen den Jahren 2015 und 2019 pro Kopf 5,1 Tonnen bzw. 5,1 Klimazertifikate jährlich kostenlos zugeteilt werden. Diese Zahl ergibt sich aus einer weltweiten Maximalmenge von 35 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub>, verteilt auf die Weltbevölkerung von insgesamt ca. 6,9 Milliarden Menschen im Jahr 2010. Damit könnte die 2° Leitplanke eingehalten werden.

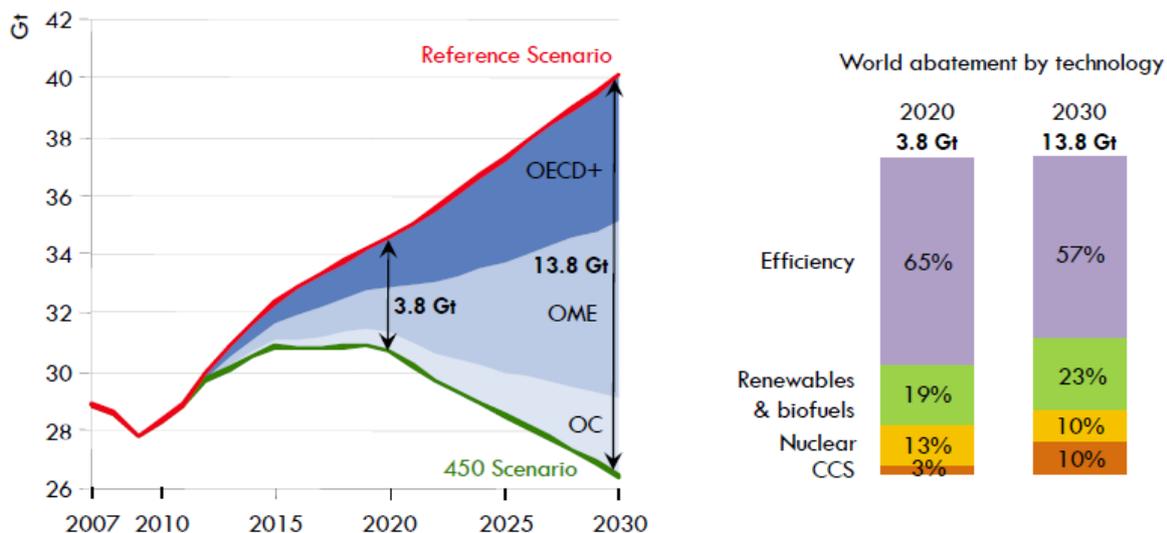


Abb. 9.27: Erforderliche Reduzierung der Emissionen, um bis 2030 das 2° Ziel (450 ppm CO<sub>2</sub>) einhalten zu können. (Quelle: World Energy Outlook 2009 (OME = Other Major Economies, OC = Other Countries) © OECD/IEA – 2009), ([http://www.iea.org/speech/2009/Tanaka/WEO2009\\_Press\\_Conference.pdf](http://www.iea.org/speech/2009/Tanaka/WEO2009_Press_Conference.pdf))

Die Klimawissenschaft geht davon aus, dass selbst bei einem sofortigem Stopp des CO<sub>2</sub>-Zuwachses die mittlere Temperatur der Erde in den nächsten 50 Jahren um rund 0,5° C weitersteigen wird, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wird (IPCC 2007).

## 9.8 Nutzen

Die Diskussion um die möglichen Folgen der Klimaerwärmung wurde lange Zeit nur über die negativen Auswirkungen geführt und die regional unterschiedlichen positiven Effekte nicht betrachtet. Eine moderate Temperaturerhöhung dürfte – wie im *IPCC 2007* Bericht dargestellt - überwiegend positive Folgen haben. Im Kapitel 9.6.3 dieses Berichtes sind zahlreiche Beispiele wie verlängerte Wachstumsperiode, verstärktes Pflanzenwachstum und verstärkte Holzproduktion (CO<sub>2</sub> Düngung) aufgeführt.

Höhere Temperaturen verringern im Winter die Zahl der Frosttage und reduzieren damit auch den Heizungsbedarf; im Sommer wird jedoch infolge der dann benötigten verstärkten Kühlung der Energiebedarf ansteigen (*EEA 2008*). Kältebedingte Krankheiten und Todesfälle werden verringert, hitzebedingte dagegen erhöhen sich (*IPCC 2007*).

Auch die mögliche Eisfreiheit im Nordmeer ermöglicht die Schifffahrt über die Nordwest-Passage und verkürzt den Seeweg z.B. nach Asien erheblich um bis zu 40 %. Außerdem könnten dann Bodenschätze wie Erdöl, Erdgas und Erze (Kupfer, Nickel u.a.) erschlossen werden. Andererseits kann dies wieder erhebliche ökologische Auswirkungen auf die dortige Natur haben.

Auf lange Sicht wird die Mehrzahl der Klimafolgen wahrscheinlich negativ sein. Faktoren, die einen direkten Einfluss auf die Gesundheit der Bevölkerung haben – wie z.B. das Bildungs- und Gesundheitswesen, die öffentliche Gesundheitsvorsorge sowie Infrastruktur und die wirtschaftliche Entwicklung – werden von entscheidender Bedeutung sein. Nach *IPCC 2007* bestehen bei den Modellrechnungen über die Auswirkungen der Klimaerwärmung noch viele Unsicherheiten.

## 9.9 Kosten – Ökonomische Auswirkungen

Über die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels gibt es große Unsicherheiten. *IPCC 2007* hat die Bandbreite der Kosten aus zahlreichen Studien zusammengestellt. Sie reichen von – 10 \$ bis + 350 \$/t Kohlenstoff. Der Mittelwert liegt bei 43 \$ mit einer Standardabweichung von 83 \$. pro t Kohlenstoff. *Kemfert 2004* hat anhand des globalen Simulationsmodells WIAGEM, das ein detailliertes Ökonomie- und Handelsmodell mit einem Klimamodell koppelt, die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels abgeschätzt. Neben direkten ökonomischen Auswirkungen auf die Energieerzeugung, die Landwirtschaft und die Industrie wurden hier zusätzlich Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökologie (z. B. die Zunahme von Waldbränden, Verluste an Artenvielfalt), aber auch gesundheitlich-ökonomische Aspekte (z. B. Krankheiten, Veränderung der Sterblichkeit) berücksichtigt. Bei einer Temperatursteigerung um ein 1° C können globale Schäden bis zu 214 Billionen US-Dollar über einen Zeitraum von 50 Jahren auftreten.

Die Höhe der Schäden hängt von den getroffenen Annahmen über die künftigen Entwicklungen ab, die mit hohen Unsicherheiten behaftet sind. So können diese Schäden bei optimistischer Betrachtung weitaus geringer, bei pessimistischer Sichtweise aber durchaus auch doppelt so hoch sein (*Kemfert 2004*).

## Kosten des Klimawandel

### Der Stern Report (London, Oktober 2006)

Sir Nicholas Stern, Ex-Chefökonom Weltbank  
(integrated assessment model, macro economic models)

Mitte des Jahrhunderts

- mind. **5%** des globalen **Bruttoinlandsprodukts** (derzeit 2,2 Billionen US\$ [2 200 000 000]).
- klimabedingte Katastrophen 0,5-1 Prozentpunkte (VwS Katrina ca. 1% US-BIP)
- „**non-market impacts**“ (Umwelt, Gesundheit, Permafrost) bis **20% BIP**
- Klimaschutzpolitik nur 1% globales BIP p. a.
- Handlungsfelder: Emissionshandel, Technische Kooperation, Maßnahmen gegen Abholzung sowie Adaption

Quelle:

STERN REVIEW: The Economics of Climate Change, Summary of conclusions, October 2006

Abb. 9.28: Kosten des Klimawandels nach Stern Report (Abb. aus *Loster 2007*).

Stern, ehemaliger Chefökonom der Weltbank, geht in seiner Studie (*Stern 2006*) davon aus, dass wir noch Zeit haben, die schlimmsten Auswirkungen einer Klimaveränderung zu vermeiden, wenn wir sofort zu handeln beginnen. Die Gesamtkosten der Schäden durch den Klimawandel könnten – ohne Aktionen - jährlich 5 % (bis im ungünstigsten Fall 20 %) des globalen Bruttosozialproduktes betragen (Abb. 9.28). Allein im Jahre 2050 wären dies Schäden in Höhe von weltweit 2 Billionen US-Dollar. Bei einem raschen Handeln zur Reduktion der Treibhausgase müsste global etwa 1 % jährlich des globalen Bruttosozialproduktes aufgewendet werden, um die schlimmsten Auswirkungen zu vermeiden. Die Studie hat bei einigen Ökonomen wie *Anthoff und Tol 2009* und *Nordhaus 2007* erhebliche Kritik hervorgerufen, da ihrer Ansicht nach die Werte (z.B. Diskontrate) viel zu hoch angesetzt sind.

*Tol 2009* stellt nach Auswertung von 14 Studien am 23.11.2009 in der FAZ fest, dass nach den mittleren Schätzungen die gesamten Auswirkungen des Klimawandels über ein Jahrhundert einem Verlust von 2,7 Prozent Einkommen (BIP) entsprechen werden. Die Auswirkungen von hundert Jahren Klimawandel seien also etwa so groß wie das Wirtschaftswachstum eines Jahres. Die Bandbreite reicht im „optimistischen Szenario“ von + 2,5 % bis – 13 % im „pessimistischen Szenario“ (Abb. 9.29).

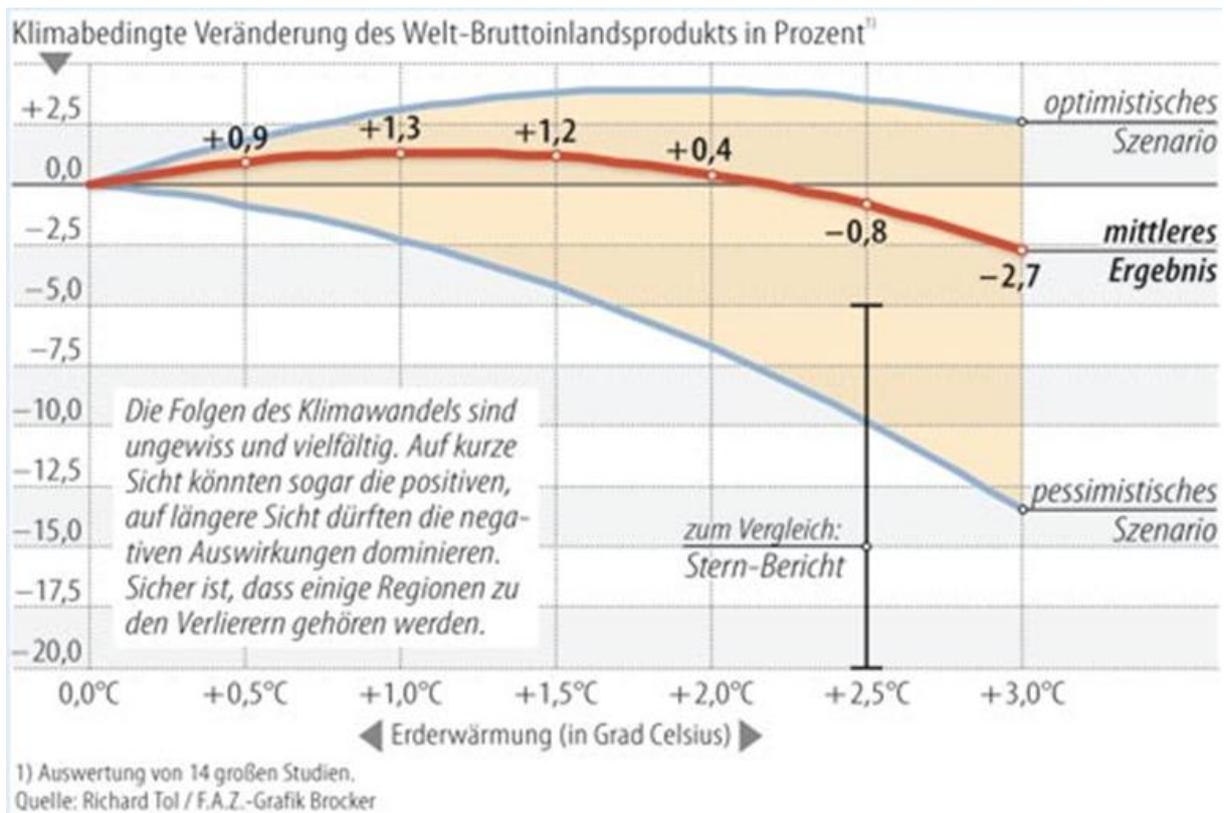


Abb.9.29 : Auswirkungen auf das Bruttosozialprodukt durch den Klimawandel nach Auswertung von 14 Studien (Tol 2009, FAZ)

Für das Jahr 2030 liegen nach *IPCC 2007* die Schätzungen der gesamtwirtschaftlichen Kosten für eine Multi-Treibhausgas - Emissionsminderung, die in Richtung Einhaltung des 2° C Ziels gehen, zwischen einer weltweiten BIP-Reduzierung von 3% und einem kleinen Zuwachs im Vergleich zum Referenzszenario. Regionale Kosten können sich jedoch signifikant von globalen Mittelwerten unterscheiden. Dies entspricht einer Verlangsamung des durchschnittlichen jährlichen weltweiten BIP-Zuwachses um weniger als 0,12 Prozentpunkte.

Die meisten Untersuchungen kommen zu dem Schluss, dass die BIP-Reduzierung im Vergleich zum BIP-Referenzwert mit der Strenge des Stabilisierungsziels ansteigt. Nach *IPCC 2007* werden bei einem Anstieg der mittleren globalen Temperatur um weniger als 1-3 °C über die Werte von 1980-1999 für einige Auswirkungen an manchen Orten und in manchen Sektoren Vorteile projiziert, während gleichzeitig an anderen Orten und in anderen Sektoren Kosten entstehen. Die mittleren globalen Verluste bei einer Erwärmung um 4 °C könnten 1-5% des BIP betragen, aber regionale Verluste könnten wesentlich höher sein.

*Parry 2009* hat in einer neuen Studie wesentlich höhere Kosten für die Anpassung an den Klimawandel als von UNFCCC und in andere Studien genannt wurde, errechnet, da u.a. in bisherigen Studien die Energie-, Tourismus-, Logistik - und Bergbauindustrie sowie Ökosysteme und verarbeitende Industrie nicht mit eingerechnet wurden. Die Zahl von zwischen 40 und 170 Milliarden \$ pro Jahr als Anpassungskosten an den Klimawandel bis 2030, wurden von dem Expertenteam auf das Zwei- bis Dreifache erhöht. Der größte Teil der Anpassungskosten betrifft wahrscheinlich arme Entwicklungsländer. So können *Parry 2009* bis zu 2/3 der jährlich 500 Milliarden \$ Kosten des globalen Klimawandels in armen Ländern anfallen, die diesen so gut wie gar nicht zu verantworten haben.

**Fazit:** Offensichtlich sind sich die Fachleute über die Höhe der Kosten nicht einig, was angesichts der vielen Unsicherheiten und Bandbreiten der zu erwartenden Auswirkungen nicht verwunderlich ist. Auch die Europäische Energieagentur *EEA 2008* geht davon aus, dass es keine einzelne „wahre“ Kostenabschätzung geben wird, da die Bandbreite, was als Klimafolgeschäden zu betrachten ist und wie sie zu bewerten sind, sehr groß ist.

## 10 Emissionen aus Energieumwandlung und Energietransport

Bei der Energieumwandlung und in geringem Umfang beim Energietransport entstehen zwangsläufig klimarelevante Gase. Der Energiesektor (Energiewirtschaft, Industrie und Verkehr) leistet in den Industriestaaten (Annex I Länder) mit 83 % (WEO 2009) den größten Beitrag zur Treibhausgasemission. Innerhalb der EU-27 trägt der Energiesektor mit ca. 80 % (2008) zur Emission der Treibhausgase bei (EEA 2010).

Weltweit ist die Energiewirtschaft für 25,9 % der Treibhausgasemissionen (2004) verantwortlich (IPCC 2007). 2008 war in der EU-27 die öffentliche Strom- und Wärmeversorgung für 26,9 % der Treibhausgas-Emissionen (in der EU-15 2008 zu 29 %) verantwortlich (EEA 2010). Die Energiewirtschaft in Deutschland verursacht etwa 37 % der deutschen Treibhausgasemissionen (davon 88 % CO<sub>2</sub>) und ist deswegen bei der Diskussion über Minderungsmöglichkeiten besonders gefordert. Abbildung 10.1 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der EU-15 und EU-27. Nach Angaben der Europäischen Umweltagentur (EEA) hat die EU-27 ihre Treibhausgasemissionen 1990 – 2008 um 11,3 % reduziert und die EU-15 – insbesondere durch die deutlichen Rückgänge in Deutschland und Großbritannien - um 6,5 %. (Abb. 10.1), sowie der Energiesektor um 8 % (EEA 2010).

2008 lagen die Gesamtemissionen der Industrieländer, die Mitglieder des Kyoto-Protokolls sind (Annex II-Länder ohne USA), um 15,9 % unter dem Wert von 1990. Verursacht ist dies hauptsächlich durch den starken Rückgang in Mittel- und Osteuropa um ca. 36 % infolge des wirtschaftlichen Umbruchs in den 90er Jahren und der anschließenden Modernisierung der Industrieanlagen. In den USA sind die Treibhausgasemissionen 1990 – 2008 um 14 % gestiegen, jedoch gegenüber 2007 um 2,9 % gefallen (www.epa.gov).

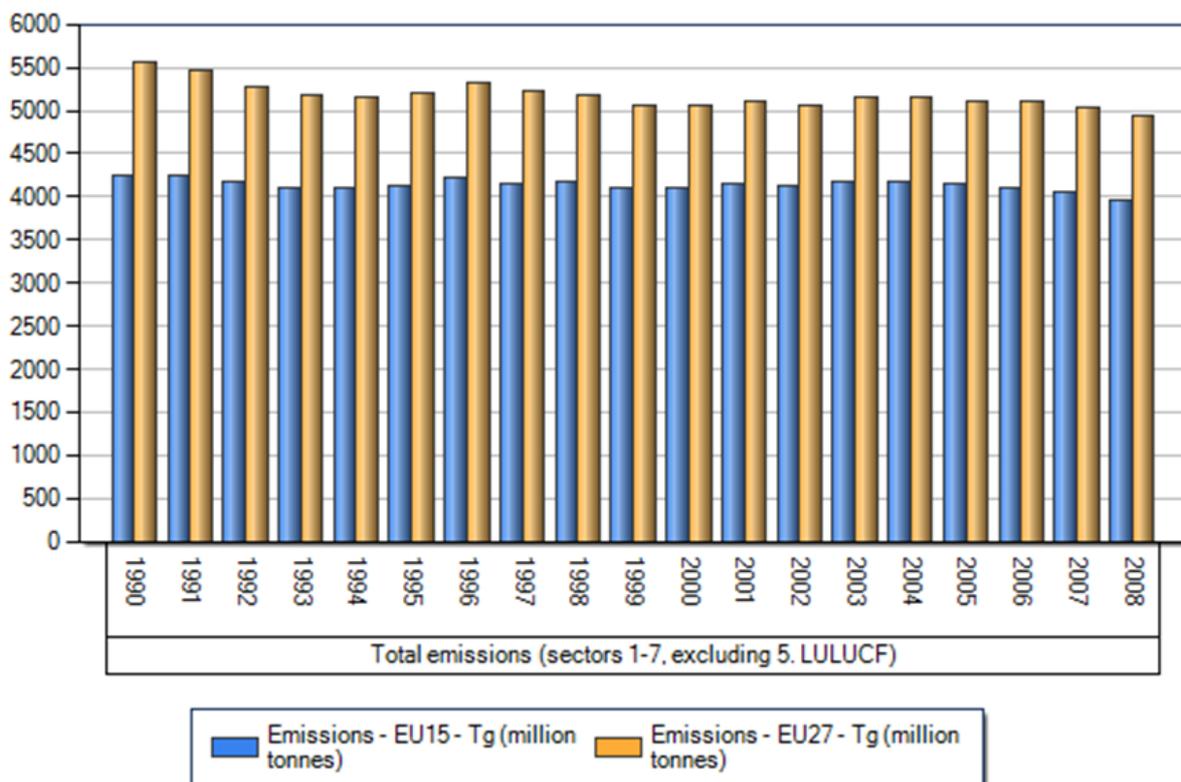


Abb. 10.1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der EU-15 und EU-27 1990 – 2008 in Mio. t CO<sub>2</sub> eq  
<http://dataservice.eea.europa.eu/PivotApp/pivot.aspx?pivotid=475>

Nach EEA/7 2010 hat die EU-27 ihre Treibhausgasemissionen 2009 um 6,9 % gegenüber 2008 reduziert und lag 17,3 % unter dem Wert von 1990. Das EU Ziel einer 20 % Minderung bis 2020 war also 2009 beinahe erreicht. Die EU-15, die gemeinsam ein Kyoto Ziel von – 8 % für die Periode 2008 – 2012 hat, lag 2009 mit 12,9 % zum ersten Mal darunter. Ursache hierfür war der starke Rückgang der Treibhausgasemissionen infolge der ökonomischen Krise um 6,9 % zwischen 2008 und 2009 (EEA/7 2010).

Abbildung 10.2 zeigt den Rückgang der Emissionen der sechs im Kyoto-Protokoll festgelegten Treibhausgase in Deutschland für die Jahre 1990 – 2009. Das Kyoto-Ziel von 974 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente wurde demnach bereits 2007 mit 958 Mio. t deutlich unterschritten (UBA 2010). 2009 ist insbesondere infolge der Finanzkrise ein weiterer starker Rückgang um 8,4 % der Treibhausgasemissionen auf 878 Mio. t erfolgt. Damit hat Deutschland 2009 seine Emissionen gegenüber 1990 um 29 % reduziert

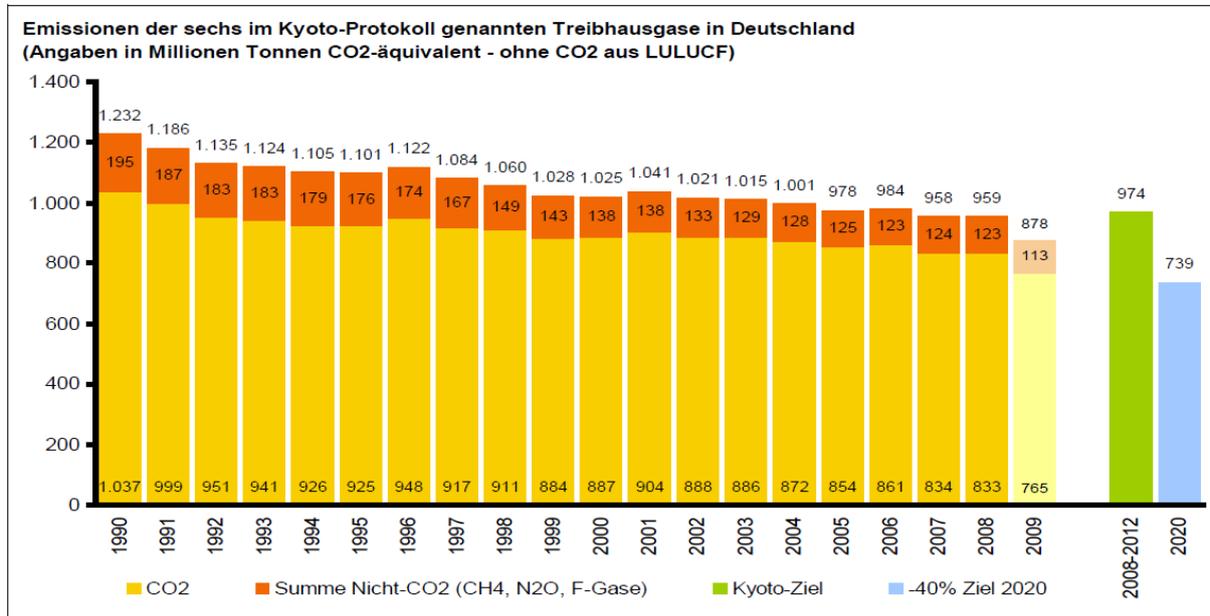


Abb. 10.2: Rückgang der Treibhausgasemissionen in Deutschland in Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten 1990 -2009  
2009 waren es noch 878 Mio. t, also 29 % niedriger als 1990 (UBA 2010)

## 10.1 Emissionen von Wasserdampf, Abwärme

Der größte Beitrag zur anthropogen verursachten Wasserdampfemission dürfte die künstliche Bewässerung sein (IPCC 2007). Jedoch wird durch die Abholzung wiederum der Wasserdampffluss deutlich verringert, der um das Mehrfache größer sein dürfte. Neben der dadurch verursachten Änderung des Strahlungsantriebs spielt jedoch auch der Kühleffekt durch die Verdunstung eine Rolle. Wegen der vielen Unsicherheiten wird der anthropogene Beitrag in den Modellrechnungen nicht berücksichtigt. Der Beitrag durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe ist nach IPCC 2007 signifikant geringer als die Emission durch die Landnutzungsänderungen.

Grundsätzlich trägt die Energiewirtschaft – wenn auch im geringen Maße - zur Wasserdampfemission bei. So werden nach Zittel 1994 zur Erzeugung von 1 kWh Wärmeenergie bei der Verbrennung von Kohle ca. 60 g Wasser, bei Öl 115 g und bei Gas 162 g H<sub>2</sub>O freigesetzt. Auch beim Betrieb von Kühltürmen fallen Wasserdampfemissionen an. Zittel rechnet mit einem Mittelwert von 1,5 kg pro kWh (el).

Hinsichtlich der absoluten Mengen an Wasserdampfemissionen aus Deutschland wurde von Zittel 1994 folgende Abschätzung vorgenommen:

Bei einer mittleren jährlichen Niederschlagshöhe von rund 780 mm und einer Fläche von ca. 360.000 km<sup>2</sup> beträgt das Niederschlagsvolumen rund 280 Mrd. t. Die natürliche Wasserdampfemission pro km<sup>2</sup> und Jahr beträgt etwa 0,35 x 10<sup>6</sup> t. Das sind, bezogen auf die Gesamtfläche, rund 125 000 x 10<sup>6</sup> t Wasserdampf/Jahr. Ermittelt wurde dies unter der Randbedingung, dass von der gesamten Niederschlagsmenge ca. 50 % verdunsten und die restlichen 50 % über das Grund- und Oberflächenwasser zum Meer abfließen.

Stellt man dieser von der Oberfläche Deutschlands ausgehenden jährlichen Wasserdampf-Verdunstungsmenge die Wasserdampfemissionen der gesamten deutschen Industrie einschließlich der Kraftwerke mit ihren Kühltürmen gegenüber, so ergibt sich ein industrieller Anteil von weniger als 1 %. Weltweit gesehen, ist aufgrund der enormen Menge an natürli-

cher Verdunstung insbesondere der Ozeane der anthropogene Anteil vernachlässigbar (0,005 %).

Zum Beitrag der anthropogenen erzeugten Abwärme am globalen Energiehaushalt stellt *Graßl 2004* fest: „Für die Abwärme, die offensichtlichste Störung des Energiehaushaltes durch den Industriemenschen, ist die Abschätzung einfach. Bei durchschnittlich 2 kW Leistung, die pro Kopf zur Zeit etwa eingesetzt werden, ist die daraus resultierende Energieflussdichte von  $0,025 \text{ W/m}^2$  im globalen Maßstab gegenüber dem Angebot der Sonne an der Erdoberfläche in Höhe von etwa  $170 \text{ W/m}^2$  sicherlich zu vernachlässigen“. (Anmerkung des Verfassers: Der oben genannte Wert von 2 kW Leistung ergibt sich aus dem weltweiten durchschnittlichen Energieverbrauch von 17 500 kWh pro Kopf und Jahr). Lokal spielt die anthropogen erzeugte Abwärme in Ballungsgebieten (s. auch Kap. 6.1.6) eine erhebliche Rolle, global ist sie aber zu vernachlässigen (*IPCC 2007*). Nach *Flanner 2009, Trenberth 2009* liegt die global gemittelte Energiefreisetzung durch menschliche Tätigkeit mit  $+0,028 \text{ W/m}^2$  bei 0,01 % des gesamten Energieflusses im Klimasystem. Über USA und Westeuropa beträgt sie jedoch  $+0,39$  und  $+0,68 \text{ W/m}^2$ .

## 10.2 Emissionen von Kohlendioxid

Die Kohlendioxidemission hat sich vor allem aufgrund der Verbrennung fossiler Brennstoffe seit Beginn der Industrialisierung nahezu ständig erhöht. Die Abbildung 10.3 zeigt den Anstieg der Kohlenstoffemission seit 1850 durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl, Gas) und die Beiträge durch Gasfackeln und Zementproduktion. Seit 1750 wurden hierdurch insgesamt etwa 300 Mrd. t Kohlenstoff in die Atmosphäre freigesetzt, die Hälfte davon ab Mitte der 70er Jahre. Global ist die Verbrennung von festen (38,7 %) und flüssigen Brennstoffen für 37,8 % der Emissionen und die von Gas für 18,5 % (2006) verantwortlich. Die Zementproduktion emittiert ca. 4,2 % und Gasfackeln weniger als 1 % (Abb. 10.3) (*Marland 2008*). Die öffentliche Strom- und Wärmeversorgung ist global für ca. 41 % der  $\text{CO}_2$  Emissionen verantwortlich (*WEO 2009*). Rund 70 % der weltweiten Strom- und Wärmeerzeugung erfolgt durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe

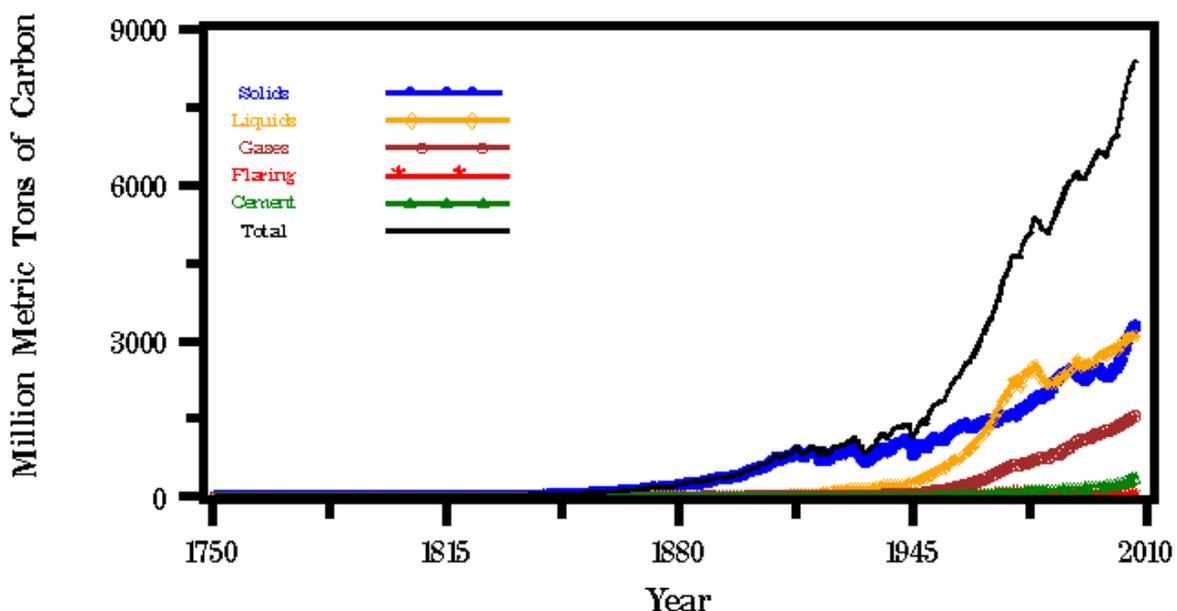


Abb. 10.3 : Entwicklung der globalen Kohlenstoffemissionen 1751 – 2007 aus festen, flüssigen und gasförmigen Brennstoffen sowie durch Abfackeln (Flaring) und Zementherstellung (<http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/glo.html>)

Im Zeitraum 1960 bis 2008 hat sich die weltweite energiebedingte Kohlenstoffemission mehr als verdreifacht und beträgt heute ca. 8,25 Mrd. Tonnen (ca. 30,2 Mrd. t  $\text{CO}_2$ ) (*Ziesing 2009*) jährlich. Im Zeitraum 1990 – 2008 sind die weltweiten energiebedingten  $\text{CO}_2$ -Emissionen um 37 % von 22 Mrd. t auf 30,2 Mrd. t gestiegen. Während die EU-27 einen Rückgang von 5,8 % (-254 Mio. t) zu verzeichnen hatte, ist in USA die  $\text{CO}_2$ -Emission um 16,6 % (+840 Mio. t)

gestiegen, jedoch gegenüber 2007 um 3,3 % zurückgegangen (www.epa.gov), in China um 189 % (+4272 Mio. t) und in Indien um 146 % (+860 Mio. t) gestiegen (Ziesing 2009). Die Kohlendioxidemissionen der Industriestaaten (Annex I Länder) haben sich 2008 gegenüber 1990 mit 14,8 Mrd. t geringfügig um etwa 1 % vermindert. Die Verminderung der Industriestaaten, die das Kyoto-Protokoll ratifiziert haben (Annex B ohne USA, das nicht dem Kyoto-Protokoll beigetreten ist), beträgt sogar ca. 11 %. Dagegen haben sich die Emissionen der Entwicklungsländer und Schwellenländer (Nicht Annex I Länder) deutlich um 117 % erhöht. Insbesondere China hatte 1990 – 2008 mit + 189 % auf einen Emissionswert von 6,5 Mrd. t einen großen Sprung nach vorne gemacht. Die Nicht-Annex I Staaten haben inzwischen mit einer Kohlendioxidemission von 15,4 Mrd. t einen Anteil an den weltweiten energiebedingten Kohlendioxidemissionen von über 50 % (Ziesing 2009).

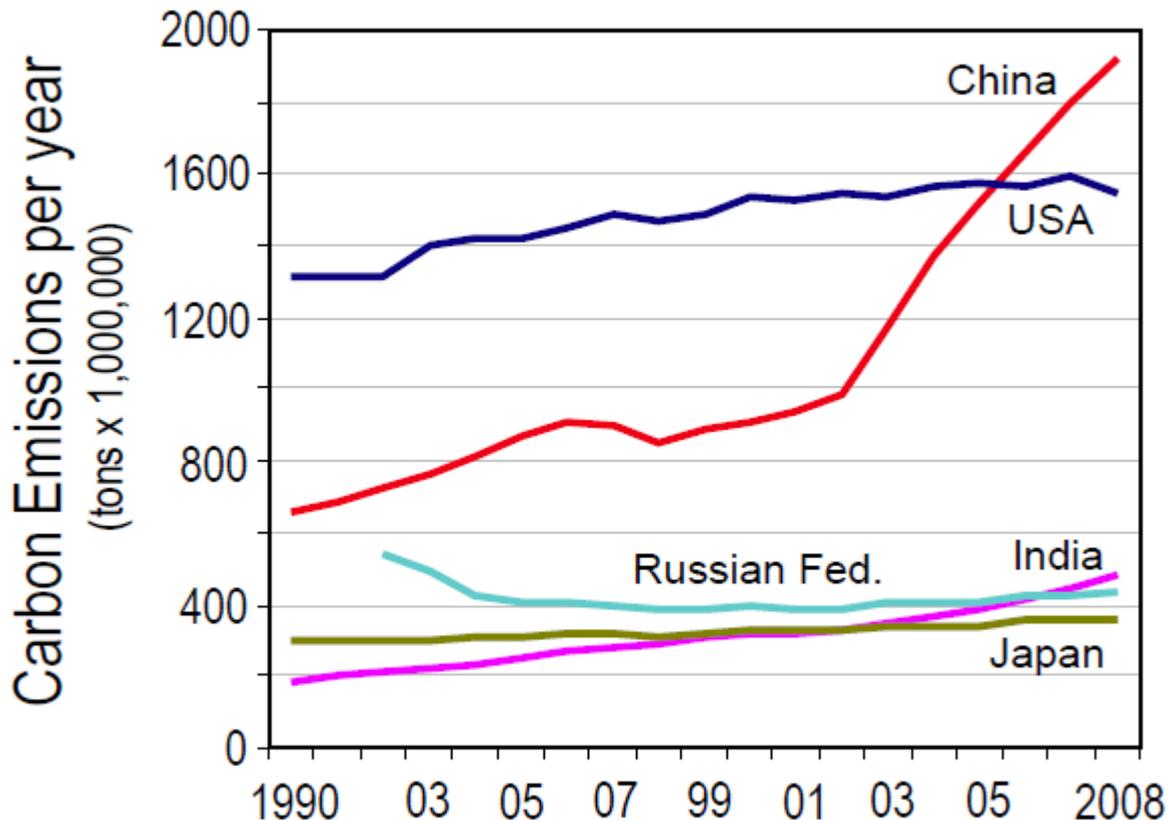


Abb. 10.4: Kohlenstoffemission aus Verbrennung fossiler Brennstoffe 1990 – 2008 der Hauptemittenten (Anteil > 4 % der Gesamtemission), Global Carbon Project 2009; Data: Gregg Marland, CDIAC 2009, ([http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/08/files/GCP2009\\_CarbonBudget2008.pdf](http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/08/files/GCP2009_CarbonBudget2008.pdf))

China hat 2008 die USA überholt und war der größte Kohlendioxid-Emittent (21,7 %), gefolgt von USA (19,6 %), der EU-27 (13,8 %), Russland (5,3 %), Indien (4,8 %) und Japan (4,3 %) und Deutschland 2,8 % (Ziesing 2009) (Abb. 10.4). Die 36 Staaten mit quantifizierten Reduktionsverpflichtungen, die das Kyoto-Protokoll ratifiziert haben, sind heute für weniger als 30 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich (Ziesing 2009).

Bei der pro Kopf Emission steht aber weiterhin USA mit 19,5 t CO<sub>2</sub> pro Einwohner großem Abstand an der Spitze (Abb. 10.5). Deutschland liegt mit 10 Tonnen im Mittelfeld, China emittiert inzwischen 4,9 Tonnen und Indien 1,2 Tonnen Kohlendioxid pro Einwohner.

Die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen sind im Jahr 2009 erstmals in diesem Jahrzehnt leicht zurückgegangen. Nach IWR 2010 (<http://www.iwrpressdienst.de/Textausgabe.php?id=3497>) wurden 2009 weltweit 31,1 Milliarden t Kohlendioxid emittiert (2008: 31,5 Mrd.), das sind 400 Millionen t bzw. 1,3 Prozent weniger als im Rekordjahr 2008. Die Rückgänge beim CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Europa, den USA, Russland und Japan wurden durch deutliche Zuwächse in den asiatischen Ländern und den Staaten im Nahen Osten nahezu kompensiert. Der energiebedingte CO<sub>2</sub>-Ausstoß in China ist 2009 auf Grund des Wirtschaftswachstums mittlerweile so hoch wie der in den USA und Russland zusammen genommen. China führt das CO<sub>2</sub>-Ranking mit 7,43 Mrd. t (2008: 6,8 Mrd.) deutlich vor den USA mit 5,95 Mrd. t (2008: 6,4 Mrd.) an. Auf Platz drei folgt Russland mit 1,53 Mrd. t (2008: 1,7 Mrd.) knapp vor Indien mit 1,53

Mrd. t (2008: 1,4 Mrd.) sowie Japan mit 1,23 Mrd. t (2008: 1,4 Mrd.). Nach *Myhre 2010* haben USA und Europa die CO<sub>2</sub>-Emissionen 2009 gegenüber 2008 um je 7 % reduziert, während in China und Indien einen Zuwachs um 9 % bzw. 6 % zu verzeichnen hatten. Der Anteil Deutschlands an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen lag 2009 noch bei 2,6 %.

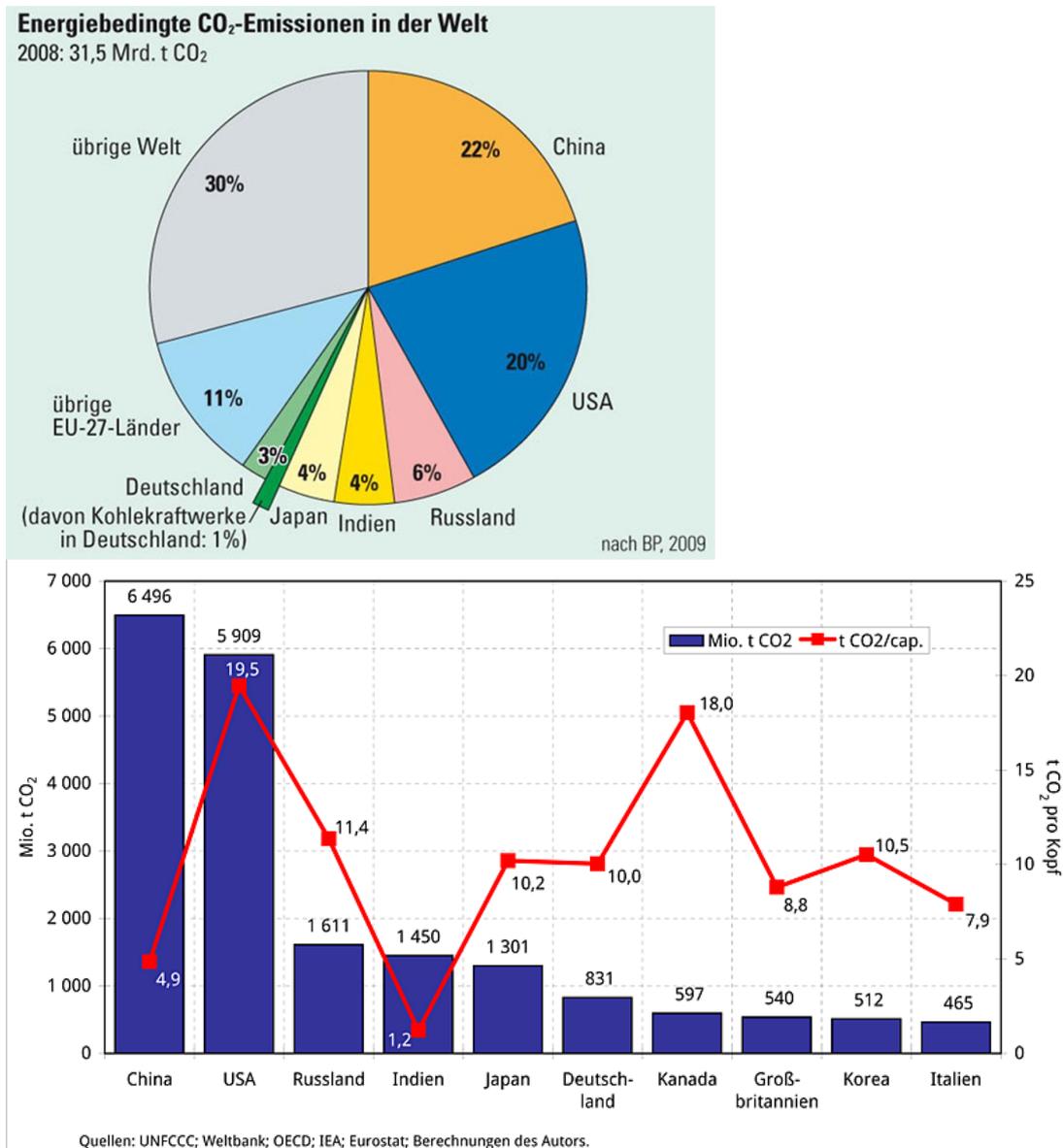


Abb. 10.5: oben: energiebedingte Kohlendioxidemission in der Welt (GVST),  
unten: Rangfolge der 10 größten CO<sub>2</sub>-Emittentenländer und deren pro Kopf-Emission 2008 (*Ziesing 2009*)

Kohlendioxid ist in der EU für über 80 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich, gefolgt von Methan, Distickstoffoxid und den Fluor-haltigen Treibhausgasen.

Der Anstieg der Kohlendioxidemission wird sich gegenüber 1990 nach Berechnungen mit Energieszenarios der *EIA 2010* bis 2035 auf über 40 Mrd. t nahezu verdoppeln (Abb. 10.6). Den größten Anteil werden die Entwicklungsländer mit einem Zuwachs von 2/3 haben (*World Energy Outlook, WEO 2009*).

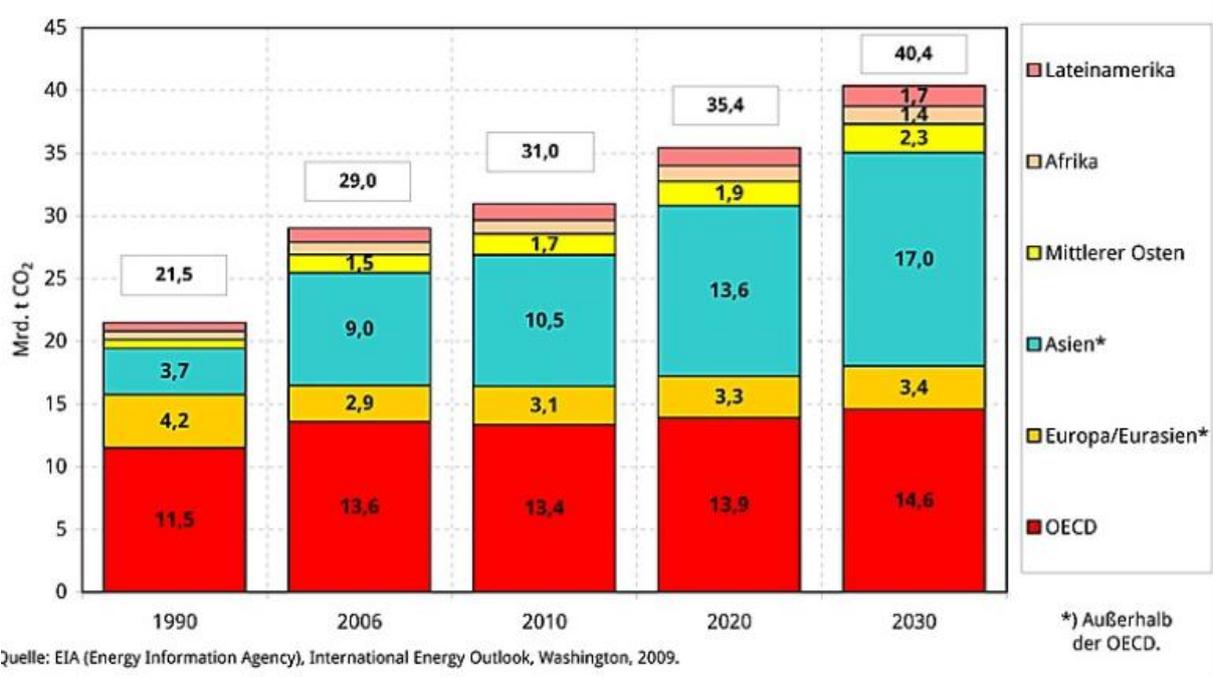


Abb. 10.6: Entwicklung der weltweiten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen 1990 – 2030 nach Regionen im Referenzfall der EIA (Ziesing 2009)

Die Abbildungen 10.6 und 10.7 zeigen deutlich, dass heute die Hauptzuwachsrate bei der Kohlendioxidemission in Asien liegen. Auch USA, das nicht dem Kyoto-Protokoll beigetreten ist, hatte noch einen Anstieg 1990 – 2008 von 17 % zu verzeichnen.

	1990	1995	2000	2008	1990 – 2008
	CO <sub>2</sub> -Emissionen in Mio. t				Veränderungen in %
USA	5068,6	5399,8	5946,4	5909,3	+16,6
Japan	1143,2	1226,6	1254,6	1301,1	+13,8
China	2244,0	3021,8	3077,6	6496,2	+189,5
Indien	589,3	782,6	978,5	1449,6	+146,0
Lateinamerika	603,1	722,3	859,8	1058,0	+77,1
Annex-II-Länder (1)	10417,4	10821,6	11590,1	11664,3	+12,0
Welt (2)	22010,5	22517,7	24119,9	30178,0	+37,1
Annex-I-Länder (3)	14930,1	13883,1	14382,2	14788,6	-0,9
Nicht-Annex-I- Länder (4)	7080,3	8634,6	9731,6	15389,4	+117,4
Annex-B-Länder (5)	9721,9	8311,5	8218,0	8559,2	-11,9
Annex-I- Economies in Transition (EIT) (6)	4323,2	2889,7	2574,4	2814,2	-35,6

- (1) Annex II-Länder: Alle sog. Industriestaaten, d.h. alle OECD-Länder (Stand 1992) mit Ausnahme von Südkorea, Mexiko, Polen, der Tschechischen Republik, Ungarn und der Slowakischen Republik  
(2) Welt: einschließlich Hochseebunker und internationaler Luftverkehr  
(3) Annex I-Länder: OECD-Länder und Transformationsländer ohne Südkorea, Mexiko sowie ohne USA (da nicht Kyoto-Protokoll unterschrieben)  
(4) Nicht-Annex I-Länder: im Wesentlichen Entwicklungs- und Schwellenländer  
(5) Annex-B-Länder: 39 Industriestaaten und Transformationsländer mit Reduktionsverpflichtungen nach Kyoto-Protokoll  
(6) Annex-I-Economies in Transition (EIT): Transformationsländer (Russland, Ukraine, Weißrussland und ehemalige Ostblockstaaten)

Abb. 10.7: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1990 bis 2008 in ausgewählten Ländern und Regionen und prozentualer Anteil der Veränderung, (Ziesing 2009)

Der Anteil Deutschlands an den weltweit energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen ist im Zeitraum 1990 bis 2009 von 4,5 auf ca. 2,6 % gesunken. Im gleichen Zeitraum ist der Anteil der Emissionen der USA um rund 9 % gestiegen; doch 2009 gegenüber 2008 um 7 % gefallen. Vergleicht man die Entwicklung in den einzelnen EU-15-Mitgliedstaaten, so hat Deutschland in den neunziger Jahren den mit Abstand größten absoluten Beitrag zur Minderung der Klimagase geleistet.

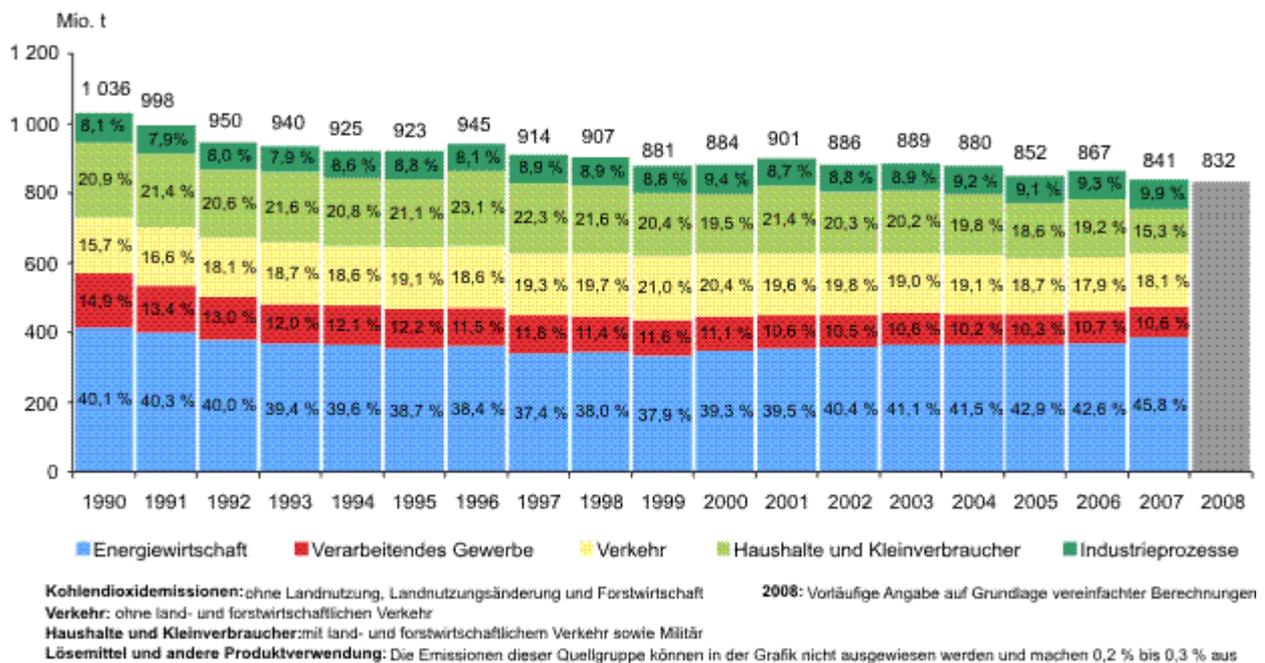
Die sektorale Entwicklung gibt nach der vorläufigen Fortschreibung des Nationalen Inventarberichtes 2009 (*NIR 2010*) für Deutschland 1990 – 2008 und *UBA 2010* folgendes Bild (Abb. 10.8): In Deutschland wurde von 1990 bis 2009 die Kohlendioxidemission um ca. 25 % von 1021 Mio. t auf 765 Mio. t vermindert. Die Energiewirtschaft hat ihre Emission von 409 Mio. t auf 327 Mio. t um ca. 20 % reduziert (Abb. 10.8, leicht korrigierte Zahlen gegenüber Abb. 10.9). Die in den Kraftwerken eingesetzte Rauchgasentschwefelung mit Kalkstein als SO<sub>2</sub>-Absorber verursacht eine CO<sub>2</sub>-Emission von ca. 1,6 Mio. t jährlich (*NIR 2006*).

CO <sub>2</sub> -Emissionen	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2009
Energie-wirtschaft	408,7	351,7	340,1	345,7	352,8	358,8	355,1	327
Industrie	233,8	186,5	172,6	167,4	165,2	167,8	171,4	132
Verkehr	162,4	176,6	182,3	178,3	176,2	170,2	171,1	152
Haushalte	129,4	129,2	116,8	131,2	120,1	122,4	115,6	106
Gewerbe	86,7	65,2	56,1	59,1	56,2	57,6	55,0	46
Gesamt-emission*)	1021,1	909,1	868,0	881,8	870,4	876,9	868,3	765

\*) Differenzen in der Summe liegen in den jeweiligen Rundungen begründet

Abb. 10.8: Sektorale Entwicklung der gesamten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emission in Deutschland 1990 – 2009 in Mio. t (Quelle: NIR 2010, UBA, Presseinformation 13/2010)

#### Emissionen von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) nach Quellkategorien



Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990-2007 (Endstand 12.11.2008) und Presseinformation 16/2009 vom 29.03.2009

Abb. 10.9: Entwicklung der Kohlendioxidemission 1990 – 2008 in Deutschland nach Verbrauchergruppen (UBA 2009)

### 10.3 Emissionen von Methan

Abbildung 10.10 zeigt die Entwicklung der globalen anthropogenen Methan-Emissionen 1860 – 1994. Insbesondere die gestiegene Rinderhaltung und der Reisanbau sowie der Kohleabbau, Deponien, Gasversorgung und Biomasseverbrennung haben zu einem Anstieg der Methanemission in der Vergangenheit beigetragen (s. Kap.5.1.3)

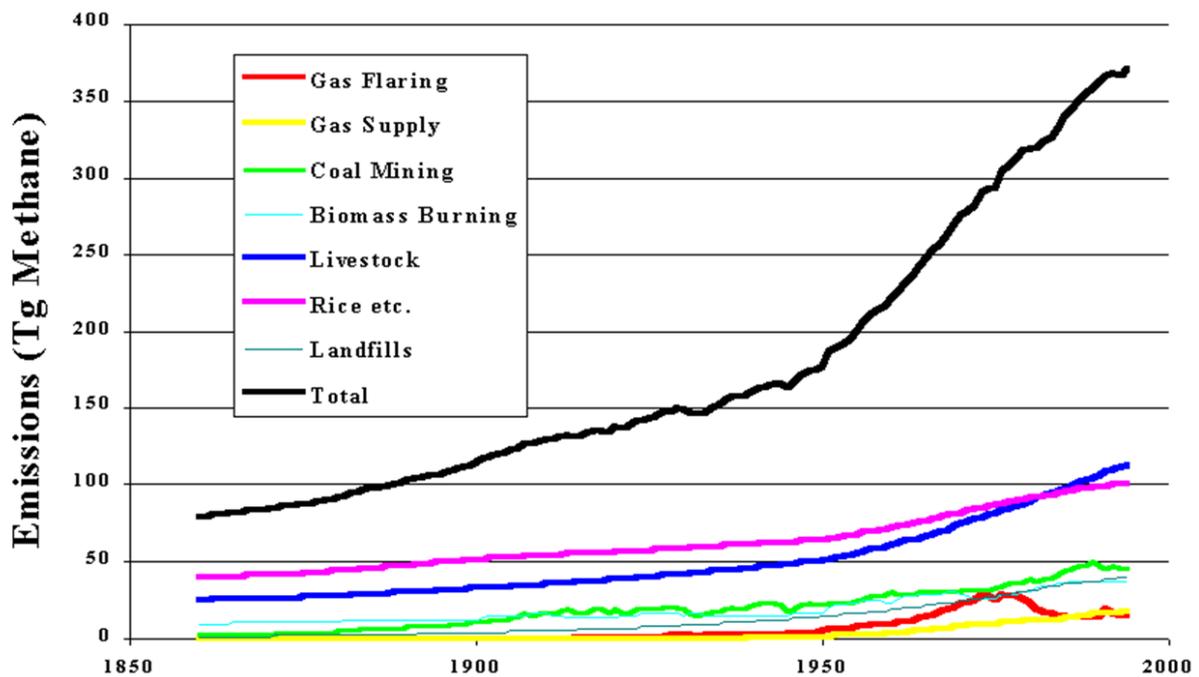


Abb. 10.10: Anstieg der Methanemissionen in Mio. t (Tg) 1860 - 1994 (Quelle: [www.cdiac.esd.ornl.gov/](http://www.cdiac.esd.ornl.gov/))

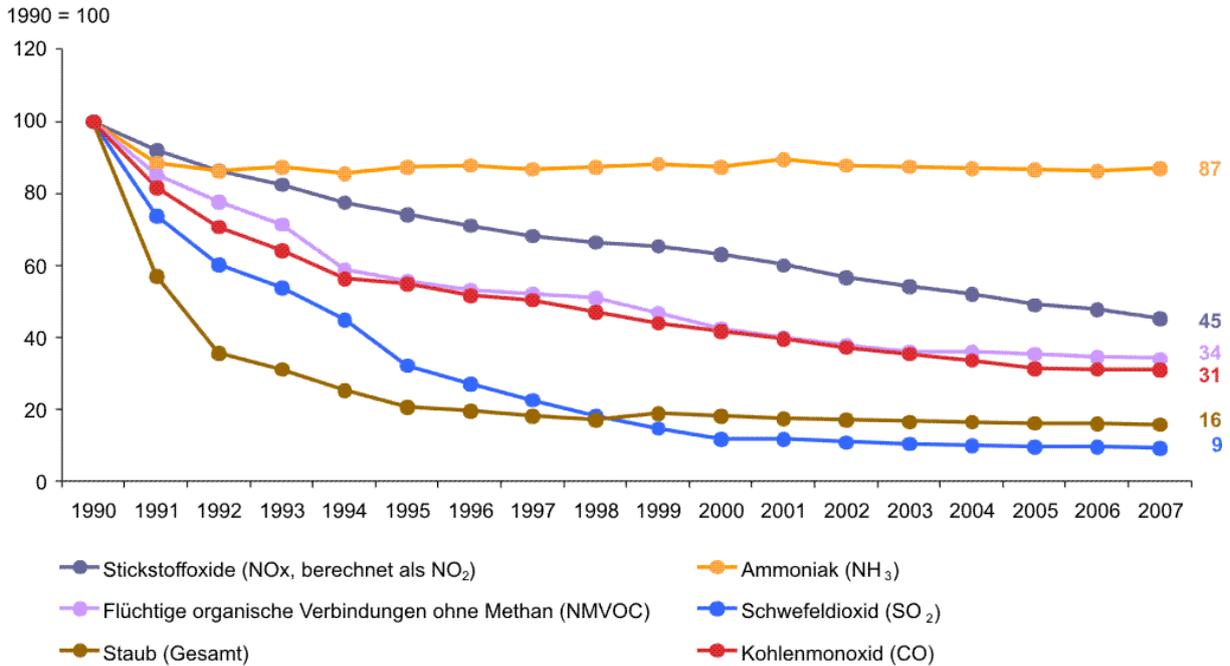
Methan ist Hauptbestandteil von Erdgas, Deponiegas, Biogas und Klärgas. Methan wird auch von Ölquellen emittiert (Gas Flaring) und beim Transport von Erdgas (Gas Supply) (Abb.10.10). Weltweit hat nach *Cofala 2006* die anthropogene Methanemission - vor allem in Asien und Afrika - von 1990 – 2000 um 16 % von 290 Mio. t auf 335 Mio. t zugenommen. Die EU 27 hat von 1990 – 2008 ihre Methanemissionen von 28,4 auf 19,7 Mio. t (598 auf 413 Mio. t CO<sub>2</sub> Äquiv.) um ca. 30 % vermindert (*EEA 2010*).

In Deutschland hat sich die Methanemission von 1990 bis 2008 um 54 % von 4,9 Mio. t auf 2,3 Mio. t verringert (*NIR 2010*). Den Hauptanteil hat die Landwirtschaft mit über 50 %. Der Kraftwerksanteil beträgt 6000 t (0,25 %) ([www.umweltbundesamt.de/emissionen/](http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/), Stand 12.11.08).

#### 10.4 Emissionen von Distickstoffoxid

Die globale N<sub>2</sub>O-Emission aus stationären Verbrennungsanlagen wird für 2000 auf 213 000 t geschätzt (*EPA 2001*) und beträgt damit etwa 7 % der Gesamtemission der Industriestaaten. In der EU-27 hat sich die N<sub>2</sub>O-Emission im Zeitraum 1990 bis 2008 um 27 % von 1,67 auf 1,02 Mio. t (518 auf 364 Mio. t. CO<sub>2</sub> Äquiv.) verringert (*EEA 2010*). Der Beitrag der öffentlichen Strom- und Wärmewirtschaft wird von der *EEA 2006* mit 4 % angegeben. Die Entwicklung der Distickstoffoxidemissionen in Deutschland 1990 -2008 zeigt einen Rückgang von 258 000 t auf 189 000 t um fast 25 % (*NIR 2010*). Der Kraft- und Fernheizwerksanteil liegt mit 12 500 t bei ca. 8 % ([www.umweltbundesamt.de/emissionen/](http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/), Stand 12.11.08).

### Entwicklung der Emissionen ausgewählter "klassischer" Luftschadstoffe seit 1990



**Quelle:** Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen, Emissionsentwicklung 1990-2007 (Endstand 20.02.2009), <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm>

Abb. 10.11: Entwicklung der Emission 1990 – 2007 der „klassischen“ Luftschadstoffe (<http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeId=2359>).

## 10.5 Emissionen von Ozon

Ozon wird nicht direkt emittiert, sondern bildet sich in der Troposphäre im Wesentlichen durch Reaktion mit Stickoxiden, Methan, Kohlenmonoxid und flüchtigen organischen Verbindungen (NMVOC). Diese Stoffe sind in den vergangenen Jahren in Deutschland stark reduziert worden.

## 10.6 Emissionen von Stickoxid

Nach *Cofala 2006*, *WEO 2009* blieb die globale NO<sub>2</sub>-Emission im Zeitraum 1990 – 2007 mit 81 Mio. t in etwa konstant; rund 1/4 stammt aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Die deutlichen Reduktionen in Europa und Nordamerika wurden durch Zuwächse in Asien wieder ausgeglichen (*Isaksen 2009*, Abb. 5.19). In der EU-27 gingen die NO<sub>x</sub>-Emissionen im Zeitraum 1990 – 2008 um ca. 40 % von 17,2 Mio. t auf 10,4 Mio. t zurück (*EEA/LRTAP 2010*). Die Energieversorgung hatte 2008 einen Anteil von ca. 20 % und der Verkehr von knapp 40 %.

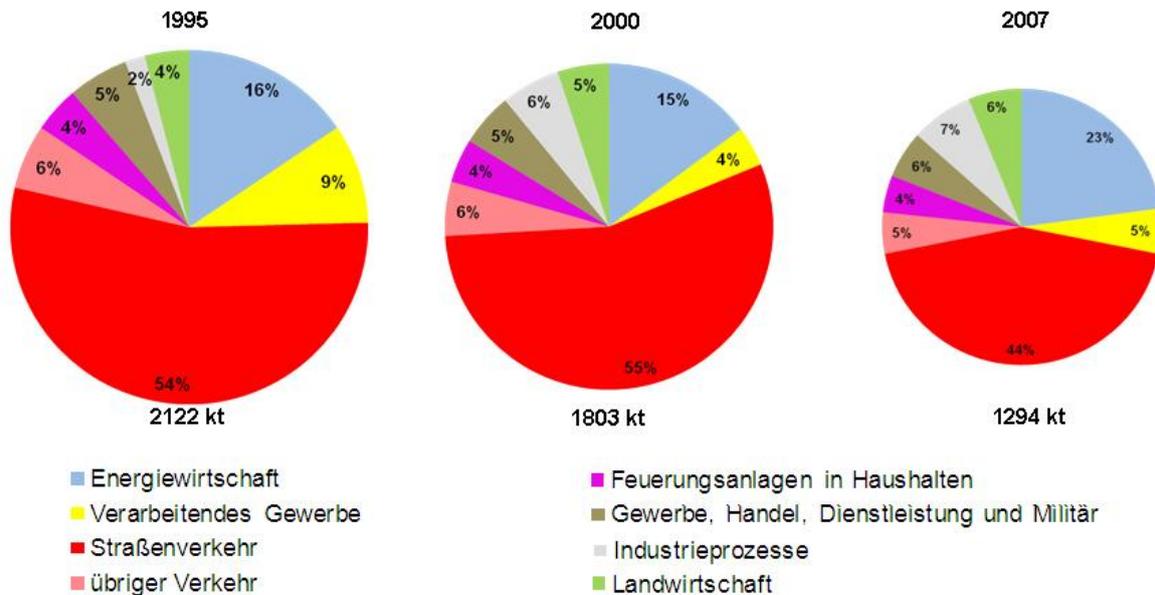


Abb. 10.12: Prozentualer Anteil der Verursachergruppen an den  $\text{NO}_x$ -Emissionen in Deutschland in den Jahren 1995, 2000 und 2007. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3760.pdf>

Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen wurden in Deutschland im Zeitraum 1990 – 2008 von 2,9 Mio. t auf 1,4 Mio. t um 52 % vermindert (*NIR 2010*). Bereits seit den 80er Jahren mindert die deutsche Energiewirtschaft ihre Stickstoffoxid-Emissionen sehr stark. Der Kraftwerksanteil betrug 2008 mit 276 kt noch ca. 23 % (Verkehr ca. 46 %) ([www.umweltbundesamt.de/emissionen/](http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/), Stand 2010). Die Abb. 10.12 zeigt die Werte nach Verursachergruppen 1995 - 2007.

### 10.7 Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC)

Nach *IPCC 2001* wurden Mitte der 80er Jahre ca. 236 Mio. t VOC (als C gerechnet) emittiert. Der anthropogene Anteil liegt bei ca. 40 %. In der EU-27 gingen die NMVOC-Emissionen im Zeitraum 1990 – 2008 um die Hälfte von 16,8 Mio. t auf 8,3 Mio. t zurück (*EEA/LRTAP 2010*). In Deutschland gingen im Zeitraum 1990 – 2008 die NMVOC-Emissionen um 2/3 von 3,74 Mio. t auf 1,27 Mio. t zurück (*NIR 2010*). Den Hauptanteil hat heute die Lösemittelverwendung mit ca. 56 %. Der Kraft- und Fernheizwerksanteil ist mit 14 kt (1,1 %) sehr gering ([www.umweltbundesamt.de/emissionen/](http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/), Stand 2010).

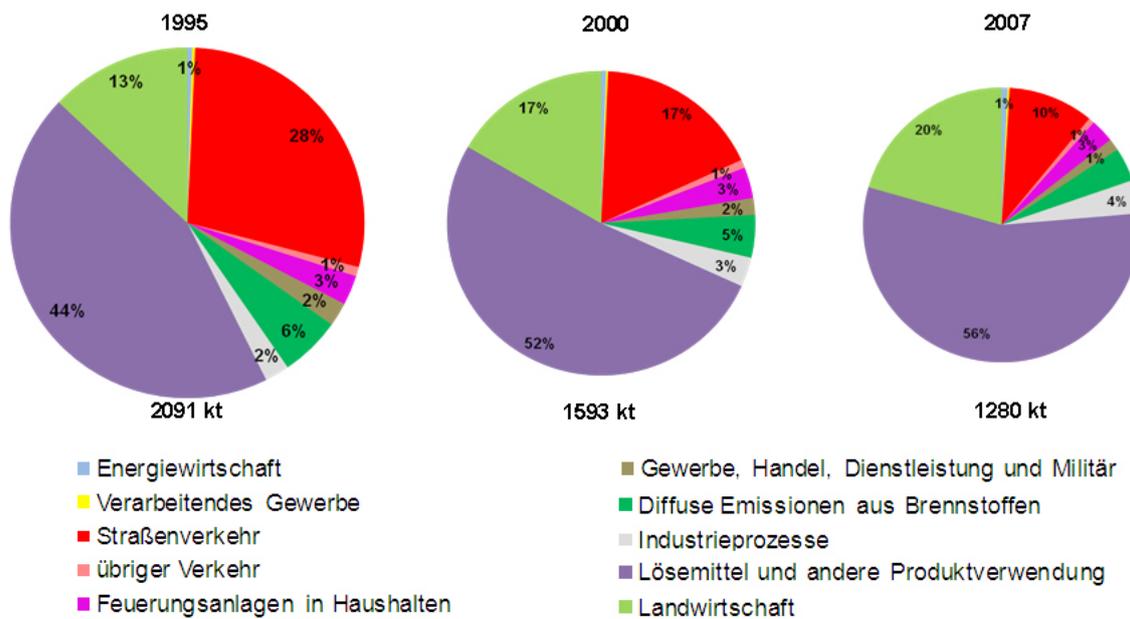


Abb. 10.13: Prozentualer Anteil der Verursachergruppen an den NMVOC-Emissionen in den Jahren 1995, 2000 und 2007. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/pdf-l/3760.pdf>

## 10.8 Emissionen von Kohlenmonoxid

Nach *Cofala 2006* reduzierten sich die weltweiten Kohlenmonoxid-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe im Zeitraum 1990 – 2000 geringfügig um ca. 4 % von 492 Mio. t auf 470 Mio. t. Der starken Verminderung in Westeuropa um 36 % steht eine deutliche Erhöhung in Asien und Afrika gegenüber. In der EU-27 wurden im Zeitraum 1990 – 2008 die CO Emission von 64,5 Mio. t auf 27,2 Mio. t mehr als halbiert (- 58 %) (*EEA/LRTAP 2010*). In Deutschland wurde im Zeitraum 1990 – 2008 eine Minderung um über 2/3 von 12,2 Mio. t auf 3,7 Mio. t erreicht (*NIR 2010*). Der Beitrag der Kraft- und Fernheizwerke ist mit 4 % (157 kt) gering. Den Hauptanteil hat der Verkehr mit ca. 34 % ([www.umweltbundesamt.de/emissionen/](http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/), Stand 2010).

## 10.9 Emissionen von Schwefelhexafluorid

Die SF<sub>6</sub>-Emissionen betragen in 2002 weltweit ca. 6 000 t. Nach einem Rückgang bis ca. 2000, steigen sie seitdem durch Zuwächse in Südasien und den Entwicklungsländern wieder deutlich an (*EPA 2006*). In der EU-27 wurden die SF<sub>6</sub> Emissionen im Zeitraum 1995 – 2008 um fast 45% von ca. 670 t auf 378 t (16 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv. auf 9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv.) vermindert (*EEA 2010*). Die SF<sub>6</sub>-Emission konnte europaweit - trotz ansteigendem Bestand an SF<sub>6</sub>-Betriebsmitteln - durch freiwillige Maßnahmen der Hersteller und Betreiber 1995 - 2003 um ca. 40 % gesenkt werden (*Ecofys 2005*). SF<sub>6</sub>-Emissionen aus elektrischen Betriebsmitteln (Schaltanlagen) waren in Deutschland 2008 mit 14,0 t nach der Verwendung für Alu-Reinigung (100,2 t) und in Schallschutzscheiben (71,2 t) sowie der Solartechnik (24,0 t) die viertgrößte Quelle für SF<sub>6</sub>-Emissionen. Der Einsatz in Autoreifen wurde sehr stark zurückgefahren. Aufgrund einer freiwilligen Erklärung des ZVEI und des VDEW von 1997 und ihrer Fortentwicklung (*ZVEI 2005*) konnte bei den Schaltanlagen seit 1995 eine deutliche Reduktion der Emissionen um ca. 49 % (2008) erreicht werden. Dies wurde durch Verringerung der Werks- und Montageverluste und der Leckageverluste beim Betrieb erreicht. Die Gesamtemissionen in Deutschland betragen im Jahre 2008 noch 249 t gegenüber 303 t in 1995 (*NIR 2010, Schwarz 2010*).

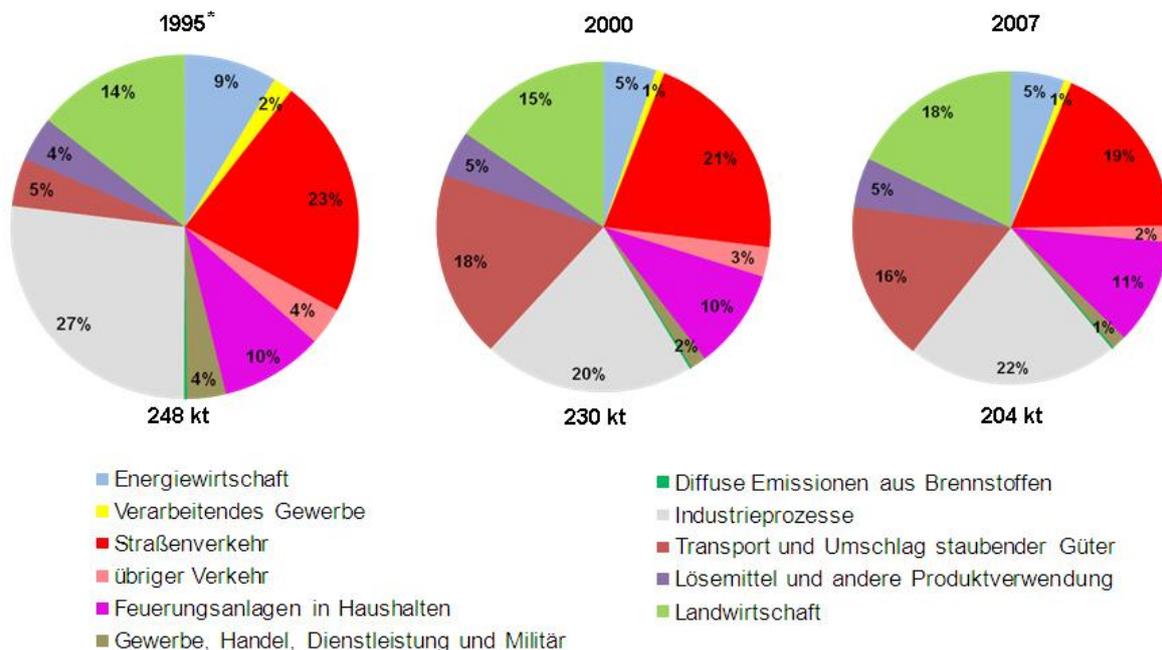
## 10.10 Emissionen von Schwefeldioxid

Schwefeldioxid ist kein Treibhausgas, aber ein Vorläufer von klimarelevantem atmosphärischem Schwefelsäure-Aerosol. Nach *WEO 2009* hat sich die weltweite SO<sub>2</sub>-Emission durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe im Zeitraum 1990 – 2007 um 26 % von 122 Mio. t auf

90 Mio. t vermindert. Der Rückgang war insbesondere in Westeuropa und Nordamerika durch Emissionsminderungsmaßnahmen und den strukturellen Umbruch in Osteuropa zu verzeichnen. Deutliche Zuwächse gab es vor allem in Asien. In der EU-27 hat sich die SO<sub>2</sub>-Emission im Zeitraum 1990 – 2008 um 78 % von 26,2 Mio. t auf 5,9 Mio. t vermindert (EEA/LRATP 2010). In Deutschland war die Verminderung mit über 90 % von 5,31 Mio. t (1990) auf 0,5 Mio. t (2008) noch stärker (NIR 2010) (Abb. 10.11). Der Beitrag der Kraftwerke in Deutschland reduzierte sich ebenfalls um über 90 % von 3,1 Mio. t auf unter 268 000 t (www.umweltbundesamt.de/emissionen/, Stand 2010).

### 10.11 Emissionen von Feinstaub

Feinstaubpartikel sind überwiegend Aerosole und werden von vielen Quellen emittiert. Die Feinstaubemission hat sich in der EU-27 zwischen 1990 – 2008 von 2,7 Mio. t auf 2,1 Mio. t um über 20 % reduziert. Der Kraftwerksanteil ging von 304 000 t auf 94 000 t (ca. 70 %) zurück (<http://dataservice.eea.europa.eu/pivotapp/pivot.aspx?pivotid=478>). Die Gesamtstaubemission konnte in Deutschland im Zeitraum 1990 – 2008 um über 90 % von 1,87 Mio. t auf 287 kt reduziert werden. Auch die Kraftwerke und Fernheizwerke haben ihre Staubemissionen durch Stilllegung alter Kraftwerke und Verbesserung der Staubabscheidung in diesem Zeitraum sehr stark um 99 % von 588 kt auf 13 kt reduziert. Die Feinstaubemissionen (PM10) wurden im Zeitraum 1995 – 2008 von 254 kt auf 203 kt reduziert. Der Anteil der Energiewirtschaft (öffentliche Kraftwerke und Industriekraftwerke) reduzierte sich nach Angaben des Umweltbundesamtes ebenfalls um 50 % von 22 kt auf 11 kt ([www.umweltbundesamt.de/](http://www.umweltbundesamt.de/) Stand 20.02.2009). Abb. 10.4 Zeigt den prozentualen Anteil nach Verursachergruppen für die Jahre 1995 – 2007. Die Energiewirtschaft ist 2007 beim Feinstaub zu 5,4 % beteiligt.



\* In diesem Jahr wurden Emissionen durch Transport und Umschlag staubender Güter nur unvollständig erfasst.

Abb. 10.4: Prozentualer Anteil der Verursachergruppen an den PM10-Emissionen in den Jahren 1995, 2000 und 2007. (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3760.pdf>)

## 11 Geoengineering, Aufforstung

Mit dem Begriff Geoengineering werden Versuche zur absichtlichen Veränderung der Natur beschrieben, die sich in der Größenordnung des Planeten bewegen (*Keith 2003*). Hierdurch soll der Einfluss des anthropogenen Treibhauseffektes verringert oder vermieden werden. Bereits 1982 wurde von dem russischen Meteorologen Budyko der Vorschlag gemacht, die Wirkung des Treibhauseffektes dadurch zu verringern, dass künstlich Sulfataerosole in die Stratosphäre eingebracht werden, die zu einer Abkühlung führen. Den Vorschlag zur Einbringung von Sulfataerosolen in die Stratosphäre zur Kompensation der Klimaerwärmung wurde neu von *Crutzen 2006* in die Diskussion eingebracht.



Ein weiterer Vorschlag war, die Rückstrahlung (Albedo) der Erde durch Einbringen von schwimmenden, reflektierenden Partikeln auf der Meeresoberfläche zu verändern. Eine andere Idee war die Installation von riesigen Sonnenschirmen im Weltall, die die Einstrahlverhältnisse und damit auch die Solarkonstante verändern sollten. 1997 haben Edward Teller und Mitarbeiter einen derartigen „Sonnenschirm“, der im Weltall zwischen Erde und Sonne installiert werden sollte, vorgestellt (*Teller 1997*). Damit soll die Strahlung der Sonne umgelenkt werden, um die Atmosphäre oder die Erdoberfläche selektiv zu erwärmen. Alle diese Möglichkeiten stellen ein erhebliches Risiko für unser Klimasystem dar und dürften daher nach heutigem Wissensstand eher nicht zum Zuge kommen (*Keith 2003*). Dennoch beschäftigt sich viele Gremien u.a. die Stanford University in einem umfangreichen „Global Climate & Energy Project“ (GCEP) auch mit diesem Thema (<http://gcep.stanford.edu/research/geoengineering.html>) und seit 2010 auch das IFM-Geomar in Kiel, das nach Visbeck insbesondere die „Risiken und Nebenwirkungen“ von Geo-Engineering erforschen will (*Lublinski 2010*).

In kleinem Maßstab wird die Steuerung des Wetters schon seit den 50er Jahren durch Impfung der Wolken versucht. Zur Verhinderung der Bildung von tropischen Wirbelstürmen wurden Überlegungen angestellt, auf die betroffene Meeresoberfläche einen Ölfilm aufzubringen, um eine Wasserverdunstung und damit Energieaufnahme zu verhindern. Die Erfolgsaussichten werden jedoch als gering eingeschätzt, da die Wellen den Ölfilm schnell zerschlagen würden. In den vergangenen Jahren gab es zahlreiche Veröffentlichungen zu diesem Thema (s. Kap. 11.4).

### 11.1 Eisendüngung zum Algenwachstum

Es gibt Überlegungen, das Wachstum von Algen und damit die CO<sub>2</sub>-Aufnahme der Meere durch Düngung von Ozeanen mit Eisenstaub zu verstärken (Abb. 11.1). Etwa die Hälfte des durch Pflanzen weltweit gebundenen Kohlendioxids ist in den Planktonalgen der Weltmeere enthalten. Etwa 1/5 der Meere sind Eisenmangelgebiete, insbesondere in der Südpolarregion. Konkrete Versuche durch das Alfred-Wegener-Institut (AWI) sind 2000, 2002 und 2004 (EIFEX-Experiment) und 2009 mit dem deutsch-indischen LOHAFEX Experiment mit zunächst großem Erfolg bereits durchgeführt worden. Das Algenwachstum (Algenblüte) stieg in dem gedüngten Gebiet kurzzeitig drastisch an.

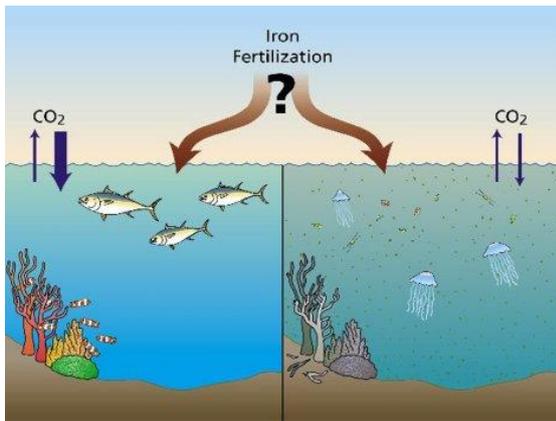


Abb. 11.1: Eisendüngung der Weltmeere zur CO<sub>2</sub>-Minderung durch vermehrtes Algenwachstum (Kasang, HBS 2005)

Offen ist, wie hoch der Anteil des abgestorbenen Planktons ist, der in die ozeanische Tiefe absinkt und damit den Kohlenstoff tatsächlich aus der Biosphäre entfernt. Das LOHAFEX Experiment ergab ein relativ geringes Absinken von Kohlenstoff (Mazzocchi 2009) da die Algen von Zooplankton gefressen wurden. Außerdem herrschte in dem für das Experiment ausgewählte Ozeangebiet im nördlichen Teil des Südlichen Ozeans Siliziummangel, so dass nur wenige Kieselalgen (Diatomeen) gebildet werden konnten, die für ein Absinken auf den Boden geeigneter sind. Auch die zu erwartenden Nebenwirkungen auf die ozeanische Biochemie und die Zusammensetzung der Algengemeinschaften ist noch nicht geklärt.

Modellrechnungen haben ergeben, dass theoretisch bei größtmöglicher Eisendüngung bis zu 15 % der derzeitigen anthropogenen Kohlendioxidemission entfernt werden könnte (IPCC 2007). In einem Arbeitspapier des Kieler Weltwirtschaftsinstituts werden Kosten für diese CO<sub>2</sub>-Sequestrierung von etwa 8 - 80 US\$/t CO<sub>2</sub> genannt (Güssow 2009). Trick 2010 spricht sich gegen die Eisendüngung aus, da die Eisengabe zumindest in stickstoffreichen Gewässern vor allem auch eine Gruppe an Kieselalgen fördern, die ein Nervengift absondern, das dann in den Nahrungskreislauf gelangen könnte.

## 11.2 Aufforstung

Durch Aufforstung können erhebliche Mengen von Kohlenstoff in die Biomasse der Wälder eingebunden werden. Wälder entziehen der Atmosphäre bei der Photosynthese Kohlendioxid und bauen den darin enthaltenen Kohlenstoff dauerhaft in die Pflanzenmasse (v.a. Holz, Wurzeln) ein. Der in der Biomasse eingebundene Kohlenstoff wird aber bei den Zersetzungsprozessen abgestorbener Biomasse wieder freigesetzt und der Atmosphäre zugeführt. Überwiegt der Abbau von Pflanzenmasse, so stellen die Wälder eine Kohlenstoffquelle dar (source). Wird hingegen mehr Pflanzenmasse aufgebaut, so wirken sie als Kohlenstoffsenke (sink).

Derzeit werden ca. 30 % der durch den Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen durch die Wälder aufgenommen. Durch gezielte forst- und holzwirtschaftliche Maßnahmen könnte die Zunahme der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Emissionen verringert werden. Folgende Möglichkeiten stehen zur Wahl:

- Aufforstungen
- Walderhaltungsmaßnahmen
- Verbesserte Bewirtschaftungsmethoden
- Substitution fossiler Brennstoffe
- Ersatz energieaufwendig hergestellter Materialien durch Holz

Das Kyoto-Protokoll erlaubt Industrieländern, einen Teil ihrer Kohlendioxidemissionen durch die Anlage von Aufforstungen in Entwicklungsländern zu mindern. Auf diese Weise soll das Kohlendioxid, das durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe entsteht, von neu gepflanzten Wäldern z.B. in den Tropen wieder aufgenommen werden. Über die Frage der Anrechenbarkeit von forstwirtschaftlichen Aktivitäten und Landnutzungsänderungen gab es lange Auseinandersetzungen. Streitpunkt war die Überprüfbarkeit und Messbarkeit des Speicherungser-

folges sowie die grundsätzlich bei Speicherungsprojekten bestehende Gefahr der Reversibilität: Durch späteren Waldbrand oder Kahlschlag könnten die erzielten Bindungserfolge schnell wieder zunichte gemacht werden. Der 2000 erschienene IPCC-Sonderbericht „Land Use, Land-Use Change“ (LuLuCF) macht deswegen Vorschläge zur Definition von Senkenkategorien und Vorschläge für Emissionsgutschriften im Rahmen der Kyoto-Mechanismen Joint Implementation (JI), Clean Development Mechanism (CDM). Auf der UN Konferenz in Marrakesch 2001 (COP 7) wurde festgelegt, dass Senken, d.h. CO<sub>2</sub>-bindende Aktivitäten in Land- und Forstwirtschaft, anstelle einer entsprechenden Verringerung der Emissionen angerechnet werden können. Die Senkenprojekte in Entwicklungsländern im Rahmen des CDM wurden auf Aufforstungs- und Wiederaufforstungsprojekte beschränkt. Ihre Obergrenze wurde auf 1% der nationalen Emissionen im Basisjahr 1990 festgelegt. Dadurch verringert sich die Reduktionsquote für alle Industrieländer bei voller Anrechnung der Treibhausgasenken auf etwa - 1,8 % anstatt – 5,2 %.

### 11.3 Bodenbearbeitung

Nachdem erst seit einigen Jahren bekannt ist, dass der Boden erhebliche Mengen an Kohlenstoff speichert, wurden Untersuchungen angestellt, die Speichermenge zu vergrößern bzw. Freisetzungen durch Bodenbearbeitung zu verhindern. Messungen haben ergeben, dass doppelt so viel Kohlenstoff im Boden gespeichert ist als in den Pflanzen selbst (bei Ackerböden sogar bis zu 98 %) und eine geeignete Bodenbearbeitung die Kohlenstofffreisetzung vermindern kann. Mit so genannten Flachgrubbern wird der Boden nur flach, jedoch ganzflächig bearbeitet. Im Gegensatz zum Pflug wird das aufliegende Pflanzenmaterial wie Stroh nicht so tief untergepflügt und kann somit schneller zu Humus verrotten. Damit wird mehr Kohlenstoff im Boden gebunden. In Amerika ist dieses Verfahren bereits auf 70 % der Nutzflächen üblich, in Deutschland erst auf einem Sechstel der Flächen (*Keith 2005*).

### 11.4 Techniken zur Änderung der Solareinstrahlung

Nach dem Review Bericht der *The Royal Society 2009* müsste die Solareinstrahlung global um etwa 2 % verringert werden, um den Strahlungsantrieb durch die Verdoppelung des CO<sub>2</sub> Gehaltes in der Atmosphäre auszugleichen. Verschiedene mehr oder minder realistische Techniken werden hierzu vorgeschlagen. Änderung der Albedo z.B. durch

- Anstreichen (weiß) von Dächern, Straßen, Plätze,
- Abdecken von Wüstengebieten mit weißen Plastikfolien,
- Anbau bestimmter Getreidesorten (höhere Albedo),
- Aufhellen von Wolken durch Einsprühen von Meersalz (Tausende Schiffe versprühen Wasser über hohe Türme),
- Einbringen von Aerosolen wie Sulfatpartikel in die Stratosphäre,
- Einbringen von Spiegeln ins Weltall, Milliarden von reflektierenden Folien werden mit Raketen oder Satelliten in eine Erdumlaufbahn gebracht

Die technischen Möglichkeiten sind grundsätzlich vorhanden, bergen aber viele Risiken, die Auswirkungen auf das Ökosystem und das regionale Klima haben können. Dennoch sollte nach Ansicht der *The Royal Society 2009* die Forschung angesichts der großen möglichen negativen Auswirkungen der Klimaerwärmung weiterbetrieben werden. *Robock 2009,2010* nennt 17 Gründe, die gegen ein Geoengineering sprechen und sieht große Risiken. Dennoch schließt er sich der Meinung von AMS (s.u.) und *Mac Cracken 2009* an und spricht sich angesichts der vielen offenen Fragen ebenfalls für ein Forschungsprogramm aus.

Auch die amerikanische meteorologische Gesellschaft AMS hat angesichts der Bedrohung durch den Klimawandel 2009 in einem Statement zur intensiven Erforschung des wissenschaftlichen und technischen Potentials zum Geoengineering und insbesondere deren Auswirkungen auf die Umwelt aufgefordert. Ethische, legale, und gesellschaftliche ökologische Aspekte müssen ebenso untersucht werden. ([http://www.ametsoc.org/policy/2009geoengineeringclimate\\_amsstatement.pdf](http://www.ametsoc.org/policy/2009geoengineeringclimate_amsstatement.pdf) ).

## 12 Kohlendioxidminderung in der Energiewirtschaft

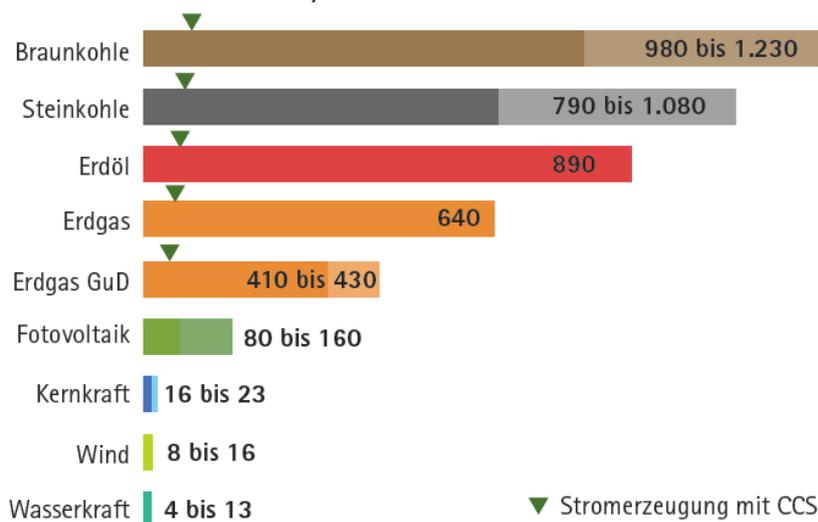
Die Energiewirtschaft ist an der energiebedingten Emission des Klimagases CO<sub>2</sub> weltweit mit ca. 32 % ([www.mnp.nl/edgar](http://www.mnp.nl/edgar)) beteiligt und unternimmt verstärkt Anstrengungen, um ihre Emissionen zu mindern. Hierzu stehen eine Reihe von Optionen zur Verfügung: Verbesserung der Energieeffizienz durch z.B. Wirkungsgradverbesserung, Einsatz CO<sub>2</sub>-armer bzw. -freier Technologien wie Erdgas, erneuerbarer Energien und Kernenergie. Außerdem wird intensiv an der Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Abscheidung (CCS) gearbeitet. Mit dem Forschungs- und Entwicklungskonzept COORETEC des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) mit Zeithorizont 2020 soll die Entwicklung notwendiger Technologien für höchst effiziente, praktisch abgasfreie und wirtschaftliche Kohle- und Gaskraftwerke aufgezeigt werden (<http://www.cooretec.de/>).

Das IPCC 2007 zeigt anhand von Modellrechnungen die Einsparpotentiale auf, die genutzt werden können, um das 2 Grad Ziel zu erreichen. An erster Stelle liegt das „Energieeinsparen und Effizienz“, gefolgt von „Erneuerbare Energien“ und „Brennstoffsubstitution“, danach kommt „Kernkraft“ und „CCS“ (Kohlendioxidabscheidung und Speicherung).

Die spezifischen Kohlendioxid- bzw. Treibhausgasemissionen, die bei der Stromerzeugung in den verschiedenen Kraftwerksarten entstehen, zeigen die beiden untenstehenden Tabellen von VBG 2009 bzw. dem Ökoinstitut (*Fritsche 2007*). Die Unterschiede aufgrund unterschiedlicher Rechenansätze sind relativ gering. Während die Braunkohle mit rund 1000 g/kWh die höchsten Emissionen verursacht, hat die Wind- und Wasserkraft mit 10 – 40 g/kWh die geringsten Emissionen. Die Photovoltaik hat mit 80 – 160 g/kWh aufgrund der energieintensiven Solarzellenfertigung noch höhere Treibhausgasemissionen als die Kernkraft. Aufgrund immer geringeren Materialverbrauchs für die PV Zellen, ist dieser Wert in den vergangenen Jahren deutlich zurückgegangen.

### CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei der Stromerzeugung

Gramm Kohlendioxidäquivalent pro kWh Strom,  
berechnet über den Lebenszyklus des Kraftwerks



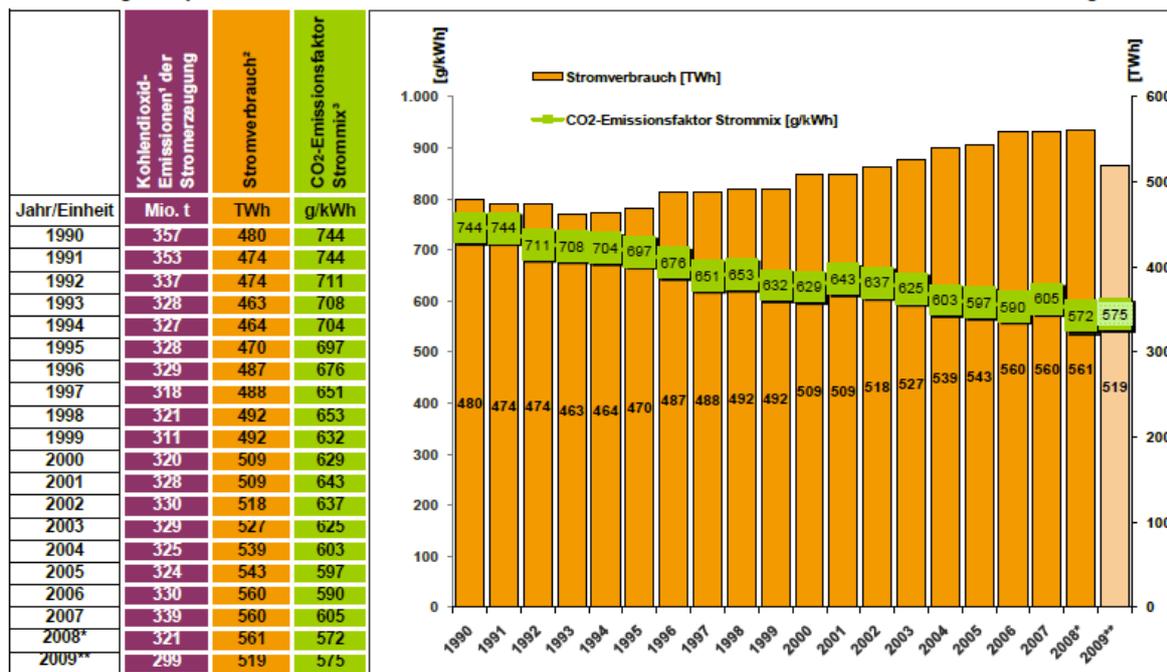
Schwankungsbreiten wg. unterschiedlicher Berechnungsmethoden und Standorte der Kraftwerke.

Strom aus:	Emissionen in g/kWh <sub>el</sub>	
	CO <sub>2</sub> -Äquivalente	nur CO <sub>2</sub>
AKW (Uran nach Import-mix)	32	31
<b>AKW (Uran nur aus Russland)</b>	<b>65</b>	<b>61</b>
Import-Steinkohle-Kraftwerk	949	897
Import-Steinkohle-Heizkraftwerk	622	508
<b>Braunkohle-Kraftwerk</b>	<b>1.153</b>	<b>1.142</b>
Braunkohle-Heizkraftwerk	729	703
Erdgas-GuD-Kraftwerk	428	398
Erdgas-GuD-Heizkraftwerk	148	116
Erdgas-Blockheizkraftwerk	49	5
Biogas-Blockheizkraftwerk	-409	-414
Wind Park onshore	24	23
Wind Park offshore	23	22
Wasser-Kraftwerk	40	39
Solarzelle (multikristallin)	101	89
Solarstrom-Import (Spanien)	27	25
<b>Strom-Effizienz (mittel)</b>	<b>5</b>	<b>5</b>

Abb. 12.1: Berechnungen der Treibhausgasemission zur Stromerzeugung, Abb. oben: nur CO<sub>2</sub> Äquivalent, ( Paul Scherrer Institut 2007 in VGB 2010), Abb. unten: CO<sub>2</sub> Äquivalent und CO<sub>2</sub> von Stromerzeugungsoptionen (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung) (Fritsche 2007, Öko-Institut)

Die Entwicklung der spezifischen CO<sub>2</sub> Emission in Deutschland 1990 – 2009 (Abb. 12.2.) des deutschen Strommixes zeigt nach Auswertung des UBA, März 2010, dass trotz gestiegenem Stromverbrauch die CO<sub>2</sub> Emission um ca. 22 % von 744 g/kWh auf 575 g/kWh zurückgegangen ist.

#### Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2008 und erste Schätzung 2009



Quelle: Umweltbundesamt, FG I 2.5., Stand: März 2010

\* vorläufige Angaben

\*\* erste Schätzung

Strommix inklusive fossiler, nuklearer und erneuerbarer Energieträger.

<sup>1</sup> UBA-Berechnung auf Grundlage von Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2009) und dem deutschen Treibhausgasinventar 1990-2008.

<sup>2</sup> Stromverbrauch = Bruttostromerzeugung - Kraftwerkseigenverbrauch - Pumpstrom - Leitungsverluste.

<sup>3</sup> UBA-Berechnung auf Grundlage von Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (Veröffentlichung AGEB 2009/Energiebilanzen bis 2007) und des Statistischen Bundesamtes (Destatis 2008).

**Umwelt  
Bundes  
Amt**  
Für Mensch und Umwelt

Abb. 12.2: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxidemission des deutschen Strommixes 1990 – 2009, (UBA, <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf>)

## 12.1 Wirkungsgradverbesserung

Die Steigerung des Wirkungsgrades ist seit den Anfängen der Kraftwerkstechnik eine der Daueraufgaben des Kraftwerksingenieurs – ursprünglich rein aus Wirtschaftlichkeitsgründen zur Einsparung von Brennstoffkosten, seit ca. 30 Jahren vermehrt auch aus Umwelt- und Klimaschutzgründen. Der Wirkungsgrad von fossil befeuerten Kraftwerken ist in den vergangenen 30 Jahren im Weltdurchschnitt von 31 % auf 36 % gestiegen. Die Spitzenwerte mo-

derer Anlagen liegen bei 47 % (Kohle-Dampfkraftwerke) (*RWE 2006*). Dies wurde ermöglicht durch die Anhebung der Dampfzustände sowie die Weiterentwicklung der Dampfturbinentechnik und des Kraftwerksprozesses. Bei Erdgas-Kombikraftwerken konnten mit der GuD-Technik die Wirkungsgrade von 40 % Anfang der 1980er Jahre auf 58 % ohne Heizwärmeabgabe erhöht werden. Die Entwicklung des Wirkungsgrades und der CO<sub>2</sub> Reduzierung weltweit und in der EU zeigt Abb. 12.2.

Der Erneuerungsbedarf fossil befeuerter Kraftwerke liegt in Deutschland in den nächsten 15 bis 20 Jahren bei mindestens 20 % (40 000 MW) der vorhandenen Anlagen (*Fischer 2006*), und in der EU-27 bei rund 170 000 MW (*VGB 2009*). Durch dieses Neubauprogramm mit höheren Wirkungsgraden würde sich bis 2030 eine 10 – 20 -prozentige CO<sub>2</sub>-Minderung ergeben (*Fischer 2006, RWE 2006*).

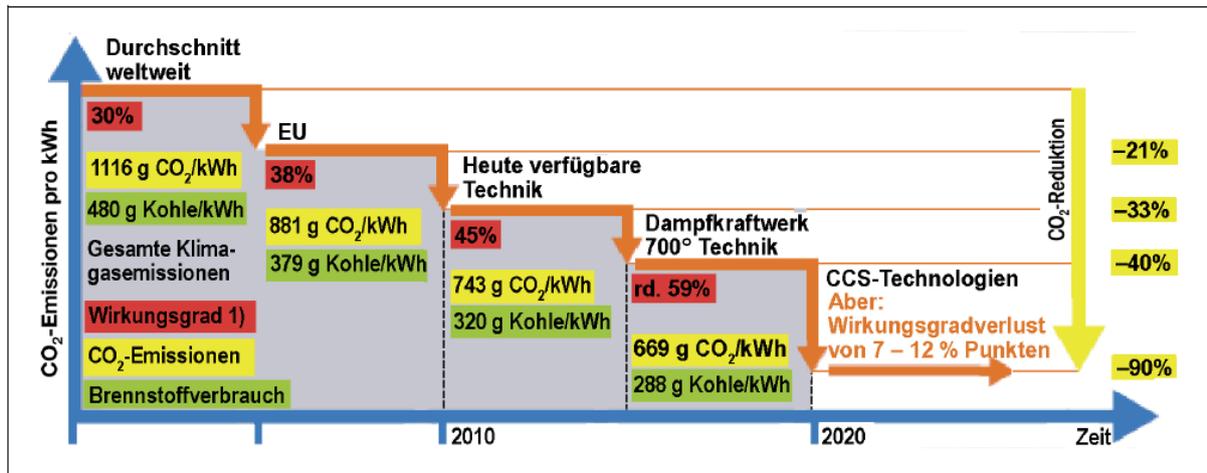


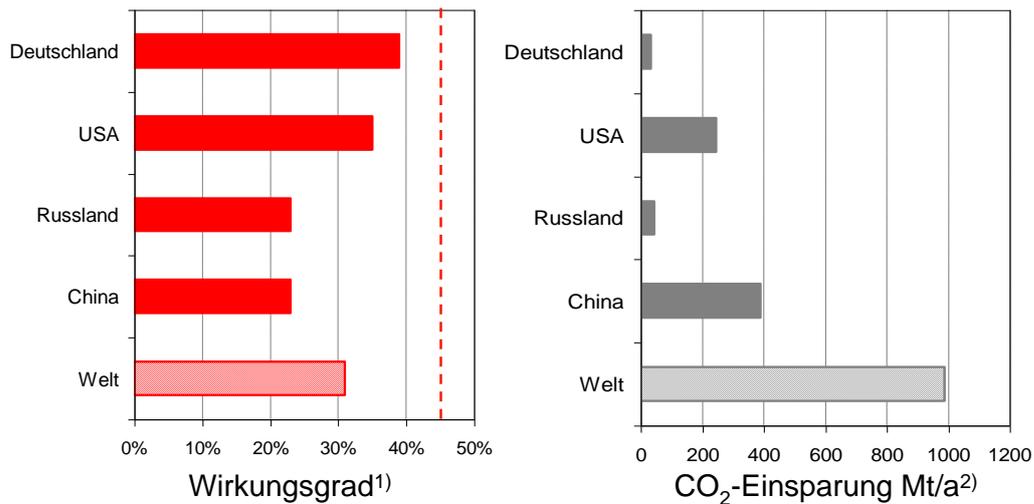
Abb. 12.3: CO<sub>2</sub> Reduzierung von Kohlekraftwerken durch Steigerung des Wirkungsgrades – weltweit, EU und zukünftig ([http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien/energie\\_2010.pdf](http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien/energie_2010.pdf))

Durch weitere Prozess- und Komponentenentwicklung wie zweifache Zwischenüberhitzung und überkritische Dampfzustände und strömungstechnische Verbesserungen bei den Turbinen sind bis 2020 Wirkungsgrade von 55 % zu erwarten. Von der EU unterstützte FuE-Programme sind im Gange (z.B. VGB-Initiative: Emax Power Plant Initiative, [www.comtes700.org](http://www.comtes700.org)). Mit dem Projekt Comtes 700 wollen neun europäische Energieversorger (RWE, E.ON, EnBW, Vattenfall, EDF, Electrabel u.a.) kritische Kraftwerkskomponenten für den Temperaturbereich von 700 °C erproben. Mit dieser 700-Grad-Technologie könnte eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 30 % erreicht werden (*RWE 2006*). Ein weiteres Verbundforschungsprojekt ist das 725 HWT GKM (725 °C Hochtemperaturwerkstoffteststrecke im GKM), das bis Ende 2011 nach neuen Möglichkeiten der "Materialqualifizierung zur Wirkungsgradverbesserung" forschen soll (*MPA 2009*). Durch die Anhebung der Frischdampf Temperatur wird erwartet, dass der elektrische Kraftwerks- Nettowirkungsgrad bis 2020 von ca. 46 auf über 50 % angehoben werden kann. Schlüsselentwicklungen könnten neue Basislegierungen, Verbundwerkstoffe und/ oder Beschichtungstechnologien sein (*VGB 2010*).

Nach *Fischer 2006* könnte allein bei einer weltweiten Effizienzsteigerung um etwa 5 % in den Kraftwerken der Welt rund 1 Mrd. t Kohlendioxid eingespart werden (Abb. 12.3). Das zeigt das enorme Einsparpotential durch Verbesserung der Wirkungsgrade.

KW-Park in Deutschland ist rd. 5% vom aktuellen Stand der Technik entfernt

Regionales Reduktionspotential einer 5%igen Effizienzsteigerung



1) Schilling: „Energie-Fakten“ 2) ermittelt mit Daten aus „IEA Key World Energy Statistics“

Abb. 12.3: Vergleich der Wirkungsgrade der Kraftwerksparks in der Welt. Bei einer weltweiten 5 % Effizienzsteigerung könnten 1 Mrd. t Kohlendioxid eingespart werden (Fischer 2006)

## 12.2 Erneuerbare Energien

Der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien kann erheblich zur Verminderung der Treibhausgasemissionen beitragen. Neben den Kosten sind auch die Verfügbarkeit, der erforderliche Netzausbau und die Marktreife der verschiedenen Stromerzeugungstechniken aus erneuerbaren Energien zu beachten. Der starke Ausbau in Deutschland in den vergangenen Jahren ist auf die Förderung durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) zurückzuführen, das von einigen Nachbarländern - modifiziert – übernommen wurde.

### 12.2.1 Derzeitiger Stand

Die Erneuerbare Energie steht mit 17,9 % (2007) an dritter Stelle der globalen Stromerzeugung – nach Kohle mit 41,6 %, Gas 20,9 %, Nuklear 13,8 % und Öl 5,7 % (IEA 2009). Nach *REN21 2010* waren es 2009 18 % (Abb. 12.5). Die Zuwachsraten haben in den vergangenen Jahren global sehr stark zugenommen. Für Windenergie z.B. um 27 % und Photovoltaik um 25 % in den vergangenen 5 Jahren. 2009 haben USA und EU wiederum mehr Anlagen für Erneuerbare Energien installiert als konventionelle Anlagen. China hat 2009 mit 38 GW Erneuerbare Energien mehr als jedes andere Land der Welt zugebaut. Deutschland war an der Spitze mit 3,8 GW beim Zubau der Photovoltaik (*REN21 2010*).

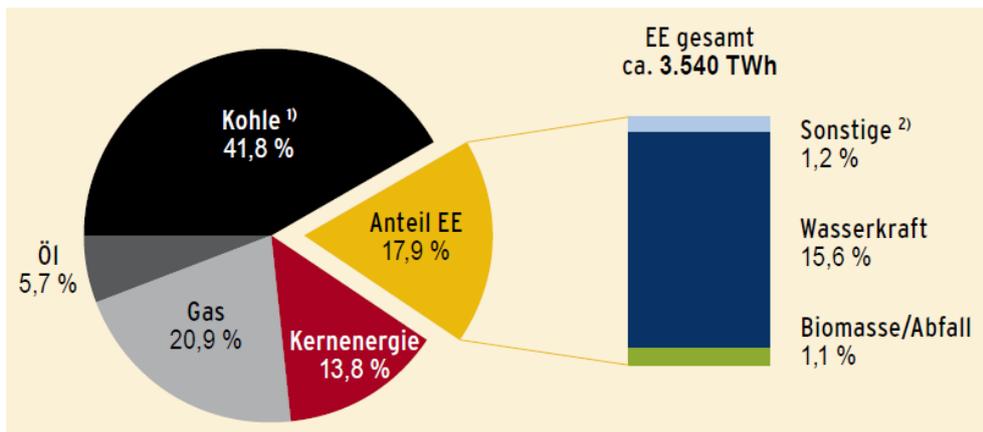


Abb. 12.5: Anteile erneuerbarer Energien an der globalen Stromerzeugung im Jahr 2007, 1) enthält nicht erneuerbaren Anteil des Abfalls (0,2 %), 2) Geothermie, Sonne, Wind, Meeresenergie, (BMU 2010)

2009 waren weltweit folgende Kapazitäten in GW an erneuerbaren Energien installiert:

Großwasserkraft	920 GW
Kleinwasserkraft (<10 MW)	60 GW
Windkraftanlagen	159 GW
Biomassestrom	54 GW
Geothermischer Strom	11 GW
Photovoltaik (PV), netzgekoppelt	21 GW
Solarthermischer Strom (CSP)	0,7 GW
Meeres(wellen)energie	0,3 GW

(REN21. 2010,)

(Große Wasserkraft wird weltweit unterschiedlich definiert: ab 2,5 - 50 MW, hier >10 MW)

Abb. 12.6 zeigt für das Jahr 2009 die installierte Leistung der Erneuerbaren Energien weltweit und für die Entwicklungsländer, die EU-27 und 6 führende Länder (China, USA, Deutschland, Spanien, Indien, Japan). Die große Wasserkraft ist hier nicht einbezogen.

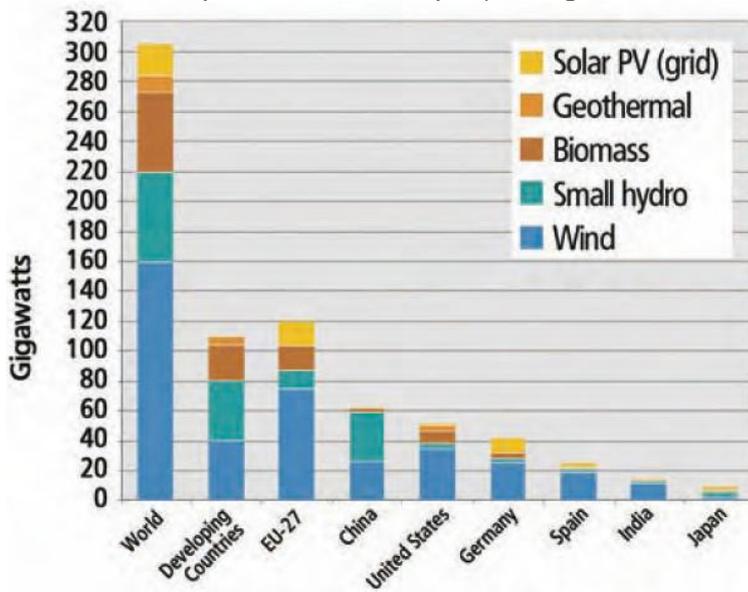


Abb. 12.6: Installierte Leistung erneuerbarer Energien weltweit, Entwicklungsländer, EU-27 und 6 führende Länder für 2009 (REN21 2010)

In der EU-27 wurden im Jahre 2007 ca. 16 % des Stromes gegenüber 13 % 1997 aus erneuerbaren Energien gewonnen (BMU 2009). Insbesondere die Windenergie hat in den vergangenen Jahren einen starken Ausbau erfahren. Rund 40 % dieser zusätzlichen Wind-

energiekapazität wurden in Deutschland (Zubau: 1.665 MW) und Spanien (Zubau: 1.609 MW) errichtet.

In Deutschland war die Stromerzeugung aus Sonne, Wind, Wasser, der gesamten Biomasse und Geothermie 2009 etwa genauso groß wie im Vorjahr und betrug 93,5 Mrd. kWh. Dabei ist zu beachten, dass trotz Zubau 2009 Windenergie und Wasserkraft witterungsbedingt deutlich hinter ihren eigentlichen Erzeugungspotenzialen zurückblieben. Der Anteil erneuerbarer Energien am gesamten deutschen Stromverbrauch betrug 2009 16,1 % (2008: 15,2 %).

Die Windenergie (rd. 37,8 Mrd. kWh) leistete 2009 in Deutschland mit 21 164 Anlagen und einem Netto - Leistungszubau von 1 880 MW nach Angaben des *BMU 2010* mit 6,5 % den größten Beitrag zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, gefolgt von der Biomasse mit 5,2 % (rd. 30,5 Mrd. kWh), der Wasserkraft mit 3 % (rd. 19 Mrd. kWh) und der Photovoltaik mit 1,0 % (6,2 Mrd. kWh) (Abb. 12.6). Deutschland verzeichnete mit 3,8 GW Zubauleistung 2009 den größten Zuwachs weltweit bei der Photovoltaik. Die geothermische Stromerzeugung spielt bislang in Deutschland keine Rolle (2009: 19 Mio. kWh) (*BMU 2010*). Die Abb. 16.2 zeigt den starken Anstieg der erneuerbaren Energie – insbesondere Windenergie und Biomasse - bei der Stromerzeugung im Zeitraum 1990 – 2009.

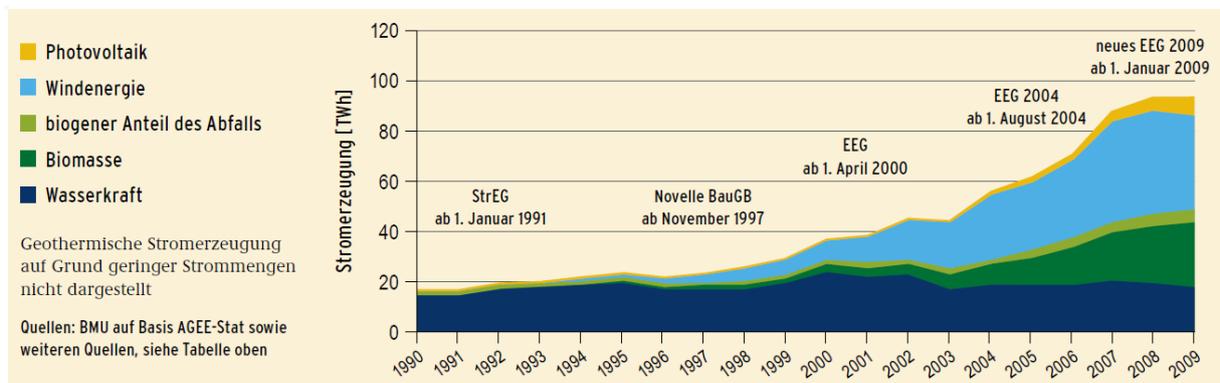
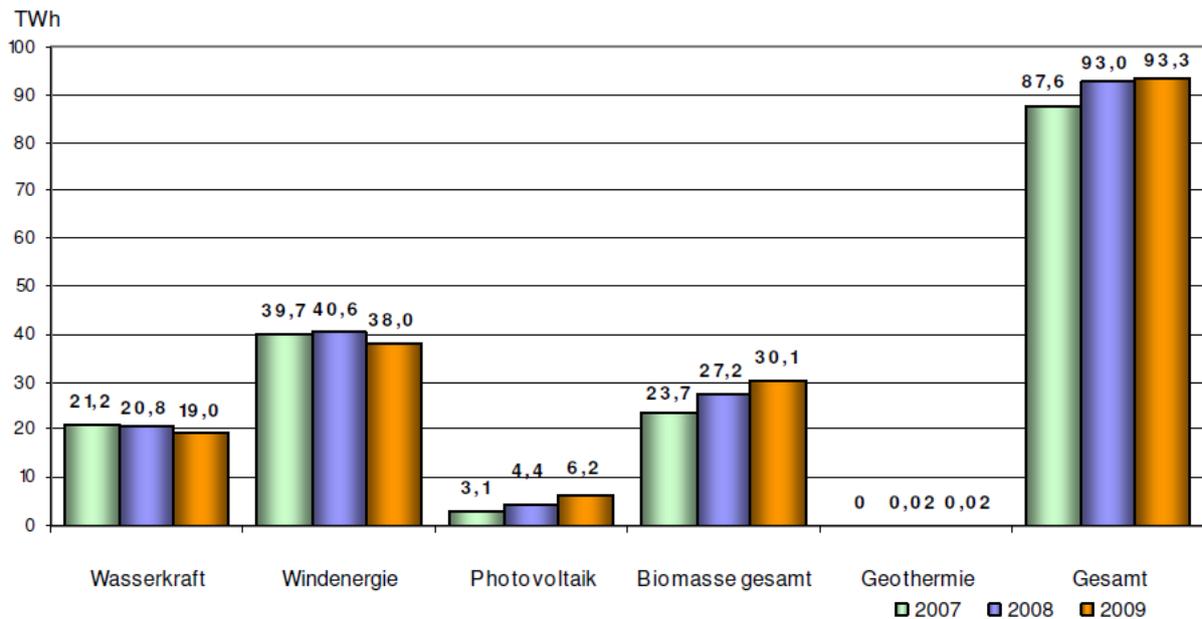


Abb. 12.7: Entwicklung des Anteils der erneuerbaren Energieerzeugung 1990 – 2009 in Deutschland (*BMU 2010*)

Abbildung 12.8 zeigt die Entwicklung der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in Deutschland für die Jahre 2007 - 2009. Der Rückgang beim Wind trotz Zubau neuer Anlagen ist auf das windschwache Jahr 2009 zurückzuführen.

In Deutschland gibt es bislang 24 hydrothermale Heizwerke mit einer gesamten Wärmeleistung von 700 MW und drei Anlagen die auch Strom erzeugen. Das erste Erdwärmekraftwerk, das neben ca. 3 MW Wärme auch Strom erzeugt (210 kW Leistung), ist 2003 in Mecklenburg-Vorpommern in Neustadt-Glewe (<http://www.erdwaerme-kraft.de>) in Betrieb gegangen (ORC-Prozess). Ein zweites Geothermie Projekt in Unterhaching/Bayern mit 45 MW (th.) wurde 2007 zur Wärmeversorgung über ein Fernwärmenetz und 2009 mit 3,4 MW zur Stromerzeugung (Kalina Verfahren, 12 % Wirkungsgrad) in Betrieb genommen (<http://www.geothermieprojekte.de/>). Die Bohrung ging bis zu 3580 m Tiefe und liefert 150 l/s mit 134° C. Das dritte Projekt ging Ende 2009 in Bruchsal in Betrieb (Betreiber EnBW und Bruchsalener Energie- und Wasserwerke). Die Anlage hat 550 kW elektrische Leistung und fördert 120° C heißes Wasser aus 2500 m Tiefe. Die Stromproduktion der drei geothermischen Kraftwerke betrug 2009 19 GWh (*BMU 2010*).



Anteil am Stromverbrauch 2009: 16,1%

Abb. 12.7: Vorläufige Auswertung der Anteile erneuerbarer Energien am Stromverbrauch in Deutschland 2009 in Mrd. kWh (bee-ev.de)

Erneuerbare Energien vermieden im Stromsektor nach Angaben des BMU (*BMU 2009*) in 2008 ca. 71 Mio. t Kohlendioxid (alle Sektoren: 110 Mio. t). Nach *BMU 2009* sparte der Einsatz erneuerbarer Energien im Strombereich in Deutschland 2008 im Mittel 772 g CO<sub>2</sub> je erzeugter kWh<sub>el</sub> ein.

### 12.2.2 Zukünftige Entwicklung

Weltweit werden erhebliche Anstrengungen unternommen den Anteil erneuerbarer Energien weiter auszubauen. 2009 wurde die International Renewable Energy Agency (IRENA, [www.irena.org](http://www.irena.org)) gegründet mit inzwischen 148 Staaten und die EU als Mitglieder. Viele Forschungsaktivitäten laufen auf diesem Gebiet. Nach dem Renewables Global Status Report 2010 (*REN21 2010*) fördern mehr als 100 Staaten weltweit die Erneuerbaren Energien. Ende Juni 2009 ist eine neue EU-Richtlinie für erneuerbare Energien (2009/28/EG) in Kraft getreten, die entsprechende Ziele festlegt: Bis 2020 sollen demnach 20 % des gesamten Endenergieverbrauchs der Europäischen Union (EU) aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Für Deutschland ist ein Ziel von 18 % vorgegeben. Die Bundesregierung hat Anfang 2009 beschlossen, den Anteil der erneuerbaren Energien kontinuierlich zu erhöhen, und zwar der Anteil am Bruttostromverbrauch von derzeit rund 15 % auf mindestens 30 % bis 2020. Mit dem aktualisierten Leitszenario 2009 der neuen Bundesregierung (*BMU 2009*) und verschiedenen Varianten wird eine wahrscheinliche Bandbreite der zukünftigen Entwicklung der erneuerbaren Energien und der korrespondierenden Energieversorgung bis zum Jahr 2050 beschrieben. Für den Bruttostromverbrauch ergibt sich demnach bis 2030 ein Anteil von 35 % Erneuerbare Energien bis 2020 und 84 % bis 2050 (*BMU 2009*).

Am 28. September 2010 wurde das Energiekonzept der Bundesregierung veröffentlicht (*BMWi 2010*), danach soll bis 2020 der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch 35 % betragen. Angestrebt wird eine Erhöhung des Anteils der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien auf 50 % bis 2030, 65 % bis 2040 und 80 % bis 2050. Insbesondere die Offshore-Windleistung soll hierzu bis 2030 auf 25 GW ausgebaut werden. Zur wirtschaftlich vernünftig Ausgestaltung des Übergangs zur „Erneuerbaren Energiewirtschaft“, wird nach Ansicht der Bundesregierung noch zeitlich befristet die Kernenergie benötigt und deshalb sollen die Laufzeiten um durchschnittlich 12 Jahre verlängert werden (*BMWi 2010*).

Die Studie *Energieszenarien 2010* vom August 2010 für das Energiekonzept der Bundesregierung geht für das Jahr 2050 von einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen bis 2050

von ca. 85 % aus. Erneuerbare Energien tragen dann ca. 50 % zur Deckung des Primärenergiebedarfs bei. Die Stromerzeugung wird in den Zielszenarien 2030 zu ca. 50 % und 2050 zu ca. 80 % aus Erneuerbaren Energien gedeckt werden. In den Zielszenarien spielen dann die Stromimporte mit 22 – 31 % der Stromnachfrage eine erhebliche Rolle. Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU regelt den Bezug von Ökostrom aus dem EU-Ausland. Darin wird es den Mitgliedsstaaten ermöglicht, die Ziele zum Anteil des Ökostroms an der Energieversorgung durch Stromimporte aus dem EU-Ausland zu erfüllen.

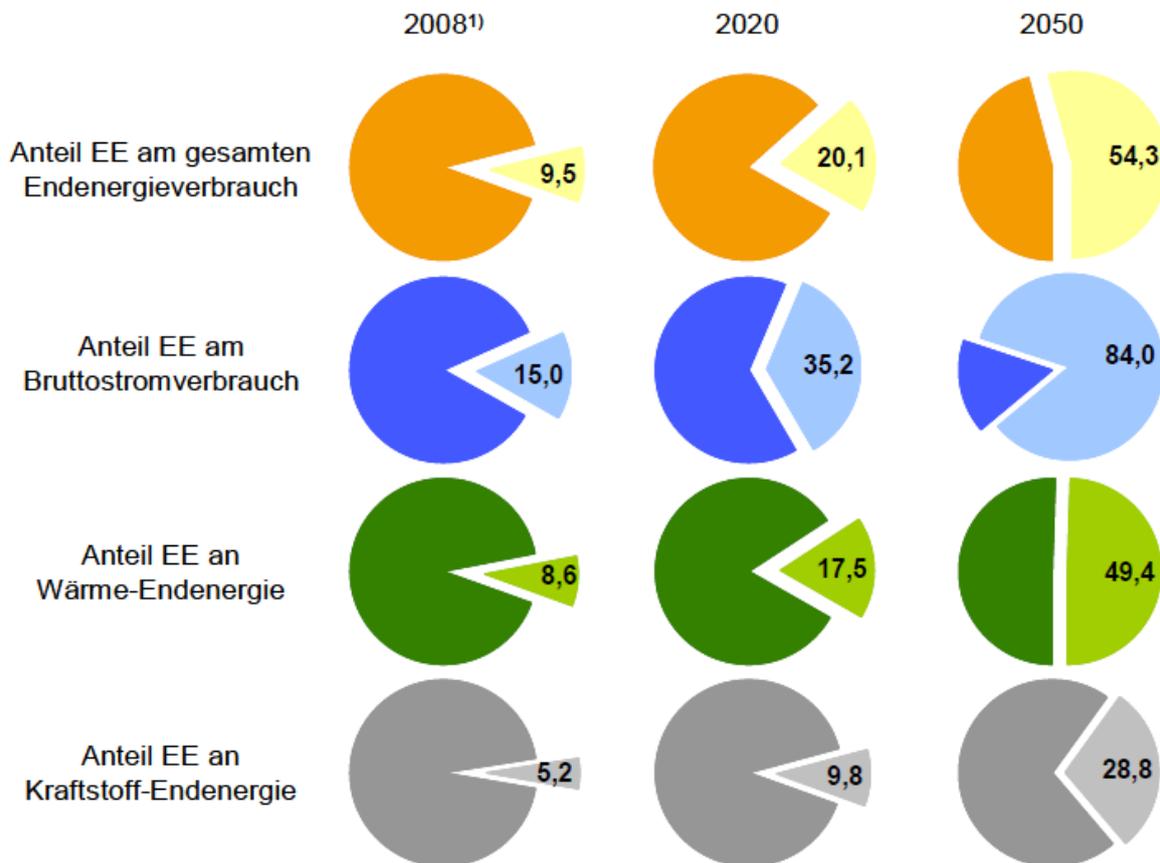


Abb. 12.8: Anteile der erneuerbaren Energien im Leitszenario 2009 für 2020 und 2050. Es berücksichtigt die neuesten Entwicklungen beim Ausbau erneuerbarer Energien) sowie die energiepolitischen Rahmenbedingungen auf nationaler und internationaler Ebene bis Mitte 2009. (BMU 2009)

Das Projekt **Desertec** könnte zum Stromimport aus Erneuerbaren Energien einen erheblichen Beitrag leisten. Die gemeinnützige DESERTEC Foundation (Berlin) und die Münchener Rück haben gemeinsam mit zwölf Firmen die Industrieinitiative Dii GmbH zur Realisierung von Desertec in der Mittelmeerregion gegründet. Das Desertec-Konzept sieht vor, im Nahen Osten (engl. *Middle East*) und Nord-Afrika (zusammen *MENA*) mithilfe von solarthermischen Kraftwerken, eventuell auch Photovoltaik und Windparks die Stromerzeugung voranzutreiben und den Strom dann mittels HVDC-Leitungen (High Voltage Direct Current = Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, HGÜ) in diese Länder und ab 2020 (mit insgesamt 10-15 % Übertragungsverlust) bis nach Europa zu leiten (Abb. 12.9). Solarthermische Kraftwerke werden im DESERTEC Konzept deswegen bevorzugt, weil sie 24 Stunden am Tag Strom nach Bedarf liefern können, da sie über entsprechende Wärmespeicher (z.B. Flüssigsalztanks oder Betonspeicher) verfügen, um auch z.B. nachts Strom zu erzeugen (<http://www.desertec.org/de/konzept/>).

Der geplante Ausbau der Windenergie erfordert ebenso wie der Stromimport im Rahmen des Desertec Projektes einen erheblichen Ausbau des Stromnetzes. Bereits 2005 hatte die Dena (*dena 2005*) ermittelt, dass schon für einen Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromproduktion von 20 Prozent bis zum Jahr 2015 850 Kilometer neue Leitungen gebaut werden müssten. Doch davon sind 2010 erst 90 Kilometer fertiggestellt. VDE 2010 hat in einem Positionspapier der Elektrotechnischen Gesellschaft die verschiedenen Möglichkeiten der Strom-

übertragung und den erforderlichen Netzausbau dargestellt. Wie das aktuelle VDE-Positionspapier "Übertragung elektrischer Energie" zeigt, kann der erhöhte Transportbedarf im Leistungsbereich von mehreren Tausend Megawatt in erster Linie nur durch den Neubau von Höchstspannungsfreileitungen in Dreh- oder Gleichstromtechnologie gedeckt werden. Die technologischen Optionen für zukunftstaugliche Netze sind verfügbar. Der Kostenaufwand dafür ist groß und wird voraussichtlich in der Dena Studie II noch 2010 dargestellt werden.

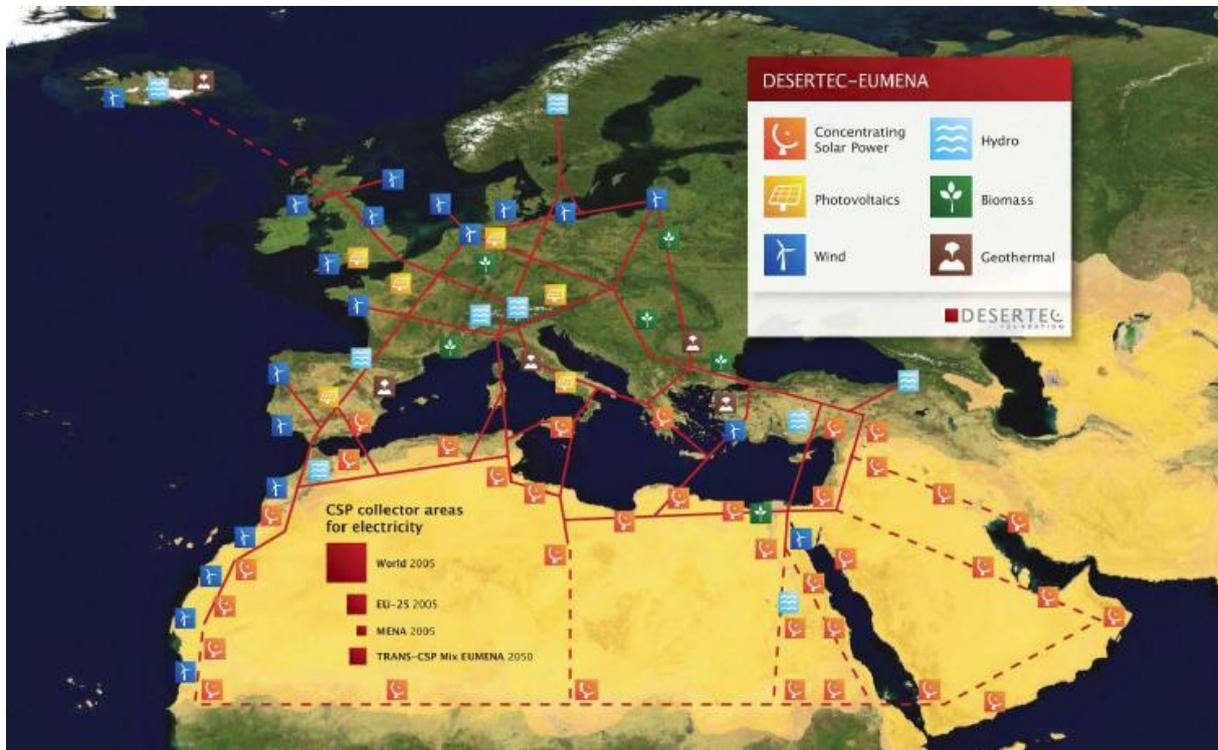


Abb. 12.9: Skizze des Deserotec Konzeptes für eine mögliche Infrastruktur für eine CO<sub>2</sub>-freie Energieversorgung für Europa, Mittlerer Osten und Nordafrika (EUMENA) (Steinmetz 2009)

In Deutschland waren bis Ende 2009 11 Offshore-Windanlagen (72 MW) installiert und 21 Windparks genehmigt. Laut Bundesverkehrsministerium sollen bis 2030 30 Windparks in der Nord- und 10 in der Ostsee gebaut werden.

Eine gemeinsame Projekt-Gesellschaft von E.ON, Vattenfall und EWE hat 45 Kilometer vor der Küste von Borkum 2009 einen Offshore Windpark mit insgesamt zwölf Windenergieanlagen der 5-Megawatt-Klasse errichtet. Die RWE-Projektgesellschaft für „Nordsee Ost“ hat im Februar 2010 einen Vertrag zur Lieferung von 48 Offshore-Windenergieanlagen vereinbart. Die Turbinen haben eine Gesamtleistung von rund 295 Megawatt und sind für den Hochseewindpark „Nordsee Ost“ bestimmt, der 2011 bis 2013 in der Deutschen Bucht, rund 35 Kilometer nördlich der Insel Helgoland errichtet werden soll. Bereits Mitte 2012 sollen die ersten Windturbinen in Betrieb genommen werden. Baltic 1 ist eines von vier Offshore-Windkraftprojekten mit einer Gesamtleistung von rund 1200 MW, die die EnBW im Frühjahr 2008 erworben hat. Zwei der Windkraftprojekte liegen in der Ostsee, Baltic 1 und Kriegers Flak, zwei der Projekte sind mit „He dreht“ und dem „Hochseewindpark Nordsee“ in der Nordsee. Die Projekte mit einer Gesamtinvestitionssumme von rund drei Milliarden Euro werden in den nächsten Jahren sukzessive realisiert. Baltic 1 wird der erste Offshore-Windparks Deutschlands an der Ostsee. Mit den ersten maritimen Baumaßnahmen wurde im Frühjahr 2010 begonnen. Die Inbetriebnahme des Windparks mit einer Gesamtleistung von 48,3 Megawatt ist im letzten Quartal 2010 geplant.

### 12.3 Kernenergie

Die Kernenergie stellt heute (2010) ca. 6 % des Weltenergiebedarfs bzw. 14 % der Weltstromerzeugung, in der EU-27 ca. 9 % des Energiebedarfs und 28 % der Stromerzeugung bereit (VGB 2010). Am 1. November 2010 waren 441 Kernkraftwerke (376 GW) in 30 Ländern

in Betrieb (<http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>). 2009 wurden ca. 2 560 TWh Strom erzeugt. 5 Kernkraftwerke wurden stillgelegt. Im Vergleich zu Kohlekraftwerken wurde 2009 die Emission von bis zu 2,6 Mrd. t CO<sub>2</sub> vermieden. Im Februar 2010 waren 194 Kernkraftwerke mit einer Leistung von 168 GW in Europa (incl. Russland mit 31 Blöcken, 21 743 MW) in Betrieb und 17 Blöcke mit 14,7 GW in 6 Ländern im Bau.

Im Jahr 2009 waren in Deutschland 17 Kernkraftwerke mit einer Bruttoleistung von 21.497 MW in Betrieb. Sie erzeugten mit 134,9 Milliarden kWh 22,6 % (des Stroms) und haben im Jahr 2009 bis zu 135 Mio. t CO<sub>2</sub> vermieden (AG Energiebilanzen, <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=118>).

Weltweit sind derzeit 58 Kernkraftwerke in 14 Ländern (v.a. in China, Korea, Indien und Russland) mit einer Leistung von 61 GW in Bau. In Europa ist ein neues Kernkraftwerk in Finnland und in Frankreich in Bau. Insgesamt sind über 148 Anlagen mit einer Kapazität von beinahe 163 700 MW geplant und weitere 331 vorgeschlagen (Stand: 11/2010, <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>). China plant den größten Zubau von derzeit 10 230 MW um 25 900 MW bis 2020. Weitere 39 Anlagen sind in Planung und 120 vorgeschlagen. In den USA ist 1 Reaktor im Bau und 9 Anlagen mit zusammen 11 600 MW in Planung. Bis 2020 wird ein Zubau von 61 GW erwartet. Die Gesamtleistung soll dann weltweit 430 GW betragen (<http://www.world-nuclear.org/info/inf17.htm>) – 130 GW mehr als in 2000 geplant und 16 % mehr als 2006 in Betrieb war. Im Zeitraum 1996-2008 wurden 40 Reaktoren stillgelegt und 47 in Betrieb genommen.

## 12.4 Emissionshandel

Im Kyoto-Protokoll haben sich die beteiligten Industriestaaten im Jahre 1997 verpflichtet, den Ausstoß klimaschädlicher Gase - wie zum Beispiel Kohlendioxid - bis zum Zeitraum 2008-2012 um 5,2 % gegenüber 1990 zu senken. Die Europäische Union (EU-15) hat zugesagt, ihre Emissionen während der Jahre 2008 bis 2012 um acht Prozent gegenüber dem Niveau von 1990 zu verringern. Um diese Zielsetzung zu erreichen, haben sich die Mitgliedstaaten der EU im Rahmen einer Lastenverteilung (burden sharing) zu nationalen Klimaschutzziele verpflichtet. Deutschland hat zugesagt, die Treibhausgasemissionen im gleichen Zeitraum um 21 % zu reduzieren. Zu beachten ist hierbei, dass die Erfüllung des Kyoto-Ziels – gerechnet bis 2050 - nur eine minimale Verringerung (weniger als ein Zehntel Grad) gegenüber der sonstigen Temperaturentwicklung mit sich bringt (*BMBF 2003*).

Im Rahmen der Umsetzung des Kyoto-Protokolls hat innerhalb der Europäischen Union am 1. Januar 2005 der Emissionshandel begonnen. Auf der Basis der 2003 in Kraft getretenen Emissionshandelsrichtlinie sind die EU-Mitgliedstaaten verpflichtet, nationale Allokationspläne zur Umsetzung des Emissionshandels zu verabschieden. Des Weiteren wurde mit der Verbindungsrichtlinie (Linking Directive) eine Verbindung zwischen den projektbezogenen flexiblen Mechanismen des Kyoto Protokolls (CDM, JI) und dem Emissionshandelssystem der EU geschaffen. Dies soll allen am EU-Emissionshandel beteiligten europäischen Unternehmen ermöglichen, Gutschriften aus weltweit durchgeführten Projekten zur Verringerung der Treibhausgasemissionen auf ihre eigenen Verpflichtungen anzurechnen.

Das Emissionshandelssystem soll eine wirtschaftliche Basis schaffen, den Ausstoß des klimaschädlichen Gases CO<sub>2</sub> dort zu reduzieren, wo es am kostengünstigsten ist. Den Wirtschaftssektoren und jeder betroffenen Anlage wurden konkrete Minderungsziele zugeordnet und in diesem Umfang Emissionszertifikate in Deutschland für 499 Mio. t CO<sub>2</sub> für die erste Handelsperiode kostenlos zur Verfügung gestellt. Die Zertifikate sind handelbar und dienen somit als eine Art Währung. Erreicht das Unternehmen die Ziele durch eigene kostengünstige CO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahmen, kann es nicht benötigte Zertifikate am Markt verkaufen. Alternativ muss es Zertifikate am Markt zukaufen, wenn es nicht über eigene Zertifikate verfügt. Erfüllt das Unternehmen seine Minderungsverpflichtung (CO<sub>2</sub>-Minderung oder Zukauf von Zertifikaten) nicht, werden Sanktionen fällig, die in der ersten Handelsperiode 40 Euro pro Tonne Kohlendioxid betragen, und die nicht erreichte Minderungsverpflichtung muss im Folgejahr zusätzlich - ggf. durch Zukauf weiterer Zertifikate - erbracht werden. Das Prinzip des Emissionshandels ist in Abbildung 12.9 dargestellt.

### Zuteilungsmengen und erfasste Anlagen in der EU und Deutschland

In der erweiterten EU-25 sind 11.428 Energie erzeugende und energieintensive Anlagen zur Teilnahme am Emissionshandel verpflichtet. Auf diese entfallen nahezu die Hälfte der CO<sub>2</sub>-Emissionen Europas. In größeren Mitgliedstaaten werden 1000 - 1850 Anlagen erfasst, in den meisten anderen Mitgliedstaaten liegt die Zahl der einbezogenen Anlagen in der Regel zwischen 50 und 400. In Deutschland waren 2005 1849 Anlagen zur Teilnahme am Emissionshandel verpflichtet. Hierzu gehören insbesondere alle großen Feuerungsanlagen. Nach Schätzung des *BMU 2005* werden in Deutschland ca. 98 % der Emissionen aus der Strom- und Fernwärmeerzeugung und mehr als 60 % der Emissionen der Industrie vom Emissionshandel erfasst (<http://www.emissionshandel-fichtner.de/>). In Deutschland ist das Emissionshandelsystem seit 2005 im Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) geregelt. Das 2005 in Kraft getretene Gesetz zur Einführung der projektbezogenen Mechanismen (ProMechG) nach dem Kyoto-Protokoll schafft die nationalen Grundlagen zur Erzeugung von Gutschriften für Emissionsminderungen, die durch Projekte im Rahmen von Joint Implementation und Clean Development Mechanism geschaffen werden. Danach können Emissionsgutschriften aus CDM-Projekten ab 2006 und aus JI-Projekten ab 2008 auf die Verpflichtung zur Abgabe von Emissionsberechtigungen angerechnet werden.

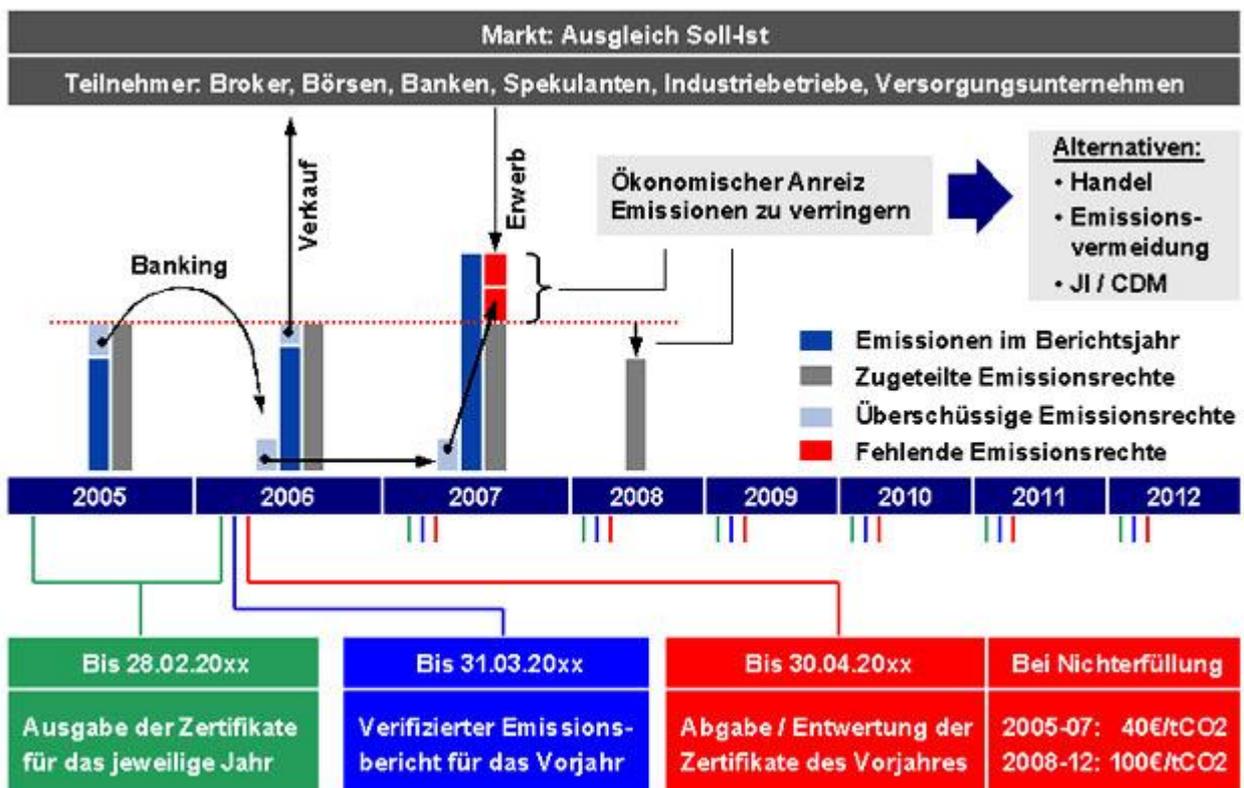


Abb. 12.9: Prinzip des Emissionsrechtehandels  
(aus Fichtner [http://www.emissionshandel-fichtner.de/handel\\_emissionsrechte.html](http://www.emissionshandel-fichtner.de/handel_emissionsrechte.html))

In der Bundesrepublik Deutschland wurde das Europäische Emissionshandelssystem termingerecht 2005 eingeführt. Basierend auf den europarechtlichen Grundlagen - Emissionshandelsrichtlinie und der so genannten "Linking Directive" - existiert in Deutschland ein umfangreicher Rechtsrahmen, der die Elemente Treibhausgasemissionshandelsgesetz (TEHG), Zuteilungsgesetz 2007 (ZuG 2007) und Projektmechanismengesetz (ProMechG) sowie verschiedene Verordnungen enthält. Der Emissionshandel erfasste in Deutschland (2005 – 2007) rund 55 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen und war damit das zentrale klimaschutzpolitische Instrument. 2006 wurde von der Bundesregierung der Nationale Allokationsplan für die zweite Handelsperiode 2008 – 2012 (NAP II) vorgelegt. In der zweiten Handelsperiode wurde die Gesamtzuteilung gegenüber der ersten Handelsperiode um 57 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr verringert. Die jährliche Zuteilungsmenge für den Emissionshandelssektor wurde auf 451,86 Mio. t CO<sub>2</sub> begrenzt. Im Dezember 2007 beschlossen die EU-Staaten eine Ausdehnung des Emissionshandels auf den Luftverkehr. Demnach müssen sämtliche Flugge-

sellschaften, die in den Mitgliedsländern der EU starten oder landen wollen, ab dem Jahr 2012 Emissionsrechte erwerben.

### **Versteigerung von Emissionsberechtigungen in der Zuteilungsperiode 2008 - 2012**

Seit dem Jahr 2010 wird der bisherige Verkauf von einem Teil der Emissionsberechtigungen von einem Versteigerungsverfahren abgelöst. Mit in Kraft treten der Emissionshandels-Versteigerungsverordnung und der Beauftragung der KfW als Anbieter der Zertifikate an der Leipziger Strombörse sind die Grundlagen für die Versteigerung von Emissionsberechtigungen geschaffen worden. 2009 waren 1656 Anlagen (1103 Energie, 553 Industrie) emissionshandlungspflichtig, 1625 erhielten Anlagen eine kostenlose Zuteilung (*DEHSt 2010*). Die emissionshandlungspflichtigen Anlagen in Deutschland haben 2009 9,4 % weniger CO<sub>2</sub> emittiert als 2008. 2010 erhielten rund 1.600 Anlagenbetreiber kostenlos ca. 390 Millionen Emissionsberechtigungen aus dem jährlichen deutschen Budget von insgesamt 451,86 Millionen Emissionsberechtigungen.

Die Versteigerungen werden in den Jahren 2010 und 2011 wöchentlich an der Leipziger Energiebörse EEX (European Energy Exchange) durchgeführt. In dem genannten Zeitraum werden zwischen Januar und Oktober in separaten Terminen 300.000 Berechtigungen zur sofortigen Erfüllung (Spotgeschäft) und 570.000 Berechtigungen zur Lieferung im Dezember des laufenden Jahres (Termingeschäft) angeboten. Ab November jedes Jahres werden von den verbleibenden Berechtigungen wöchentlich 870.000 am Spotmarkt versteigert. Im Zeitraum 2008 - 2009 lagen die Zertifikatspreise an der EEX zwischen 28 und 8 Euro/EU Allowances (Euro/EUA). Zwischen April und Juni 2010 wurden insgesamt 11.310.000 Emissionsberechtigungen (EUA) im Gesamtwert von 169.900.500 Euro versteigert. Dies entspricht einem Durchschnittserlös pro Berechtigung in Höhe von 15 Euro (2. Quartalsbericht 2010 DeHSt).

Das Zuteilungsgesetz 2012 (ZuG 2012) regelt die Zuteilung von Emissionsberechtigungen an Anlagenbetreiber, die aufgrund des Treibhausgas-Emissionshandelsgesetzes (TEHG) in den Emissionshandel eingebunden sind. Neben der kostenlosen Zuteilung sieht das Zuteilungsgesetz (ZuG) 2012 auch eine Veräußerung von Teilen der Gesamtzuteilungsmenge vor. Das Volumen beläuft sich auf 40 Millionen Berechtigungen zuzüglich der Berechtigungen, die notwendig sind, um die Kosten zu decken, die dem Bund durch die Wahrnehmung seiner Aufgaben in Zusammenhang mit dem Emissionshandel entstehen. Dabei ist für die Veräußerung spätestens ab dem Jahr 2010 ein Versteigerungsverfahren anzuwenden. In der 2009 in Kraft getretenen Emissionshandels-Versteigerungsverordnung 2012 (EHVV 2012) sind das Verfahren, die angebotenen Mengen und Termine, die Abwicklung sowie Berichtspflichten und die Überwachung der Versteigerungen geregelt. Außerdem wird die zuständige Stelle, UBA/DEHSt, festgelegt. Für die Zeit nach 2012 sieht die EU-Emissionshandelsrichtlinie Auktionierung als die Grundzuteilungsregel vor. Die Debatte um die konkrete Ausgestaltung ist derzeit in vollem Gange. Im Laufe des Jahres 2010 soll dazu eine EU-Versteigerungsverordnung verabschiedet werden (<http://www.dehst.de/>).

### **12.5 Kohlendioxidabscheidung und -Speicherung (CCS)**

Da ein großer Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe stammt, werden - neben einer kontinuierlichen Verbesserung der Wirkungsgrade und Umstellung auf CO<sub>2</sub>-ärmere Brennstoffe - auch Möglichkeiten zur CO<sub>2</sub>- Abscheidung und -Speicherung untersucht. Carbon Capture and Storage (CCS) ist der Fachbegriff für die Kohlendioxidabscheidung und -speicherung („Sequestrierung“).

Ein Sonderbericht des *IPCC 2005* (Special Report 2005) hat aufgezeigt, dass bis 2050 etwa 20 – 40 % der weltweiten Kohlendioxidemissionen zu „akzeptablen“ Kosten abgeschieden und deponiert werden könnten. Das Bundeswirtschaftsministerium (BMWA) hat ebenfalls eine Studie zu CO<sub>2</sub>-Reduktionstechniken (COORETEC, Entwicklungskonzept für emissionsarme fossilbefeuerte Kraftwerke, 2003, [www.cooretec.de](http://www.cooretec.de)) erstellt, in welcher Wege zu einem emissionsarmen und langfristig emissionsfreien Kraftwerk auf Basis fossiler Energie aufge-

zeigt werden sollen. Ziel ist es, bis 2020 die Kosten der Rückhaltung auf ca. 20 bis 30 US\$/t CO<sub>2</sub> zu begrenzen und gleichzeitig die Effizienz auf 53 % bei Kohle und 61 % bei Gas zu steigern. Auch die EU-Kommission will die Clean Coal Techniken zu einem Schwerpunkt ihrer Forschungsförderung machen ([www.euro-cleancoal.net](http://www.euro-cleancoal.net)).

Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung wird in verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsprojekten weltweit auf ihre Anwendung vorangetrieben. Insbesondere USA ist hier mit der 2001/02 gestarteten Clean Coal Power Initiative (CCPI) mit 2 Mrd. US\$ für das 10-jährige FuE-Programm führend tätig ([www.netl.doe.gov/technologies/carbon\\_seq/](http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/)). Für Europa sei stellvertretend für eine ganze Reihe von Forschungsprojekten das Forschungs- und Entwicklungsprojekt EnCap/SP3 (Enhanced Capture technologies) mit Beteiligung von 30 Unternehmen bzw. Universitäten und einem Etat von 30 Mio. Euro genannt. Außerdem wird seit 2005 vom Bundeswirtschaftsministerium das deutsche Projekt COORETEC als Teil des 5. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung gefördert. Informationen über die CO<sub>2</sub> Abscheidung stellt das CO<sub>2</sub>net zur Verfügung, in welchem sich 30 Gesellschaften in Europa, USA und Australien zusammengeschlossen haben, um die CCS voranzubringen (<http://www.co2net.eu/public/about.asp>). Auch das Carbon Sequestration Leadership Forum ist eine weitere internationale Initiative, um die Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung voranzubringen (<http://www.cslforum.org/>). Eine europäische Initiative ist das 2005 gegründete ZEP, Zero Emission Platform, in der insbesondere die Energieversorger und Hersteller beteiligt sind.

Für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung in Kraftwerksprozessen kommen im Wesentlichen die drei in Abb. 12.10 dargestellten und in Kap. 12.5.1 beschriebenen Optionen in Betracht.

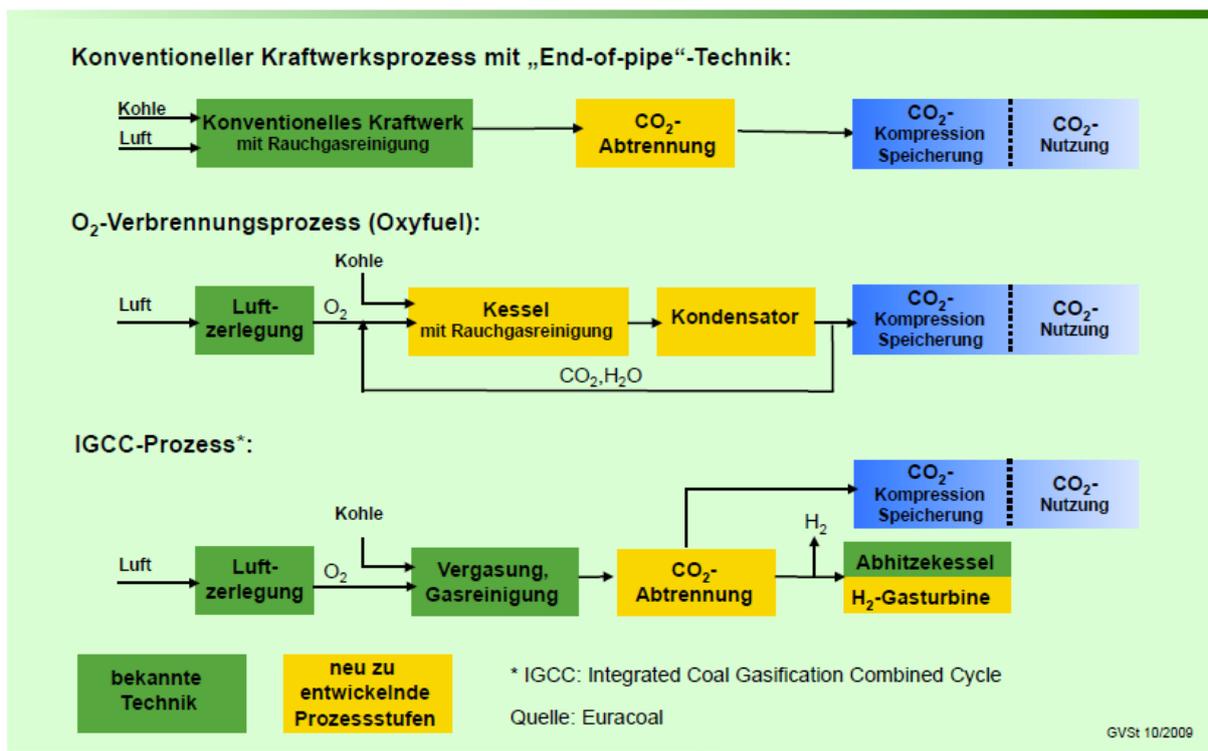


Abb. 12.10: Die drei wesentlichen Optionen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei Kraftwerken: (oben) CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach der Verbrennung, (Mitte) verbesserte CO<sub>2</sub>-Abscheidung durch Verbrennung mit Sauerstoff statt Luft, (unten) CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor der Verbrennung mit IGCC (GVST 2009)

In einer Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats der VGB PowerTech e.V. vom Juni 2010 (VGB 2010) heißt es: „Sollen fossile Primärenergieträger weiter einen wesentlichen Anteil im Stromerzeugungsportfolio behalten, dann ist der Einsatz der CCS-Technologie unumgänglich. Da derzeit kein eindeutiger Vorteil für eine der drei hierzu möglichen Technologien (Pre-Combustion, Oxy-Combustion, Post-Combustion) erkennbar ist, müssen alle drei Technologien weiter entwickelt werden. Im ökologischen wie im ökonomischen Fokus stehen dabei die mit dem Einsatz von CCS verbundenen Wirkungsgradeinbußen. Diese gilt es zu mi-

nimieren. Transport und Speicherung sind technisch grundsätzlich realisierbar und werden in den USA und Kanada zum „Enhanced Oil Recovery“ bereits seit vielen Jahren eingesetzt. Auch die Speicherung wird in einigen Projekten wie im Sleipner-Ölfeld (Nordsee) seit 15 Jahren praktiziert und überwacht.“

Das Gutachten *Energieszenarien 2010* vom August 2010 zum Energiekonzept der Bundesregierung geht von einem kommerziellen Einsatz der CCS ab 2025 aus.

### 12.5.1 Abscheidung von CO<sub>2</sub>

Allen Abscheide-Verfahren gemeinsam ist, dass das CO<sub>2</sub> nach der Abtrennung und Anreicherung noch dehydriert und für den Transport komprimiert werden muss.

#### CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach der Verbrennung (Post-Combustion)

Da auf Grund der derzeitigen Verbrennungstechnologien - Verbrennung des Kohlenstoffes mit Luft - das CO<sub>2</sub> wegen des hohen Anteils an Luftstickstoff im Rauchgas nur sehr verdünnt vorliegt (geringer Partialdruck), ist es nur mit hohem Aufwand aus dem Rauchgas abzuscheiden. Beim Post-combustion-Prozess wird das CO<sub>2</sub> aus dem Abgas mit einem CO<sub>2</sub>-Gastrennverfahren mit Abscheideraten von über 90 % entfernt. Als Abscheideverfahren kommt zurzeit nur die chemische Absorption in Betracht. Hierbei wird das CO<sub>2</sub> in einer Absorptionskolonne aus dem Rauchgas mittels eines geeigneten Absorptionsmittels wie Monoethanolamin (MEA) entfernt. Das in der Aminlösung gelöste CO<sub>2</sub> wird dann durch thermische Desorption aus dem Amin herausgelöst und hochkonzentriert abgetrennt.

Dieses Verfahren greift im Gegensatz zu den weiter unten beschriebenen Techniken am wenigsten in den Kraftwerksprozess ein und wäre damit am ehesten zur Nachrüstung bestehender Kraftwerke geeignet (*DPG Studie 2005*). Eine Nachrüstung bestehender Kraftwerke ist jedoch teuer und führt zu hohen Wirkungsgradverlusten. *McKinsey 2007* geht davon aus, dass sich eine Nachrüstung nur für Kraftwerke lohnt, die nicht älter als zehn bis zwölf Jahre sind. Auf dem Kraftwerksgelände in Maasvlakte in der Nähe von Rotterdam betreibt E.ON eine von mehreren Pilotanlagen zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung. EnBW betreibt mit der Uni Stuttgart seit 2008 in einer Versuchsanlage das Carbonate-Looping-Verfahren mit Kalk als Abscheidematerial. Im Herbst 2010 soll in Heilbronn eine zweite Testanlage mit Aminwäsche in Betrieb gehen (PM 27.7.2010, [www.enbw.com](http://www.enbw.com)). Seit 2007 fährt EnBW im Rheinhafen-Dampfkraftwerk in Karlsruhe zusammen mit dem Forschungszentrum Jülich Versuche mit Membranen aus Polymeren und Keramik zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung.

#### Verbrennung mit Sauerstoff (Oxyfuel-Prozess)

Beim Oxyfuel-Prozess erfolgt die Verbrennung mit reinem Sauerstoff, um den Luftstickstoffgehalt im Abgas zu vermindern und nahezu reines CO<sub>2</sub> zu produzieren. Zur Begrenzung der hierbei auftretenden hohen Verbrennungstemperaturen wird das bereits abgekühlte Rauchgas wieder in die Brennkammer zurückgeleitet. Aus dem CO<sub>2</sub>-Wasserdampf-Gemisch kann das CO<sub>2</sub> durch Auskondensieren des Wassers abgetrennt werden. Als Innovation in der Stromerzeugung wird ebenfalls die Entwicklung einer Gasturbine gesehen, welche das produzierte CO<sub>2</sub> als Turbinenarbeitsmittel nutzen soll, bevor es schließlich verflüssigt oder mineralisiert wird. Für das Oxyfuel-Verfahren ist eine Luftzerlegungsanlage erforderlich (Stand der Technik); es wird jedoch untersucht, sauerstoffdurchlässige Membranen kostengünstiger zu entwickeln, die den Sauerstoff aus der Luft abtrennen können. Mit dem Bau des weltweit ersten Oxyfuel-Pilotkraftwerkes mit Braunkohlefeuerung (30 MW<sub>th</sub>) wurde Ende Mai 2006 von Vattenfall in Spremberg (Schwarze Pumpe) begonnen (*Vattenfall 2006*). Im September 2008 nahm Vattenfall die Anlage in Betrieb. Geplant ist, das abgeschiedene CO<sub>2</sub> per Tankwagen in die Altmark zu bringen. Insgesamt sollen so über einen Zeitraum von drei Jahren 100.000 Tonnen CO<sub>2</sub> in ein Erdgasfeld zur Erhöhung der Gasausbeute gepumpt werden. Das erste Demonstrationskraftwerk zum Oxyfuel-Verfahren mit einer el. Leistung von 250 MW soll von Vattenfall im brandenburgischen Jänschwalde 2015 in Betrieb genommen werden (29.10.2010, [www.vattenfall.de](http://www.vattenfall.de)).

#### CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor der Verbrennung mit IGCC (Pre-Combustion)

Bei diesem Verfahren wird der Brennstoff Kohle zunächst in einem IGCC-Kraftwerk (Integrated Gasification Combined Cycle) vergast und das hierbei gebildete CO mit Wasserdampf zu Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Kohlendioxid umgewandelt. Danach werden die Hauptbestandteile CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> getrennt. Der Wasserstoff wird dann in einer Gasturbine verbrannt, ein nachgeschalteter Abhitzeessel erzeugt Dampf für die Dampfturbine. Fünf Kohlevergasungs-Demonstrationskraftwerke sind weltweit mit noch einigen Verfügbarkeitsproblemen und hohen Investitionskosten bereits in Betrieb (*VGB 2004, DPG 2005*). RWE intensiviert mit Projektpartnern (Projekt ENCAP) die Forschung am Kombi-Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung und CO<sub>2</sub>-Abscheidung. Außerdem plante RWE, eine großtechnische Anlage mit 400 - 450 MW etwa 2015 in Betrieb zu nehmen ([www.rwe.com/kraftwerk/igcc-kraftwerk/](http://www.rwe.com/kraftwerk/igcc-kraftwerk/)). Der Zeitplan kann jedoch nach Angabe der RWE wegen des fehlenden Rechtsrahmens und Speichermöglichkeit nicht eingehalten werden.

Allen Abscheide-Konzepten gemeinsam ist derzeit ein großer zusätzlicher apparativer Aufwand, verbunden mit erheblichen Wirkungsgradverlusten von 8 bis 13 %-Punkten für die Stromerzeugung. Da sich viele Verfahren noch in einem sehr frühen Stadium der Entwicklung befinden, sind technisch-kommerzielle Daten nur in geringem Umfang vorhanden bzw. mit großen Unsicherheiten behaftet.

Während Vattenfall auf die Entwicklung der Oxy-Fuel-Technologie setzt, will RWE darüber hinaus die IGCC-Variante entwickeln. Das RWE-Kraftwerk am Standort Goldenbergwerk in Hürth bei Köln soll als erste großtechnische Anlage eine Bruttoleistung von 450 MW haben, jährlich 2,8 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> abscheiden und im Untergrund speichern und 2014 ans Netz gehen.

E.ON betreibt in Rotterdam in den Niederlanden und im Kraftwerk Staudinger bei Hanau jeweils eine von mehreren Pilotanlagen zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung.

### 12.5.2 Transport des abgeschiedenen CO<sub>2</sub>

In einem 425 MW (el) Kohlekraftwerk fallen bei einer Auslastung von 85 % und 90 % Abscheidung pro Jahr ca. 2,1 Mio. t CO<sub>2</sub> an. Das CO<sub>2</sub> wird nach der Abscheidung vor dem Transport und der Speicherung komprimiert und verflüssigt. Für den Transport des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> kommt unter ökonomischen Gesichtspunkten nur der Transport per Schiff oder in Pipelines in Frage. Sowohl die Gaskonditionierung als auch der CO<sub>2</sub>-Transport benötigen einen erheblichen Energieaufwand, in der Regel Strom als Kompressions- bzw. Kühlenergie. Für die CO<sub>2</sub>-Verdichtung sind beim gegenwärtigen Stand als Äquivalent dafür rund 2,0 %-Punkte (bei Gaskraftwerken) bis 3,5 %-Punkte (bei Kohlekraftwerken) an Wirkungsgradverlusten im Kraftwerk anzusetzen. Für den CO<sub>2</sub>-Transport schwanken die Kostenangaben in Abhängigkeit von Transportentfernung und Transportkapazität von 2 bis 7 €/t CO<sub>2</sub> (*Wissel 2008*).

#### Transport per Schiff

Hier erfolgt der Transport in flüssiger Form. Auf Erfahrungen mit Flüssiggastransporten kann zurückgegriffen werden. Die für den Transport von Flüssiggas (LPG) verwendeten Schiffe sind als druckdichte und gekühlte Systeme für den Flüssiggastransport von CO<sub>2</sub> geeignet ([www.co2geonet.com](http://www.co2geonet.com)). Zwischenspeicher für das von den Kraftwerken angelieferte CO<sub>2</sub> sind erforderlich.

#### Transport in Pipelines

Hierzu wird das CO<sub>2</sub> vor dem Transport in den superkritischen Zustand (> 73 bar, i. Allg. werden Drucke > 100 bar angewendet) überführt. Hinsichtlich des Transports in Pipelines liegen bereits Erkenntnisse, insbesondere aus den USA, vor. In den USA existiert beispielsweise ein 5.000 km langes CO<sub>2</sub>-Pipelinennetz, das im Rahmen des Enhanced-Oil-Recovery-Verfahrens seit über 30 Jahren erfolgreich genutzt wird ([www.iz-klima.de](http://www.iz-klima.de)).

### 12.5.3 Speicherung

Zur Speicherung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> wird eine Reihe von Möglichkeiten diskutiert (Abb. 12.11):

#### Speicherung in geologischen Formationen

Das CO<sub>2</sub> wird in Aquifere - im Allgemeinen Salzwasser enthaltende Schichten aus porösem Gestein - bzw. in nicht mehr abbauwürdige Öl- und Erdgasfelder oder auch Kohleflöze eingeleitet. Bei Einleitung in Öl- und Erdgasfelder kann zusätzliches Öl bzw. Erdgas, bei Einleitung in Kohleflöze Methan ausgetrieben und genutzt werden. Die Kapazität von Salzwasser-Aquifere ist erheblich und liegt bei Hunderten bis Tausenden von Gigatonnen CO<sub>2</sub> (*DPG-Studie 2005*). Weltweit gibt es bisher drei großskalige CO<sub>2</sub>-Speicherprojekte mit über 1 Mio. t gespeichertem CO<sub>2</sub> pro Jahr (Norwegen: Sleipner, Algerien: In-Salah, Kanada: Weyburn). Beim von Statoil betriebenen Sleipner-Projekt werden seit 1996 jährlich rund 1 Mio. t CO<sub>2</sub> in die geologische Speicherformation „Utsira“ unterhalb des Meeresbodens der Nordsee injiziert. ([www.bmu.de](http://www.bmu.de)). Ein CO<sub>2</sub>-Speicherprojekt CO<sub>2</sub>SINK des GFZ (Geoforschungszentrum Potsdam) wird in Ketzin, Brandenburg, mit Mitteln der EU durchgeführt. Seit Juli 2008 wird reines CO<sub>2</sub> in eine etwa 800 Meter tiefe geologische salzwasserführende Gesteinsformation injiziert. Insgesamt wollen die Forscher über einen Zeitraum von zwei Jahren 60.000 Tonnen Kohlendioxid in den Untergrund pumpen.

Im ebenfalls EU-finanzierten Projekt RECOPOP wurde 2004/5 täglich bis zu 20 t Kohlendioxid tausend Meter tief in Kohleflöze des schlesischen Kohlebeckens Polens eingepresst. Neben der technischen soll auch die wirtschaftliche Machbarkeit untersucht werden. Neben den Lagerungsmöglichkeiten an Land (onshore) bietet sich auch eine Lagerung in geologischen Formationen unterhalb des Meeresbodens (offshore) etwa in der Nordsee an. Die North Sea Basin Task Force schätzt, dass das Nordseebecken einen hohen Anteil der gesamten europäischen Emissionen über einen langen Zeitraum aufnehmen kann.

Nach *Dürr 2009* beläuft sich die Schätzung des deutsche Speichervolumen auf 22,7 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> in salinen Aquifere, 2,7 Milliarden Tonnen in Gasfeldern, 110 Millionen Tonnen in Ölfeldern sowie 360 Mio. bis 1,67 Mrd. Tonnen in tiefen Kohleflözen. Durch Einsatz der untertägigen Kohlevergasung könnte sich dieses Potenzial verdreifachen. Die überschlägige Lagerungskapazität der deutschen Aquifere und entleerten Erdgaslagerstätten beläuft sich auf das 40- bis 90-fache der jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen im deutschen Kraftwerkspark (ca. 350 Mio. t/Jahr). Nach *VGB 2010* besteht weiterer Forschungsbedarf bei der Speicherung in salinen Aquifere und im Hinblick auf deren Akzeptanz.

#### Speicherung im Meer

Zur Speicherung im Meer wird das CO<sub>2</sub> in flüssiger Form entweder in mittlere Tiefen von 1.000 bis 2.000 m eingeleitet, so dass es sich dort mit dem Meerwasser vermischt, oder es wird in Tiefen ab etwa 3.000 m eingeleitet, von wo es aufgrund der im Vergleich zum Meerwasser höheren Dichte zum Meeresgrund sinkt. Aufgrund ökologischer Bedenken und mangelnder öffentlicher Akzeptanz erscheint die CO<sub>2</sub>-Speicherung im Meer als Option fraglich. Der *WBGU 2006* spricht sich gegen eine Speicherung im Meer aus.

#### Speicherung als Karbonat

Bei dieser Speicherart ist vorgesehen, CO<sub>2</sub> durch Reaktion mit Silikaten, vorzugsweise Magnesiumsilikat, als Karbonat zu binden. Das hierfür erforderliche Mineral ist weltweit in genügender Menge vorhanden und kann in Tagebauen abgebaut werden. Die großen Massenströme, die zur Einbindung und zum Abtransport des im Kraftwerk abgeschiedenen CO<sub>2</sub> bewegt werden müssen, und der hohe Energieverbrauch sind wesentliche Nachteile des Verfahrens. Deshalb scheint die mineralische Einbindung von CO<sub>2</sub> den alternativen Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Speicherung unterlegen zu sein.

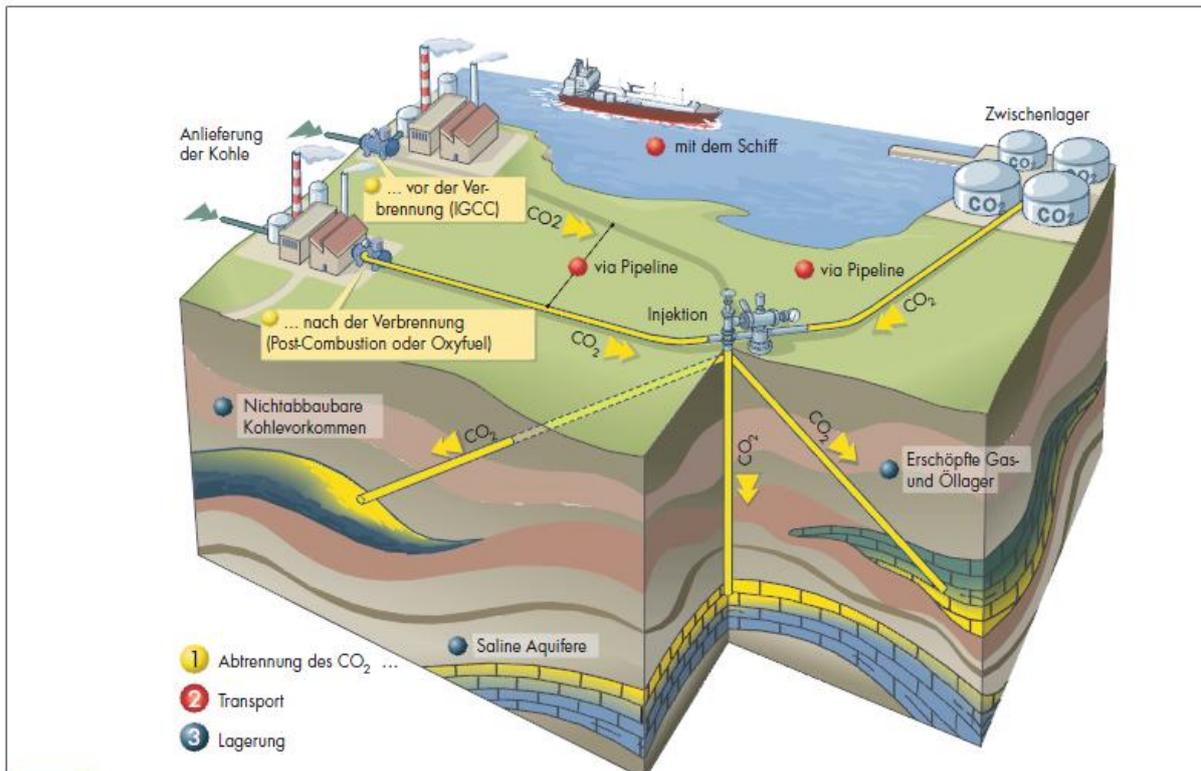


Abb. 12.11: Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung des aus Kraftwerken abgeschiedenen Kohlendioxids (<http://www.bine.info/pdf/infoplus/Kohlendioxidabtrennenundlagern.pdf>)

#### 12.5.4 Umwandlung/Nutzung von CO<sub>2</sub>

Hinsichtlich der Umwandlung/Nutzung von CO<sub>2</sub> gibt es ebenfalls mehrere Möglichkeiten, wobei diese Option jedoch nur ein sehr eingeschränktes Nutzungspotential bietet. Eine Möglichkeit der industriellen Umwandlung/Nutzung ist der Einsatz von CO<sub>2</sub> zur Synthese technischer Stoffe. Hierzu zählen z.B. die Harnstoffsynthese oder die Methanolsynthese. Ebenfalls ist die Algenzucht durch Einleitung von CO<sub>2</sub> eine (Option jedoch nur für relativ geringe Mengen). Pilotversuche werden von EnBW und RWE unterstützt.

Die meisten der oben genannten Verfahren sind bislang nur theoretisch entwickelt oder befinden sich noch im Anfangsstadium der Erprobung. Viele Fragen - auch nicht-technischer Art - sind noch offen, z.B. die Frage der genehmigungsrechtlichen Situation bei der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung oder die Sicherheit und die ganz entscheidende Frage über die Zeitdauer des CO<sub>2</sub>-Einschlusses. Im Allgemeinen wird das Risiko von Pipeline-Leckagen als gering angesehen; daher konzentriert sich die Diskussion auf die Speicherdichtigkeit, d.h. ob und in welchem Umfang die verpressten CO<sub>2</sub>-Mengen wieder an die Oberfläche geraten. Das IPCC geht bei sorgfältig explorierten und überwachten Lagerstätten von einer 99%igen Speichersicherheit über 100 oder 1.000 Jahre aus; in Deutschland wird eine maximale jährliche Leckage von 0,01% gefordert, entsprechend einer Speichersicherheit von 10.000 Jahren.

In Deutschland ist ein Artikelgesetz in Vorbereitung, das die gesamte CCS-Kette regeln soll. Die Kerninhalte sind weitgehend durch die europäische CCS-Richtlinie vorgegeben (Umsetzungsfrist bis 25.06.2011). Geregelt werden die Zulassung von Abscheidungsanlagen und die Freihaltung von Flächen für solche Anlagen bei neuen Kraftwerken. Das Gesetz regelt auch die Zulassung von CO<sub>2</sub>-Pipelines sowie den Zugang zu Leitungsnetzen und Speichern. Für die CO<sub>2</sub>-Speicherung in Demonstrationsvorhaben werden die Genehmigungspflicht für die Erkundung geeigneter Speicherstätten, sowie die Planfeststellung mit UVP für die Zulassung von CO<sub>2</sub>-Speichern geregelt. Das Gesetz kam im Juli 2010 zur Ressortabstimmung innerhalb der Bundesregierung und soll Anfang 2011 in Kraft treten ([http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle\\_pressemitteilungen/pm/46226.php](http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/pm/46226.php)).

### 12.5.5 Kostenabschätzung

Kostenabschätzungen für Abscheidung, Transport und Speicherung des CO<sub>2</sub> weisen mit etwa 20 bis 60 €/t vermiedenen Kohlendioxids eine große Bandbreite auf (VGB PowerTech 2004). Der größte Anteil hiervon (etwa 15 bis 40 €/t) entfällt auf die CO<sub>2</sub>-Abscheidung. Für das Braunkohlekraftwerk mit Oxyfuel-Feuerung wird von Vattenfall mit einem Wirkungsgradverlust von 8,7 Prozentpunkten gerechnet (Strömberg 2004). Die Kosten für Transport und Speicherung werden von der Cooretec-Arbeitsgruppe (Cooretec 2003) in Deutschland auf etwa 10 – 24 € pro Tonne CO<sub>2</sub> geschätzt (0,8-2,0 € Cent/kWhel). Der IPCC Special Report, SRCCS 2005 nennt eine Erhöhung der Stromerzeugungskosten für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung mit Transport und Lagerung je nach Anlage und Brennstoff zwischen 21 und 91 % im Bereich von 0,043-0.099 US\$/kWh. Die Kosten für die vermiedene Tonne Kohlendioxid läge bei 14 – 91 US\$. Dürr 2009 nennt eine Kostensteigerung bis zu Doppelten gegenüber Kraftwerken ohne CCS (Abb. 12.12), gleichzeitig wird der Wirkungsgrad um 7 – 12 Prozentpunkte vermindert. Die Abb. 12.2 gibt einen Vergleich der Wirkungsgrade, der Investitions- und Stromerzeugungskosten für Kraftwerke mit und ohne CO<sub>2</sub> Abtrennung. Der hohe Wirkungsgradverlust bei Einführung von CCS und die starke Erhöhung der Stromerzeugungskosten werden deutlich.

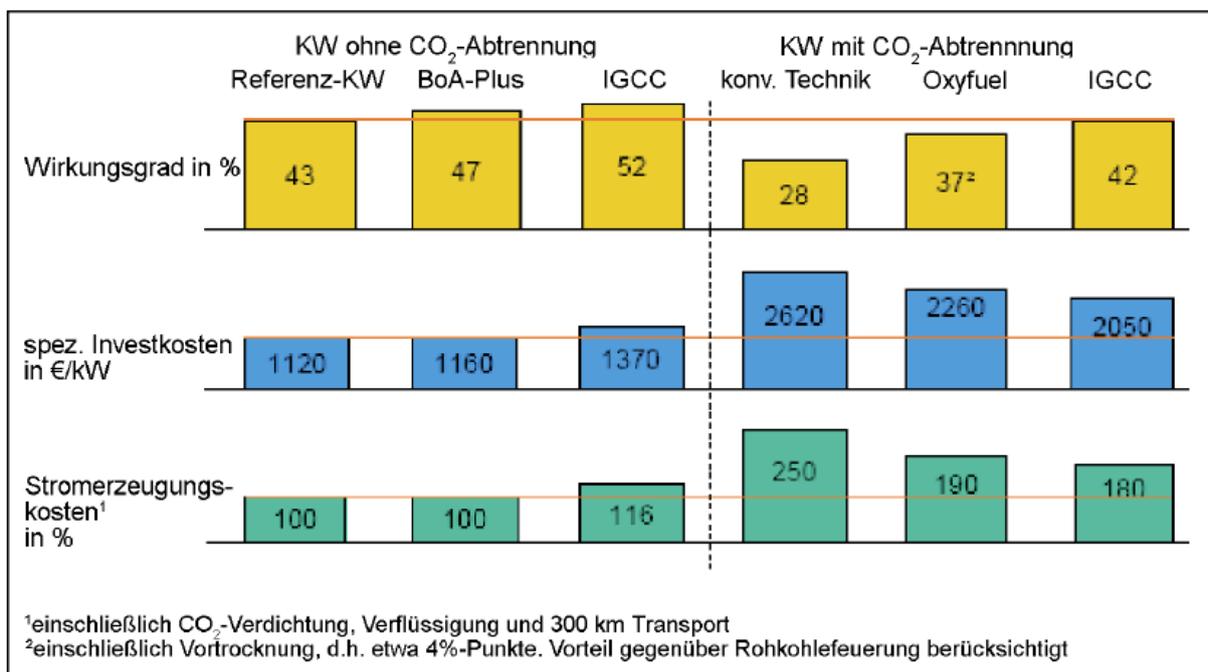
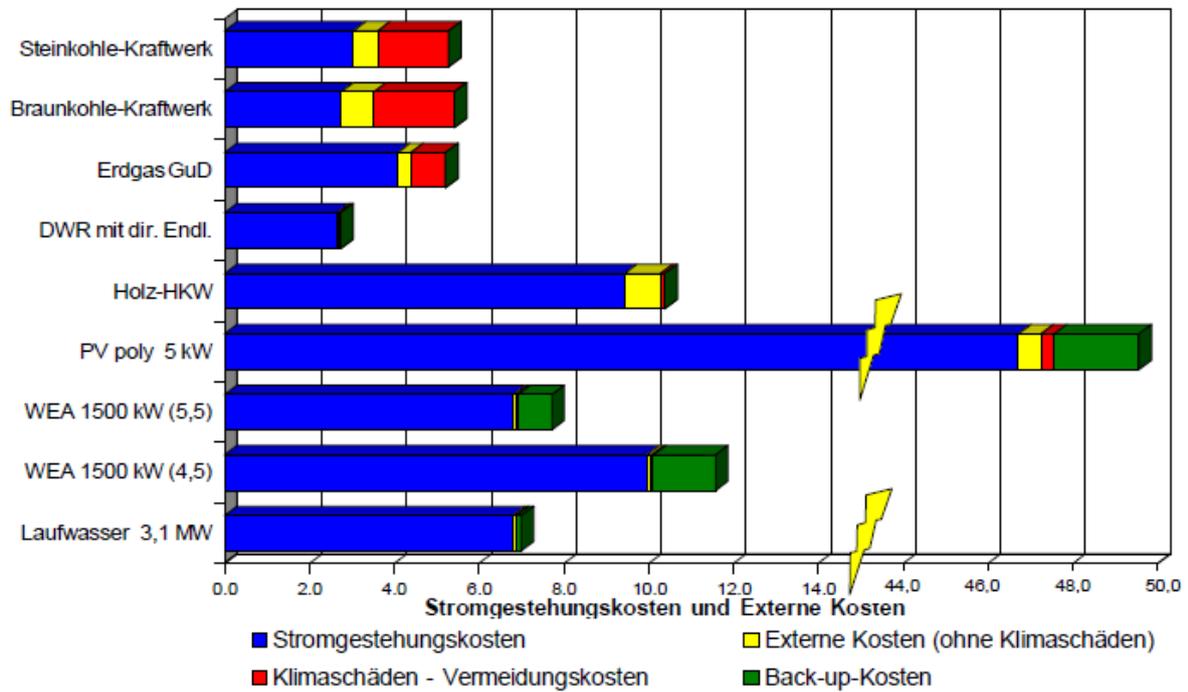


Abb.12.12: Wirkungsgrad, Investitions- und Stromerzeugungskosten für Kraftwerke mit und ohne CO<sub>2</sub> Abtrennung, ([http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien/energie\\_2010.pdf](http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien/energie_2010.pdf))

Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten für CCS-Kohle-Kraftwerke werden zwischen 12 und 72 €/t beziffert; längerfristig schätzt die IEA die Vermeidungskosten auf 25 bis 43 €, McKinsey 2007, 2009 auf 30 bis 48 € je Tonne CO<sub>2</sub> (Abb. 12.14). BMU 2007 nennt CCS Gesamtkosten für Kohlekraftwerke von derzeit von 50-70 € pro Tonne CO<sub>2</sub>. Bei entsprechenden technologischen Anstrengungen und Entwicklungen wird eine Senkung dieser Kosten auf 20 bis 30 € als optimistisch, aber möglich eingeschätzt.

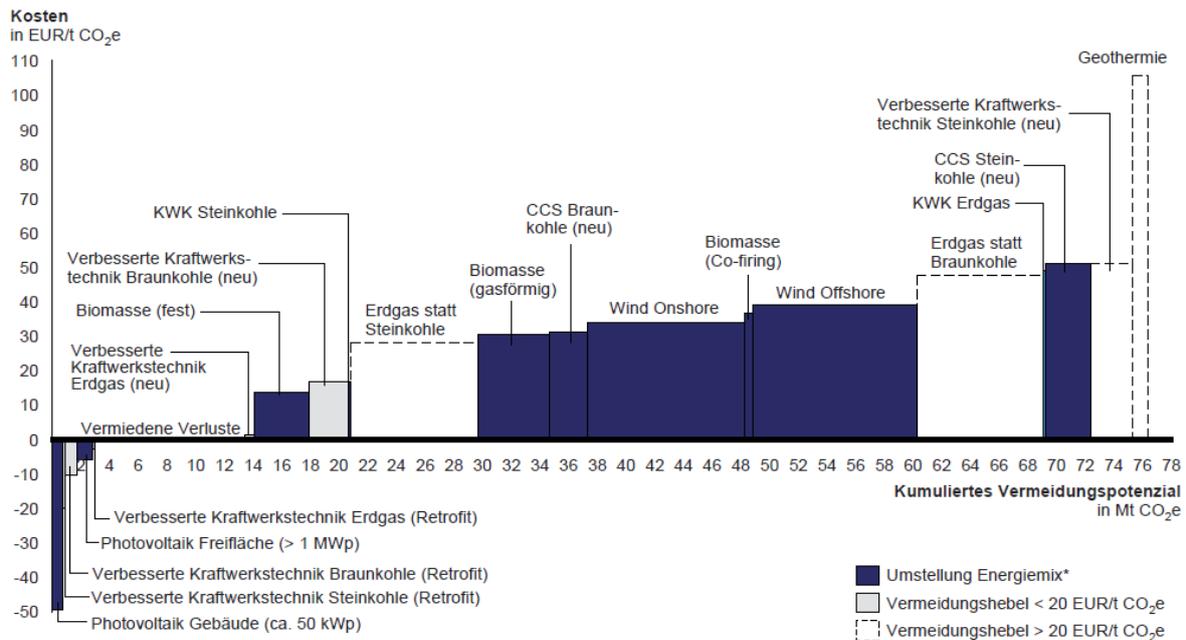
Obwohl bereits eine große Anzahl theoretischer und praktischer Untersuchungen – teilweise schon seit vielen Jahren – stattgefunden haben bzw. stattfinden, wird jedoch die großtechnische Abscheidung und die Speicherung von CO<sub>2</sub> nicht vor 2020 als Stand der Technik bezeichnet werden können.



Quelle: IER 03/09

Abb. 12.13: Vollkosten für verschiedene Stromerzeugungsarten incl. Klimaschäden und externe Kosten (Quelle: Voss 2009, (<http://www.ipaa.de/downloads/st09prof.-dr.-voss.pdf>), (Anmerkung des Verfassers: PV poly 2010 bei ca. 30 ct/kWh)

Die Photovoltaik ist allen Studien nach die Stromerzeugungstechnik mit den höchsten Erzeugungskosten (ohne Berücksichtigung EEG) und höchsten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten - jedoch mit fallender Tendenz. Die Modulkosten für PV-Module haben jedoch seit etwa 2006 einen rasanten Preisverfall durch bessere Fertigungsmethoden und weniger Rohstoff- und Energieverbrauch erlebt, so dass 2010 die Stromerzeugungskosten bei ca. 30 ct/kWh liegen. Die *Mc Kinsey Studie 2007*, ergänzt 2009 (Abb. 12.14) hat die CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten im Energiesektor bei Beibehaltung der EEG Förderung berechnet. Danach liegen die CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten für CCS zwischen 30 und 50 €/kW, während die Photovoltaik aufgrund der EEG Förderung negative Vermeidungskosten in Höhe von ca. 50 € pro kW aufweist. Je stärker die Einspeisevergütung gekürzt wird, je geringer wird dieser Betrag.



\* Bei Beibehaltung Kernkraftausstieg und unter Berücksichtigung der Förderung von erneuerbaren Energien (EEG), inkl. 6 Mt CO<sub>2</sub>e aus CCS-Pilotprojekten

Quelle: Studie "Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland" von McKinsey & Company, Inc., im Auftrag von "BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz" – AG Energie

Abb. 12.14: CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten im Energiesektor bei Beibehaltung der EEG Förderung aus Entscheidersicht (Quelle: Mc Kinsey Studie 2009),

**Fazit:** Entscheidendes Kriterium für die Durchsetzung der Clean-Coal-Techniken werden die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten im Vergleich zu alternativen CO<sub>2</sub>-Vermeidungstechniken sein. Die bisher vorliegenden Kostenabschätzungen zeigen, dass trotz der zusätzlichen Kosten für CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung das CO<sub>2</sub>-freie bzw. -arme Kohlekraftwerk deutlich günstiger sein kann als viele alternative Energieerzeugungsarten. Voraussetzung ist allerdings, dass eine geeignete Speichermöglichkeit und die dafür erforderliche gesellschaftliche Akzeptanz zur Verfügung stehen. Die Abbildungen 12.12, 12.13 und 12.14 zeigen die Bandbreite der Abschätzungen der spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten in € pro t CO<sub>2</sub> für Kernenergie, fossile Energien (Kohle, Öl, Gas) und erneuerbare Energien (Wasser, Wind, Sonne und Biomasse).

## 13 Resümee

Die Literaturrecherche hat aufgezeigt, dass, obwohl noch viele Fragen offen sind und zahlreiche Unsicherheiten bestehen, die Klimawissenschaft sich über den anthropogenen Beitrag zur Klimaerwärmung der vergangenen Jahrzehnte einig ist. Die Klimamodellrechnungen für die nächsten Jahrzehnte ergeben alle trotz großer Schwankungsbreite in den Ergebnissen mit steigenden anthropogenen Emissionen weitere, regional unterschiedliche Klimaänderungen.

Die zu erwartenden Klimaänderungen stellen langfristig ein ernst zunehmendes Problem dar, das aber nur global angegangen werden kann. Die Erfüllung des Kyoto-Protokolls kann deswegen nur ein erster Schritt sein, da es, wie Rechnungen gezeigt haben, praktisch keine Verringerung der zu erwartenden Klimaänderungen bringt. Insbesondere da die globalen Treibhausgasemissionen seit 1990 um über 20 % angestiegen sind. Die Gesamtemissionen der Industrieländer sind dagegen im Zeitraum 1990 – 2007 um 3,9 % zurückgegangen und die 36 am Kyoto-Protokoll teilnehmenden Industriestaaten haben die Verpflichtung zur Reduzierung der Treibhausgase um im Mittel 5 % bis 2008 - 2012 im Jahre 2008 mit -15,9 % bereits übererfüllt. Die EU-27 hat in 2009 ca. 17,3 % Minderung und Deutschland 29 % erreicht. Die hohen Zuwachsraten bei den Treibhausgasen finden sich heute vor allem in den sich schnell entwickelnden Ländern in Asien. China hat in den vergangenen 15 Jahren seine

Kohlendioxidemissionen verdoppelt, und die Entwicklungs- und Schwellenländer werden in einigen Jahren die Industriestaaten überholt haben. Ohne Einbeziehung dieser Länder ist angesichts der hohen Zuwachsraten ein wirksamer Klimaschutz nicht möglich. Zur Einhaltung des 2 Grad Zieles müssen alle Staaten – Industrie- und Entwicklungsländer – in den nächsten Jahren weitere Schritte unternehmen, um dieses Ziel zu erreichen.

## 14 Glossar

**Absorption von Strahlung:** Aufnahme von Strahlungsenergie durch einen festen Körper, eine Flüssigkeit oder ein Gas; hierbei wird die Energie aufgenommen und in eine andere Energieform, meist in Wärme, umgewandelt.

**Absorptionsbanden:** Spezieller Wellenlängenbereich des elektromagnetischen Spektrums, in dem die Strahlungsenergie durch spezifische Eigenschaften von in der Atmosphäre enthaltenen Gasen markant absorbiert wird. Aufgrund des unterschiedlichen molekularen Aufbaus verschiedener chemischer Substanzen wird nicht das gesamte Spektrum der Strahlung, sondern ein für jede Verbindung spezifischer Ausschnitt des Spektrums absorbiert (Absorptionsbanden).

**Aerob:** In Gegenwart von Sauerstoff, unter Luftzutritt lebend (Gegensatz: anaerob).

**Aerosol:** Feste oder flüssige Teilchen in der Luft, außer Wasser- und Eispartikeln, im Größenbereich zwischen 0,01 und 10 µm, die mindestens einige Stunden in der Atmosphäre bleiben. Sie beeinflussen das Klima direkt durch Streuung und Absorption sowie indirekt als Kondensationskeime für die Wolkenbildung oder durch die Veränderung der optischen Eigenschaften und der Lebensdauer der Wolken.

**Albedo:** Reflexionsvermögen; Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Sonnenstrahlung, angegeben für eine bestimmte Oberfläche (z.B. Meeresoberfläche und pflanzenbedeckte Oberfläche (niedere Albedo) oder Schnee (hohe Albedo)). Eine Erhöhung der Albedo wirkt dem Treibhauseffekt entgegen.

**Anaerob:** Unter Luftabschluss lebend (Gegensatz: aerob).

**Annex I Länder:** 36 Industriestaaten (OECD Staaten) und Transformationsländer (Ökonomien im Übergang), die im Annex I der UN Klimarahmenkonvention (UNFCCC) aufgeführt sind. Nicht-Annex I-Länder sind die Entwicklungs- und Schwellenländer.

**Annex II-Länder:** Die Gruppe von Ländern, die im Anhang II des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) aufgeführt ist und alle OECD-Staaten des Jahres 1990 umfasst.

**Annex B Länder:** 39 Industriestaaten und Transformationsländer (Ökonomien im Übergang), die im Annex B des Kyotoprotokolls aufgeführt sind und sich zu einer rechtlich bindenden Emissionsreduktion verpflichtet haben (ohne USA).

**Anthropogen:** Durch den Menschen beeinflusst, verursacht oder ausgelöst.

**Archimedisches Prinzip:** Die Auftriebskraft eines Körpers ist gleich der Gewichtskraft der vom Körper verdrängten Flüssigkeitsmenge. Daraus ergibt sich, dass schmelzendes Eis den Meeresspiegel nicht anhebt.

**Atmosphäre:** Die gasförmige Hülle eines Himmelskörpers, speziell die Lufthülle der Erde.

**Atmosphärisches Strahlungsfenster:** Bereich der Infrarot-Strahlung, in dem der Wasserdampf der Atmosphäre wenig Strahlung absorbiert und die von der Erdoberfläche emittierte (ausgestrahlte) langwellige Strahlung nahezu ungehindert in den Weltraum abgegeben wird. Viele Treibhausgase absorbieren hier die Infrarot-Strahlung stärker, so dass der Konzentrationsanstieg der Treibhausgase zu einer zusätzlichen Erwärmung der Atmosphäre führt.

**Biomasse:** Die gesamte Masse an lebenden Organismen auf einer gegebenen Fläche oder Volumen. Die Biomasse setzt sich zusammen aus der pflanzlichen (Phytomasse) und der tierischen (Zoomasse) Biomasse. Die Masse toter und abgefallener Pflanzenteile wird oft zusätzlich ermittelt und als "tote" Biomasse angegeben.

**Biosphäre:** Teil des Systems Erde, der alle lebenden und toten Organismen in der Atmosphäre, auf dem Land oder im Meer umfasst.

**Bodenerosion:** Die Abtragung des Bodens durch Wasser, Eis, Schnee, Wind und Schwerkraft.

**Brandrodung:** Rodung von Waldflächen unter Einsatz von Feuer zur Vorbereitung landwirtschaftlicher Nutzung. Durch die Umwandlung kohlenstoffreicher Ökosysteme, wie die tropischen Regenwälder, in Flächen mit bedeutend geringeren Kohlenstoffgehalten (z. B. landwirtschaftlich genutzte Flächen) werden erhebliche CO<sub>2</sub>-Mengen freigesetzt und in die Atmosphäre emittiert.

**Bruttoinlandsprodukt (BIP):** Der monetäre Wert aller Güter und Dienstleistungen, die innerhalb eines Landes produziert werden.

**CLIVAR:** Engl. Abkürzung für Climate Variability & Predictability, ein internationales Programm zur Erforschung von Klimavariabilität und -vorhersage in Zeitskalen von Monaten bis Dekaden sowie der anthropogenen Klimabeeinflussung. CLIVAR wurde als eine der wichtigsten Komponenten des World Climate Research Programme 1995 begonnen und hat eine Laufzeit von 15 Jahren.

**CO<sub>2</sub>-Äquivalent:** Treibhausgaswirksamkeit eines Gases, bezogen auf diejenige von CO<sub>2</sub>, die auf 1 festgesetzt wird.

**CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt:** siehe Kohlendioxiddüngung

**CO<sub>2</sub>-Speicherung im Ozean:** CO<sub>2</sub> wird in Wasser in Form von HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> gespeichert. Die maximale Menge ist über das Löslichkeitsprodukt gegeben. Dieses ist das Produkt der Konzentrationen der Anionen und Kationen in der gesättigten Lösung eines Elektrolyten. Des Weiteren ist die gelöste HCO<sub>3</sub>-Menge von der Ionenkonzentration in der Lösung (Meerwasser) abhängig.

**Dengue-Fieber:** Durch Stechmücken der Gattung *Aedes aegypti* von Mensch zu Mensch übertragene Infektionskrankheit der Tropen und Subtropen. Erreger ist das Dengue-Virus; Kennzeichen sind, nach einer Inkubationszeit von 5 bis 8 Tagen, v.a. Fieber, Gelenk- und Muskelschmerzen, Schwellung der Lymphdrüsen sowie Hautausschlag. Jährlich werden etwa 10 Mio. Menschen infiziert. Ein Impfstoff ist in der Entwicklung. Das Dengue-Fieber kann durch lang anhaltende Regenfälle, welche die Entwicklung der Stechmücken fördern, begünstigt werden. Insofern begünstigen El Niño-Episoden mit ihren regional verstärkten Niederschlägen seine Verbreitung.

**Denitrifikation:** Mikrobieller Abbau von Stickstoffverbindungen, d.h. Reduktion von Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) zu atmosphärischem Stickstoff (N<sub>2</sub>) oder zu Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O).

**Deposition:** Ablagerung von luftgetragenen Stoffen auf Oberflächen.

**Easterly Waves:** Bei den Easterly Waves handelt es sich um atmosphärische Wellenstörungen, die als flache tropische Störungen von Ost nach West vom afrikanischen Kontinent Richtung Atlantik wandern. Unter bestimmten Voraussetzungen können easterly waves zudem Geburtsstätten tropischer Wirbelstürme sein.

**Eisbohrkerne:** Wichtige Methode zur Rekonstruktion von Klimaveränderungen. Eisbohrkerne werden in den Zentralbereichen von polaren Eisschilden und Eiskappen gewonnen (Gletschertypen). Man analysiert an Eiskernen die Zusammensetzung der in den kleinen Luftporen des Eises eingeschlossenen Luft, die Aufschluss über die Zusammensetzung der Atmosphäre zum Zeitpunkt der Schneeakkumulation bzw. Eisentstehung geben soll. Das Verhältnis der Sauerstoffisotopen (<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O) gibt Aufschluss über die Paläotemperatur, der Aciditätsindex (gemessen über die elektrische Leitfähigkeit) über die im Eis enthaltenen Gase aus Vulkanausbrüchen. Der "dust veil index" (DVI) liefert Aussagen über die ebenfalls im Eis enthaltenen Staubpartikel; auch sie stammen von Vulkanausbrüchen.

**Eisschild:** Eine Landeismasse, die genügend mächtig ist, um den größten Teil der Topographie des darunterliegenden Gesteinsuntergrundes zu überdecken, so dass ihre Form hauptsächlich durch ihre innere Dynamik bestimmt ist (dem Eisstrom durch innerliche Verformung und/oder Gleiten auf dem Untergrund).

**El-Niño-Southern Oscillation (ENSO):** Eine gekoppelte Schwankung in der Atmosphäre und dem äquatorialen pazifischen Ozean mit einer bevorzugten Zeitskala von 2 bis 7 Jahre. Während eines El-Niño-Ereignisses ist das Oberflächenwasser des Meeres vor der Küste Perus und entlang des äquatorialen Pazifiks wesentlich wärmer ist als im Jahresdurchschnitt.

Dieser ozeanische Vorgang steht in Verbindung mit einer Fluktuation in einem tropischen und subtropischen Oberflächendrucksystem auf globaler Ebene, die Southern Oscillation genannt wird. Dieses gekoppelte Atmosphären-Ozean-Phänomen, ist als El Niño-Southern Oscillation, oder ENSO bekannt.

**Emissionshandel:** Ein marktkonformer Ansatz zur Erreichung von klimapolitischen Zielen. Er besteht darin, dass diejenigen Parteien, die ihre Treibhausgasemissionen unter das vorgeschriebene Niveau senken, ihre überschüssigen Rechte auf Emissionen nutzen oder mit ihnen handeln können, um Emissionen aus einer anderen Quelle im In- oder Ausland auszugleichen. Im Allgemeinen kann der Handel innerhalb eines Unternehmens, eines Landes oder international erfolgen.

**Emissionsszenario:** Eine plausible Darstellung der zukünftigen Entwicklung der Emissionen von Substanzen, die möglicherweise strahlungswirksam sind (z.B. Treibhausgase, Aerosole), basierend auf einer kohärenten und in sich konsistenten Reihe von Annahmen über die treibenden Kräfte (wie demographische und sozioökonomische Entwicklung oder Technologiewandel) und deren Schlüsselbeziehungen.

**Energiebedingte klimarelevante Spurengase:** Spurengase, die bei der Bereitstellung, Umwandlung und Nutzung von Energie freigesetzt werden und direkt oder indirekt zur Klimaänderung führen: Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ), Distickstoffoxid (Lachgas,  $\text{N}_2\text{O}$ ), Spurengase, die zur Bildung des Ozons ( $\text{O}_3$ ) in der Troposphäre beitragen bzw. luftchemische Veränderungen bewirken, d.h. in erster Linie Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ), Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ) und Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ).

**Energiebilanz:** Die Differenz zwischen der gesamten einfallenden und abgestrahlten Energie im Klimasystem. Wenn diese Bilanz positiv ist, tritt Erwärmung auf; wenn sie negativ ist, erfolgt Abkühlung. Über die gesamte Erde und über einen längeren Zeitraum gemittelt muss diese Bilanz null ergeben.

**Erdumlaufbahn:** Die Erdumlaufbahn wird durch die Exzentrizität der Erdbahn, der Präzession des sonnennächsten Punktes der Erdbahn und der Inklination der Erdachse bestimmt. Diese drei Parameter haben Perioden von rund 20.000, 40.000 und 100.000 Jahren.

**Eutrophierung:** Überdüngung, d.h. übermäßige Zufuhr von Nitrat- und phosphathaltigen Nährstoffen.

**Exzentrizität:** Der Abstand der Brennpunkte vom Mittelpunkt der elliptischen Erdbahn.

**Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW, HFCKW):** Industriell hergestellte organische fluor- und chlorhaltige Kohlenstoffverbindungen. Unterschieden wird zwischen vollhalogenierten und teilhalogenierten FCKW. Vollhalogenierte FCKW bestehen ausschließlich aus Kohlenstoff und Halogenen (F, Cl, Br) und haben sehr hohe Ozonerstörungspotentiale. Teilhalogenierte FCKW (HFCKW) enthalten zusätzlich Wasserstoffatome und sind daher chemisch weniger stabil. Teilhalogenierte FCKW wie H-FCKW 22 werden als Ersatzstoffe für vollhalogenierte FCKW verwendet. Die teilhalogenierte FCKW sind jedoch treibhausrelevant und tragen - wenn auch in geringerem Umfang - zur Zerstörung der Ozonschicht bei. Durch das Montreal Protokoll und weitere Folgeabkommen wurden diese Stoffe verboten bzw. ihre Verwendung stark eingeschränkt.

**F-Gase:** Im Kyoto-Protokoll wurden die klimarelevanten Fluorkohlenwasserstoffe (HFC bzw. HFCKW), die Perfluorierten Fluorkohlenwasserstoffe (PFC bzw. FKW) und  $\text{SF}_6$  aufgenommen. Die HFC und PFC sind teilweise Ersatzstoffe für ozonschichtschädigende FCKW.

**Flüchtige organische Verbindungen (VOC, NMVOC):** Alle organischen Verbindungen mit Ausnahme von Methan, die durch Reaktion mit Stickstoffoxiden in Gegenwart von Sonnenlicht photochemische Oxidantien wie Ozon bilden können.

**Flussskorrektur (engl "flux adjustment"):** Um das Problem zu vermeiden, dass allgemeine gekoppelte Atmosphären-Ozean-Modelle in einen unrealistischen Klimazustand abdriften, können Wärme- und Feuchteflüsse zwischen Ozean und Atmosphäre angepasst werden (und manchmal der vom Wind erzeugte Druck auf die Meeresoberfläche), bevor diese Flüsse in den Modell-Ozean und in die Modell- Atmosphäre eingefügt werden. Die meisten für den AR4 Bericht (AR4 AOGCM) verwendeten Modelle benötigen keine Flussskorrektur mehr.

**FKW (vollständig substituierte Fluor-Kohlenstoffverbindungen):** Gehören zu den sechs Treibhausgasen, deren Ausstoß laut dem Kyoto-Protokoll gemindert werden soll. Es sind Nebenprodukte aus der Aluminiumschmelze und werden als Kältemittel verwendet. Darüber hinaus ersetzen sie FCKWs bei der Herstellung von Halbleitern. Das globale Erwärmungspotenzial von FKWs beträgt 6500–9200.

**Fossile Brennstoffe:** In der Erdkruste abgelagerte Brennstoffe, die aus Pflanzen oder Tieren vergangener erdgeschichtlicher Zeiten entstanden sind (Kohle, Erdöl, Torf, Erdgas).

**Geosphäre:** Summe aus Pedosphäre (oberste Bodenschicht) und Lithosphäre (darunterliegende Gesteinsschicht)

**Halogenkohlenwasserstoffe (HKW):** Ein Sammelbegriff für die Gruppe von teilweise halogenisierten organischen Substanzen, einschließlich Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) und Hydrofluorchlorkohlenwasserstoffe (H-FCKWs), sowie perfluorierter Kohlenwasserstoffe (FKWs), Halone, Methylchlorid, Methylbromid, etc. Viele der Halogenkohlenwasserstoffe haben ein hohes Globales Erwärmungspotential. Die chlor- und bromhaltigen Halogenkohlenwasserstoffe sind auch am Abbau der Ozonschicht beteiligt.

**Halokarbone (Halocarbons):** (Oberbegriff) Kohlenstoffhaltige Verbindungen, die Halogene (Cl, Br, F, J) enthalten. Voll halogenierte Halokarbone enthalten nur Kohlenstoff und Halogen-Atome, während teilhalogenierte Halokarbone auch Wasserstoffatome enthalten. Chlor-, brom-, jodhaltige Halokarbone verursachen in der Stratosphäre einen Ozonabbau. Halokarbone sind auch Treibhausgase (s. Fluorchlorkohlenwasserstoffe).

**Halone:** Chemische Bezeichnung für modifizierte Kohlenwasserstoffe, die anstelle der Wasserstoffatome eines oder mehrere der Halogene Fluor, Chlor und Brom, jedoch mindestens ein Bromatom, enthalten. Halone sind am stratosphärischen Ozonabbau beteiligt und wurden v.a. in Feuerlöscheinrichtungen eingesetzt. Ihre Verwendung ist nach dem Montreal Protokoll in den meisten Staaten nicht mehr zulässig.

**Hydrosphäre:** Der Teil des Klimasystems, der flüssiges Oberflächen- und unterirdisches Wasser umfasst, wie z.B. Ozeane, Meere, Flüsse, Süßwasserseen, Grundwasser, etc.

**IPCC:** (Intergovernmental Panel on Climate Change) Zwischenstaatliches Expertengremium für Klimafragen unter der Schirmherrschaft der Vereinten Nationen, das 1988 eingerichtet wurde.

**Infrarotstrahlung (IR):** Infrarotstrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung, deren Wellenlänge von ca. 0,7 bis 1.000 Mikrometern reicht. Dies liegt über der sichtbaren und unter der Mikrowellen-Strahlung. Der überwiegende Teil der von der Erde und ihrer Atmosphäre emittierten Energie liegt im infraroten Bereich. Infrarote Strahlung wird fast vollständig durch innermolekulare Prozesse erzeugt. Die dreiatomigen Gase, wie Wasserdampf, Kohlendioxid und Ozon, absorbieren infrarote Strahlung und spielen eine wichtige Rolle bei der Ausbreitung von Infrarotstrahlung in der Atmosphäre.

**Inklination der Erdachse:** Neigung der Rotationsachse der Erde zur Bahnebene um die Sonne.

**Innertropische Konvergenzzone (ITCZ/ITK):** Die äquatornahe Zone, in der die Passate aus Nord und Süd zusammenströmen (konvergieren) (je nach Jahreszeit ca. 20° nördlich bzw. südlich des Äquators). Die feuchten Luftmassen werden dadurch zum Aufsteigen gezwungen, was zu Wolkenbildung und häufigen Gewittern führt.

**Jet-Stream (Strahlstrom):** Bandförmiger Luftstrom mit außerordentlich hohen Windgeschwindigkeiten (max. ca. 600 km/h) in der oberen Troposphäre oder unteren Stratosphäre, der durch große horizontale Temperaturunterschiede und die Corioliskraft verursacht wird. Länge: einige 1.000 km, Breite: einige 100 km, vertikale Mächtigkeit: einige km.

**Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>):** Natürlich vorkommendes Gas, auch als Nebenprodukt der Verbrennung fossiler Brennstoffe, wie Öl, Gas und Kohle, sowie von Biomasse, Landnutzungsänderung und anderer Industrieprozesse. Es ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas, das die Strahlungsbilanz der Erde beeinflusst. Pflanzen wandeln CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre mit

Hilfe von Wasser und Licht in Karbohydrate um. Seine Konzentration in der Atmosphäre beträgt 381 ppm.

**Klima:** Klima ist in einem engeren Sinn üblicherweise als „mittleres Wetter“ definiert, oder genauer als die statistische Beschreibung des Mittels und der Variabilität der relevanten meteorologischen Parameter über eine Periode von Monaten bis zu Tausenden oder Millionen von Jahren. Diese Parameter sind häufig Temperatur, Niederschlag und Wind. Klima in einem weiteren Sinn ist der Zustand, einschließlich der statistischen Beschreibung des Klimasystems. Die klassische Zeitperiode ist - wie von der WMO definiert - 30 Jahre (*IPCC 2007*).

**Klimaänderung:** Eine Klimaänderung weist auf eine Änderung des Klimazustands hin, der identifiziert werden kann (z.B. mit statistischen Tests) durch Änderungen im Mittel und/oder der Variabilität seiner Parameter und der für eine ausgedehnte Periode (Dekaden oder länger) besteht. Klimaänderungen können verursacht werden durch natürliche innere Prozesse oder externe Antriebe oder anhaltende anthropogene Änderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre oder Landnutzungsänderungen (*IPCC 2007*).

**Klimamodell:** Numerische Beschreibung des Klimas in einem mathematisch-physikalischen Computermodell, die auf den physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften seiner Bestandteile, seinen Wechselwirkungen und Rückkoppelungsprozessen basiert.

**Klimaparameter:** Interne Klimaparameter sind die das Klima direkt charakterisierenden, physikalischen Größen, wie z.B. Strahlung, Temperatur, Niederschlag. Als externe Klimaparameter bezeichnet man die Einflussfaktoren, die zwar das Klimasystem beeinflussen, aber nicht mit dem Klimasystem wechselwirken (z.B. Einstrahlung der Sonne, Vulkane, anthropogen bedingte Emissionen von Treibhausgasen).

**Klimaprojektion:** Eine Projektion der Reaktion des Klimasystems auf Emissions- oder Konzentrationsszenarien von Treibhausgasen, Aerosolen oder Strahlungsantriebs-Szenarien, häufig auf Klimamodellsimulationen basierend. Klimaprojektionen werden von Klimaprognosen unterschieden, um zu betonen, dass Klimaprojektionen von den verwendeten Emissions-/Konzentrations- und Strahlungsantriebs-Szenarien abhängen, die auf Annahmen, z.B. über zukünftige gesellschaftliche und technologische Entwicklungen, beruhen, die nur eventuell verwirklicht werden und deshalb mit erheblicher Unsicherheit verbunden sind (s. auch Projektion).

**Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen:** (engl: United Nations Framework Convention on Climate Change UNFCCC) Die Klimarahmenkonvention ([www.unfccc.int/resource/docs/convkp/convger.pdf](http://www.unfccc.int/resource/docs/convkp/convger.pdf)) wurde auf dem Weltgipfel für Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio de Janeiro angenommen und seither von 186 Staaten ratifiziert. Sie trat 1994 in Kraft. Das Ziel der Klimarahmenkonvention ist die Stabilisierung der Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre auf ein ungefährliches Niveau für das Klimasystem. Die Konvention bildet den Rahmen für die Klimaschutz-Verhandlungen, die jeweils als Vertragsstaatenkonferenz der Konvention stattfinden. Das Sekretariat der Klimarahmenkonvention, das UNFCCC Sekretariat, hat seinen Sitz in Bonn.

**Klimasensitivität:** Diejenige Temperaturerhöhung, die durch eine Verdoppelung der Treibhausgasemissionen gegenüber dem vorindustriellen Wert ausgelöst wird. Die Gleichgewichts-Klimasensitivität bezieht sich auf die Änderung der globalen mittleren Oberflächentemperatur nach Wiederherstellung des Gleichgewichts als Folge einer Verdoppelung der atmosphärischen Kohlendioxidemission (im Vgl. zum vorindustriellen Wert). Die Berechnung erfordert sehr lange Simulationen mit den gekoppelten allgemeinen Zirkulationsmodellen. Als Mittelwert wird 1,5 – 4,5 °C angegeben.

**Klimasystem:** Das Klimasystem ist ein komplexes System, das aus fünf Hauptbestandteilen besteht: der Atmosphäre, der Hydrosphäre, der Kryosphäre, der Landoberfläche und der Biosphäre sowie den Wechselbeziehungen zwischen diesen. Das Klimasystem verändert sich über die Zeit unter dem Einfluss seiner eigenen inneren Dynamik und durch externe Kräfte wie Vulkanausbrüche, solare Schwankungen und menschlich induzierte Einflüsse wie die Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre und Landnutzung.

**Klimaszenarien:** Klimaszenarien stellen im Gegensatz zur Wettervorhersage keine Prognosen dar, sondern eine Abschätzung des Klimas der kommenden Jahrzehnte bzw. Jahrhunderte, basierend auf unterschiedlichen Annahmen.

**Klimavariabilität:** Schwankungen des mittleren Zustandes und anderer Statistiken (wie Standardabweichungen, Vorkommen von Extremereignissen usw.) des Klimas auf allen räumlichen und zeitlichen Skalen, die über einzelne Wetterereignisse hinausgehen. Die Ursachen können natürliche innere Prozesse im Klimasystem oder durch natürliche oder anthropogene externe Einflüsse begründet sein.

**Klimavariation:** Kurzzeitige Änderung des Klimas.

**Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>):** Natürlich vorkommendes Gas. Auch ein Nebenprodukt aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Öl, Gas und Kohle, sowie von Biomasse, Landnutzungsänderungen und anderer industrieller Prozesse. Es ist das wichtigste Treibhausgas, das die Strahlungsbilanz der Erde beeinflusst. Pflanzen wandeln CO<sub>2</sub> von der Atmosphäre zusammen mit Wasser und Licht in Kohlenwasserstoffe um. Seine Konzentration in der Atmosphäre beträgt 381 ppm.

**Kohlendioxidabtrennung und –speicherung (CCS):** Verfahren, bestehend aus der Abtrennung von Kohlendioxid aus industriellen und energiebedingten Quellen, dem Transport zu einer Lagerstätte und der langfristigen Isolation von der Atmosphäre.

**Kohlendioxiddüngung:** Verstärktes Wachstum von Pflanzen aufgrund der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre. Der Düngungseffekt tritt je nach Pflanzensorte unterschiedlich stark auf, in Abhängigkeit von deren Photosynthese-Mechanismus. C3-Pflanzen (Bäume, Getreide, Kartoffeln, Gemüse) zum Beispiel reagieren stärker auf CO<sub>2</sub> als C4-Pflanzen (tropische Pflanzen, z.B. Gräser, Mais, Zuckerrohr und panic Gras) (IPCC 20079).

**Kohlenstoffkreislauf:** Kreislauf des Kohlenstoffs in seinen verschiedenen chemischen Verbindungen zwischen der Atmosphäre, der Biosphäre, der Hydrosphäre und der Geosphäre.

**Korallenausbleichen:** Riffbildende Korallen sind in flachen Meeren anzutreffen. Sie kommen nicht tiefer vor, als das Licht eindringt, da die in ihren Geweben lebenden symbiotischen Algen das Licht zur Photosynthese benötigen und die Korallen ohne die Algen nicht existieren können. Längerfristig außergewöhnlich hohe Wassertemperaturen (>29°C) führen zu toxischen Vorgängen in den Korallen und zu ihrem Ausbleichen. El Niño-Ereignisse, die globale Erwärmung und überhöhte UV-Strahlung durch die Schwächung der Ozonschicht werden als Ursachen für das Ausbleichen der Korallen diskutiert.

**Kosmische Strahlung:** Unter kosmischer Strahlung versteht man geladene Teilchen, die die Erde aus dem Weltall treffen. Die kosmische Strahlung besteht zu etwa 98% aus Atomkernen und zu 2% aus Elektronen. Die kosmische Strahlung unterteilt sich in galaktische (GCR) und solare Strahlung (SCR). Die solare kosmische Strahlung (Sonnenwind) entsteht v.a. durch solare Ausbrüche. Die Teilchen mit geringerer Energie stammen oft von unserer Sonne und werden bei Eruptionen in Richtung Erde geschleudert. Man erkennt diese Komponente der kosmischen Strahlung daran, dass sie mit der Strahlungsaktivität der Sonne schwankt. Die galaktische kosmische Strahlung besteht aus hochenergetischen Teilchen, v. a. Protonen. Die hauptsächliche Quelle für die Strahlung aus dem Weltall sind wahrscheinlich Supernovae.

**Kosmogene Isotope:** Die kosmische Strahlung erzeugt in der Atmosphäre durch Zerfall von Stickstoffmolekülen radioaktive Isotope Be-10 (Halbwertszeit: 1,51 Mio. Jahre) und C-14 (Halbwertszeit 5370 Jahre). Diese lagern sich in Eisbohrkernen bzw. Baumringen ein und können zur Altersbestimmung und zur Bestimmung der Sonnenaktivität verwendet werden.

**Kryosphäre:** Der Teil des Klimasystems, der Schnee, Eis und gefrorenen Untergrund (einschließlich Permafrost) ober- und unterhalb der Erd- und Meeresoberfläche umfasst.

**Kurzwelliger Spektralbereich:** Bereich elektromagnetischer Strahlung zwischen 0,2 und 4 µm (Solarstrahlung).

**Kyoto-Protokoll:** Es wurde 1997 auf der dritten Vertragsstaatenkonferenz (COP) des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) in Kyoto, Japan, angenommen und trat im Februar 2005 in Kraft. Die Industriestaaten (Annex-B-Länder) außer USA (nicht ratifiziert) und die Transformationsländer verpflichten sich darin, die Treibhausgasemissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, H-FKW, FKW, SF<sub>6</sub>) in der Periode 2008-2012 um 5 % gegenüber 1990 bzw. bei den letzten 3 Gasen auch gegenüber 1995 zu vermindern (<http://unfccc.int/resource/docs/konvkv/kpeng.pdf>).

**Langwelliger Spektralbereich:** Bereich elektromagnetischer Strahlung zwischen 4 und 100 µm (Infrarotstrahlung). In diesem Bereich gibt die Erde Wärmestrahlung in den Weltraum ab.

**lapse rate:** Begriff für den vertikalen Temperaturgradient in der Atmosphäre. (ca. – 10°C/km in der trockenen Atmosphäre, ca. 6°C/km in der feuchten Atmosphäre)

**Lebensdauer:** Allgemeiner Begriff für verschiedene Zeitskalen, welche die Geschwindigkeit von Prozessen beschreiben, die die Spurengaskonzentration beeinflussen. Es wird zwischen Umsatzzeit und Anpassungszeit unterschieden. Umsatzzeit ist das Verhältnis der Masse eines Speichers (z.B. eines Gases in der Atmosphäre) und der totalen Abbaurate des Speichers. Die Anpassungszeit ist die Zeitskala, die den Abbau einer plötzlich dem Speicher zugeführten Menge charakterisiert. Häufig wird Anpassungszeit als Lebensdauer bezeichnet. Beim CO<sub>2</sub> ist die Festlegung besonders schwierig, da das von der Biosphäre aufgenommene Gas wieder freigesetzt wird. Näherungsweise wird oft 100 Jahre genannt.

**Lithosphäre:** Äußere Gesteinshülle und Erdkruste der Erde. Teil der Geosphäre.

**Madden-Julian-Oszillation (MJO):**, (benannt nach Roland Madden und Paul Julian) ein Zirkulationsphänomen der tropischen Atmosphäre (innerhalb von 20 Breitengraden beiderseits des Äquators) zwischen dem Indik und dem zentralen Pazifik, das einen 30- bis 60-tägigen Zyklus aufweist. Dieses gekoppelte Ozean-Atmosphäre-System hat einen großen Einfluss auf die Monsunvariabilität.

**Malaria:** – auch Sumpffieber oder Wechselfieber genannt – ist eine Tropenkrankheit, die von einzelligen Parasiten hervorgerufen wird. Die Krankheit wird in den Tropen und Subtropen durch den Stich einer weiblichen Stechmücke (Moskito) der Gattung Anopheles übertragen. Sie erzeugt hohe Fieberschübe und systemische Störungen. Weltweit sind etwa 300 Millionen Menschen an Malaria erkrankt, jährlich sterben etwa 2 Millionen Menschen daran.

**Massenbilanz (von Gletschern, Eiskappen oder Eisschilden):** Die Differenz zwischen dem Massenzufluss zu einem Eiskörper (Akkumulation) und dem Massenverlust (Abschmelzung, Abbruch von Eisbergen).

**Meeresoberflächentemperatur (SST) (sea surface temperature):** Vereinfacht: die Temperatur, die über die von der Meeresoberfläche emittierten Strahlung gemessen wird. Die Temperatur bewegt sich von ungefähr -2 °C in den Polarregionen bis zu 32 °C in den Tropen. Da Meeresströmungen charakteristische Temperaturen besitzen, sind die SST der bevorzugte Datentyp für die Beobachtung der Meereszirkulation. Die Meeresoberflächentemperatur hat einen großen Einfluss auf den Austausch von Wärme, Feuchtigkeit, Impuls und Gasen zwischen Atmosphäre und Ozean. Satellitensensoren sind gut geeignet, die SST zu messen

**Meridionalzirkulation:** Bei dieser Zirkulationsform sind die großräumigen Strömungen in der Atmosphäre meridional, d.h. längs der Längengrade ausgerichtet. Diese Strömungsanordnung ermöglicht einen direkten Luftaustausch zwischen polaren und subtropischen Gebieten.

**Meridionale Umwälzbewegung (Meridional Overturning Circulation (MOC):** Eine zonal gemittelte, großräumige meridionale (nord-süd) Umwälzströmung in den Ozeanen. Im Atlantik transportiert eine solche Strömung relativ warmes Oberflächenwasser nach Norden und relativ kaltes Tiefenwasser nach Süden. Der Golfstrom stellt einen Teil dieser atlantischen Strömung dar. Im Nordatlantik, außerhalb der subpolaren Regionen, wird die MOC oft mit der THC gleichgesetzt. Die MOC kann auch flache, windgetriebene Umwälzzellen enthalten, die im oberen Ozean in den Tropen und Subtropen vorkommen, in welchen warmes (leichtes) polwärts fließendes Wasser zu leicht dichterem Wasser umgewandelt und in tieferen Schichten äquatorwärts heruntergezogen wird (*IPCC 2007*).

**Methan (CH<sub>4</sub>):** Methan ist eine chemische Verbindung mit der chem. Formel CH<sub>4</sub>. Methan ist ein relativ starkes Treibhausgas mit einem Treibhauspotential von 23.

**Mischungsverhältnis (mole fraction) (ppmv, ppbv, pptv):** Das Mischungsverhältnis (Stoffmengenanteil) ist das Verhältnis der Anzahl der Moleküle einer Verbindung zur Gesamtzahl der Moleküle aller Verbindungen in einem Volumen. Es ist üblicherweise auf trockene Luft bezogen. Typische Werte der langlebigen Treibhausgase sind in der Größenordnung von  $\mu\text{mol/mol}$  (ppm = Teile pro Million),  $\text{nmol/mol}$  (ppb = Teile pro Milliarde), und  $\text{fmol/mol}$  ppt = Teile pro Billion). Molfraktion unterscheidet sich vom Volumenmischungsverhältnis, das oft als ppmv etc. ausgedrückt wird, durch die Korrektur für nicht-ideale Gase. Diese Korrektur ist bedeutend für die genaue Messung vieler Treibhausgase (IPCC 2007).

**Monsun:** Monsune sind tropische Winde, die ihre Richtung jahreszeitlich ändern. Sie überlagern die meridionale tropische Zirkulation und sind abhängig von der Wanderung der Inner-tropischen Konvergenzzone (ITK). Der Wintermonsun über Indien ist gleichzusetzen mit dem tropischen Nordostpassat, der trockene, kühle Kontinentalluft über den indischen Subkontinent zur ITK führt. Zum Sommer hin wandert die ITK über Indien nach Norden bis zum Himalaja. Die ozeanische Herkunft der Luftmassen führt über Indien und auch über SO-Asien zu den lebenswichtigen Monsunniederschlägen.

**Montreal-Protokoll:** Das Montreal-Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, wurde 1987 in Montreal angenommen und in London (1990), Kopenhagen (1992), Wien (1995), Montreal (1997) und Beijing (1999) laufend angepasst und ergänzt. Es regelt und beschränkt bzw. untersagt den Verbrauch und die Produktion von chlor- und bromhaltigen Chemikalien, die das stratosphärische Ozon zerstören, wie FCKWs, Methylchloroform, Tetrachlorkohlenstoff und viele andere.

**Nitrifikation:** Mikrobielle Stickstoffumwandlung, bei der aus Ammonium-Ionen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) in zwei Stufen zunächst Nitrit-Ionen (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), dann Nitrat-Ionen (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) gebildet werden.

**Optische Dicke (Atmosphäre):** Maß für die Abschwächung der elektromagnetischen Strahlung beim Passieren von Gasschichten bzw. der Atmosphäre. Sie ist das Produkt aus dem spektralen Extinktionskoeffizienten und der Weglänge der durchstrahlten Gasschichten.

**Orographie:** Beschreibung der Oberflächenformen, der Landmassen, Gebirgskunde.

**Ozon (griech. das Riechende):** Ozon ist die dreiatomige Form von Sauerstoff (O<sub>3</sub>) und ein Bestandteil der Atmosphäre. In der Troposphäre wird es natürlich und durch photochemische Reaktionen bei denen Gase, die aus menschlichen Aktivitäten („smog“) stammen, gebildet. Troposphärisches Ozon ist ein Treibhausgas. In der Stratosphäre wird es durch Reaktion mit ultravioletter Sonnenstrahlung und Sauerstoff gebildet. Stratosphärisches Ozon spielt eine große Rolle in der stratosphärischen Strahlungsbilanz. Seine Konzentration ist in der Ozonschicht am höchsten.

**Ozonloch:** 1985 wurde entdeckt, dass seit 1977 über der Antarktis während der Monate September und Oktober drastische Abnahmen der Ozonkonzentration stattfinden. Als Ozonloch wird die beobachtete Abnahme der Ozonschicht in der Stratosphäre über der Südpolarregion und auch über der Nordpolarregion bezeichnet. Mittlerweile steht fest, dass das jährlich wiederkehrende Ozonloch u.a. durch industriell hergestellte Fluorchlorkohlenwasserstoffe verursacht wird. Durch das Verbot der FCKW wird in den nächsten Jahrzehnten mit einer Erholung der uns vor UV Strahlen schützenden Ozonschicht gerechnet.

**Ozonschicht:** Die Stratosphäre enthält eine Schicht – die sog. Ozonschicht - in 12 bis 40 km Höhe, in der die Ozonkonzentration am höchsten ist. Diese Schicht wird durch menschliche Emissionen von Chlor- und Bromverbindungen abgebaut. Jedes Jahr während dem südhemisphärischen Frühling, findet über der Antarktis Region eine starke Abnahme der Ozonschicht statt, die durch von Menschen erzeugten Brom- und Chlorverbindungen in Kombination mit speziellen meteorologischen Bedingungen in dieser Region verursacht wird. Dieses Phänomen wird Ozonloch genannt.

**Paläoklimatische Daten:** Klimadaten (wie z.B. Temperatur) aus der Erdgeschichte. Diese Daten können aus Eisbohrkernen, aus Ablagerungen auf dem Meeresboden, aus Baumringanalysen sowie aus Pollenanalysen gewonnen werden.

**Passat (Trade Winds):** Beidseitig des Äquators bis ca. 25° N und S auftretende Winde, die zum Druckausgleich aus den Hochs der Rossbreiten in Richtung der äquatorialen Tiefdruckrinne strömen. In den Passatzonen sinkt Luft ab. Erst beim Zusammenströmen der Passate in der äquatorialen Tiefdruckrinne werden die Luftmassen zum Aufsteigen gezwungen und regnen sich aus.

**Pedosphäre:** Bodenzone; Grenzbereich der Erdoberfläche, in dem sich Gestein, Wasser, Luft und Lebewesen durchdringen und in der die bodenbildenden Prozesse stattfinden. Teil der Geosphäre

**Photochemisch:** Unter Einwirkung von UV-Strahlung ablaufende chemische Reaktion.

**Photodissoziation:** Zersetzung unter Lichteinfluss (UV-Strahlung).

**Photolyse:** Zersetzung von Molekülen durch Absorption von Licht (elektromagnetische Strahlung).

**Photosynthese (Assimilation):** Der Aufbau von Kohlenhydraten durch grüne Pflanzen aus Kohlendioxid und Wasser mit Hilfe des Sonnenlichts.



**pH-Wert:** Der pH-Wert ist ein dimensionsloses Maß des Säuregehalts von Wasser (oder einer Lösung). Reines Wasser hat einen pH-Wert=7. Saure Lösungen haben einen pH-Wert unter 7 und basische Lösungen haben einen pH-Wert über 7.

**Plankton:** Lebensgemeinschaft im freien Wasser schwebender Organismen mit fehlender oder geringer Eigenbewegung. Zooplankton: planktische Tiere, Phytoplankton: planktische Pflanzen. Nahrung für Fische.

**ppm(Teile pro Million) oder ppb (Teile pro Milliarde):** Das Verhältnis der Anzahl der (Treibhaus) Gasmoleküle zu der Gesamtanzahl der Moleküle in trockener Luft

**Polarwirbel (Vortex):** Ein um den Pol laufender Wind, der in der Antarktis besonders ausgeprägt ist. Im antarktischen Polarwirbel können eine hohe Stabilität und sehr tiefe Temperaturen erreicht werden.

**Post-SRES (-Szenarien):** Referenz- und Emissionsminderungsszenarien, die nach der Fertigstellung des IPCC-Sonderberichts zu Emissionsszenarien (SRES), also nach dem Jahr 2000, veröffentlicht wurden

**Präzession:** Kreiselförmige Drehbewegung der Erdachse um ihre Figurenachse, hervorgerufen durch die Schwerkraft von Sonne und Mond. Eine Drehbewegung dauert etwa 20.000 Jahre.

**Projektion:** In der Klimawissenschaft werden die Ergebnisse von Modellrechnungen für das zukünftige Klima nicht als Prognose, sondern als Projektion bezeichnet, da sie auf unterschiedlichen Emissionsszenarien beruhen, deren Eintrittswahrscheinlichkeit bisher nicht bewertet wurde (s. auch Klimaprojektion). Projektionen werden von Prognosen unterschieden, um hervorzuheben, dass sie Annahmen beinhalten, z.B. betreffend künftiger sozioökonomischer und technologischer Entwicklungen, die vielleicht realisiert werden, vielleicht aber auch nicht, und dass sie deshalb wesentlichen Unsicherheiten unterworfen sind.

**Protuberanzen:** Gasförmige Gebilde aus elektrisch geladenen Teilchen, die man entlang des Sonnenrandes beobachten kann. Ihre Größe reicht von ca. 50.000 km bis hin zu sehr selten vorkommenden 1 Millionen km. Die Protuberanzen sind an Sonnenfleckengebiete gekoppelt. Koronale Massenauswürfe (Coronal Mass Ejections, CME) sind gewaltige Explosionen von Protuberanzen, die durch das plötzliches Aufplatzen von Magnetfeldlinien entstehen. Milliarden von Tonnen an Materie werden bei diesem Ereignis mit bis zu 2000 km/s ins All geschleudert.

**Proxidaten:** Näherungsweise Daten über hydrologische und meteorologische Bedingungen in historischen und prähistorischen Zeiten, die unter Anwendung physikalischer und biophysikalischer Methoden aus der Analyse von lokalen Datenquellen, den Proxies, gewonnen werden. Solche Indikatoren für Paläoklima sind Eisbohrkerne, Pollen, Warven, Baumringe, Stalakmiten, Eigenschaften von Korallen, Hinweise auf Gletscherstände, historische Quellenangaben, Ernteertragszahlen, phänologische Phasen, Vereisungs- und Hochwasserangaben, Zerfallseigenschaften von Isotopen.

**Radiometer:** Ein passives Instrument, das elektromagnetische Strahlung mengenmäßig erfasst, gewöhnlich im Mikrowellen- oder Infrarotbereich. Wettersatelliten tragen Radiometer, um die Strahlung von Schnee, Eis, Wolken, Wasserkörpern, der Erdoberfläche und der Sonne zu messen. Damit wird der Flüssigwasser- und Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ermittelt.

**Radiosonde:** Ein Ballon-getragenes Instrument, das meteorologische Parameter von der Erdoberfläche bis in einer Höhe von ca. 30 km misst. Es werden Temperatur, Druck und Feuchte gemessen und zur Erde gesendet. Radiosondenaufstiege werden i.a. zweimal täglich weltweit durchgeführt (00.00 und 12.00 UTC).

**Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC):**

Die Konvention wurde am 9. Mai 1992 in New York verabschiedet und am Weltgipfel von 1992 in Rio de Janeiro von über 150 Ländern und der Europäischen Gemeinschaft unterschrieben. Ihr ultimatives Ziel ist die "Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau, das gefährliche anthropogene Beeinträchtigungen des Klimasystems verhindert".

**Rückkopplung:** Eine Rückkopplung tritt auf, wenn ein Prozess Änderungen in einem zweiten Prozess auslöst und dieser seinerseits wieder den ursprünglichen Prozess beeinflusst; eine positive Rückkopplung verstärkt den ursprünglichen Prozess und eine negative Rückkopplung verringert ihn.

**Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>):** Eines der sechs Treibhausgase, die unter dem Kyoto-Protokoll zu bekämpfen sind. Es wird größtenteils in der Schwerindustrie verwendet, um Hochspannungsanlagen zu isolieren und um die Herstellung von Kabelkühlungen und Halbleitern zu unterstützen.

**Schwefelsäure-Aerosol:** Es bildet sich durch Oxidation des SO<sub>2</sub> in der Atmosphäre und hat eine abkühlende Wirkung. Hauptbestandteil der stratosphärischen Aerosolschicht (in Höhen zwischen 15 und 25 km).

**Senken:** Ein Ökosystem (Ozean, Wälder), das Kohlenstoff aus der Atmosphäre entfernt, ist eine Senke (so entnimmt etwa ein Baum im Laufe seiner Wachstumsphase der Atmosphäre Kohlenstoff). Die Kohlenstoffeinbindung in Senken kann bis zu gewissen Grenzen auf die Emissionsreduktionsverpflichtungen nach dem Kyoto-Protokoll angerechnet werden.

**Solarkonstante:** Bezeichnet die senkrecht auf eine Fläche außerhalb der Atmosphäre treffende Solarstrahlung (Mittelwert 1367 W/m<sup>2</sup>). Im Weltraum ist sie nahezu konstant; auf der Erde variiert sie je nach Tages- und Jahreszeiten ( $\pm 3,5\%$ ), Breitengrad und Witterung.

**Sonnenaktivität:** Die Sonne weist Zeiträume von hoher Aktivität auf, die sich in der Anzahl der Sonnenflecken wie auch in der Abstrahlung, in der magnetischen Aktivität und in der Emission von hochenergetischen Partikeln ausdrücken. Diese Variationen finden auf Zeitskalen von Millionen von Jahren bis zu Minuten statt.

**Sonnenflecken:** Gebiete (dunkle Flecken) mit einer im Vergleich zur Sonnenoberfläche geringeren Oberflächentemperatur. Sie entstehen, weil das in ihnen durch die Sonnenoberfläche tretende starke Magnetfeld den Energietransport durch Gasströmungen unterdrückt. Die Zahl der Sonnenflecken ist dem solaren "Output" (der Solarstrahlung) proportional.

**Sonnenfleckenzyklus:** Periode von im Durchschnitt 11 Jahren, in der die Anzahl der Sonnenflecken auf der Oberfläche der Sonne einen Zyklus durchlaufen.

**Sonnensynchron:** Die Umlaufbahn der Wettersatelliten ist zusätzlich sonnensynchron, dabei werden alle Teile der Erde unter der gleichen Sonnenbeleuchtung, d.h. zur gleichen Ortszeit, überflogen. Die Bildstreifen sind damit untereinander direkt vergleichbar.

**Sonnenwind:** Der Sonnenwind ist die Gesamtheit aller Partikel, die von der Sonne ausströmen (solare kosmische Strahlung). Er besteht hauptsächlich aus elektrisch geladenen Partikeln, etwa Heliumkerne, Elektronen und Protonen. Der Sonnenwind beeinflusst sowohl das Magnetfeld der Sonne als auch das der Erde und die galaktische kosmische Strahlung. Ein starker Sonnenwind kann in die Erdatmosphäre eindringen und das Nordlicht verursachen.

**Southern Oscillation:** Luftdruckoszillation (Schwingung), die sich in einer Massenverschiebung zwischen der indonesischen äquatorialen Tiefdruckzelle und der südpazifischen Hochdruckzelle widerspiegelt (Ost-West-Luftdruckschaukel).

**Southern Hemisphere Annular Mode (SAM)** (Antarktische Oszillation (AAO)): Luftdruckschwankung (Variabilitätsmodus) in der Südhemisphäre mit dem Polarwirbel (Vortex) als Aktionszentrum mit Auswirkungen auf die Bodentemperatur.

**Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>):** Die Summe von Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>).

**Spurengase:** Gase, die nur in geringen Konzentrationen in der Atmosphäre vorkommen, z.B. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, FCKW.

**Strahldichte:** Die Strahldichte (engl. radiance) ist der Strahlungsfluss pro durchstrahlter Fläche und pro Raumwinkel in einer gegebenen Richtung.

**Strahlungsantrieb (radiative forcing):** Der Strahlungsantrieb ist die Veränderung in der vertikalen Nettoeinstrahlung (Einstrahlung minus Ausstrahlung; ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter, W/m<sup>2</sup>) an der Tropopause aufgrund einer Veränderung eines äußeren Antriebs der Klimaänderung, wie z.B. eine Veränderung in der Konzentration von Kohlendioxid oder in der Sonneneinstrahlung. Der Strahlungsantrieb wird berechnet, indem alle troposphärischen Eigenschaften auf ihren ungestörten Werten konstant gehalten werden und nachdem sich die stratosphärischen Temperaturen, sofern verändert, an das strahlungsdynamische Gleichgewicht angepasst haben.

**Strahlungsfluss der Sonne:** Von der Sonne abgegebene (kurzwellige) Strahlung (s. Solar-konstante).

**Stratosphäre:** Stark geschichtete Zone der Atmosphäre oberhalb der Troposphäre zwischen 10 und 50 km Höhe.

**Suess-Effekt (nach Hans E. Suess (1909–1993):** Fossile Brennstoffe wie Erdöl und Kohle enthalten kein nachweisbares C-14 mehr, da sie wesentlich älter als ca. 10 Halbwertszeiten (ca. 60000 Jahre) sind. Bei der Verbrennung werden daher nur die (nicht radioaktiven) Isotope C-12 und C-13 der fossilen Brennstoffe frei und verdünnen die Menge des radioaktiven C-14 in der Atmosphäre.

**Szenario:** Ermittlung eines möglichen Zustandes unter der Annahme bestimmter Bedingungen. Die Ergebnisse sind unabhängig von den Randbedingungen der Szenarien und unterscheiden sich daher von Prognosen.

**Thermische Infrarotstrahlung:** Von der Erdoberfläche, der Atmosphäre und von Wolken abgegebene Strahlung. Sie ist auch als terrestrische oder langwellige Strahlung bekannt und muss von der Nahinfrarotstrahlung, die Teil des solaren Spektrums ist, unterschieden werden.

**Thermohaline Zirkulation:** Großräumige Zirkulation im Ozean, ausgelöst durch Unterschiede in Temperatur und Salzgehalt (Salinität) des Wassers. Im Nordatlantik fließt warmes Oberflächenwasser nordwärts und kaltes Tiefenwasser südwärts. Daraus resultiert ein polwärts gerichteter Wärmetransport (siehe auch MOC).

**Transformationsländer (EIT = Economies in Transition):** Polen, Tschechische Republik, Ungarn, Slowakische Republik, Russische Föderation, Ukraine, Bulgarien, Estland, Kroatien, Lettland, Litauen, Rumänien, Slowenien, Weißrussland.

**Treibhauseffekt:** Treibhausgase absorbieren effektiv Infrarotstrahlung, die von der Oberfläche der Erde, durch die Treibhausgase der Atmosphäre und durch Wolken absorbiert werden. Die atmosphärische Strahlung wird nach allen Seiten emittiert, auch zur Erdoberfläche. Dadurch wird im System Erdoberflächen-Atmosphäre Wärme festgehalten. Dies wird als Treibhauseffekt bezeichnet. Aufgrund der wärmeisolierenden Wirkung dieser Spurengase ist die Temperatur in Bodennähe um etwa 33 °C höher als die Strahlungstemperatur des Systems Erde-Atmosphäre ohne diese Gase (natürlicher Treibhauseffekt). Wegen des Anstiegs menschlich bedingter Spurengase verstärkt sich der Treibhauseffekt - als anthropogener Treibhauseffekt bezeichnet - und die Temperatur wird sich erhöhen.

**Treibhausgase:** Treibhausgase sind diejenigen gasförmigen Bestandteile in der Atmosphäre, sowohl natürlichen wie anthropogenen Ursprungs, welche die Strahlung in spezifischen Wellenlängen innerhalb des Spektrums der thermischen Infrarotstrahlung absorbieren und wieder ausstrahlen, die von der Erdoberfläche, der Atmosphäre selbst und von Wolken abgestrahlt wird. Diese Eigenschaft verursacht den Treibhauseffekt. Wasserdampf (H<sub>2</sub>O), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O), Methan (CH<sub>4</sub>) und Ozon (O<sub>3</sub>) sind die Haupttreibhausgase in der Erdatmosphäre. Hinzu kommen noch v.a. das Ozon O<sub>3</sub> und die Vollhalogenierten Kohlenwasserstoffe FCKW (CFC), Teilhalogenierte Kohlenwasserstoffe H-FCKW (HFC), Perfluorierte Kohlenwasserstoffe FKW (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>).

**Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP):** Es gibt an, wievielfach stärker ein Gas zum Treibhauseffekt beiträgt als CO<sub>2</sub>, dessen Treibhauspotential auf 1 gesetzt wird. Zur besseren Vergleichbarkeit hat sich die Staatengemeinschaft auf einen wirksamen Zeitraum von 100 Jahren geeinigt. Damit können die unterschiedlichen Beiträge zum Treibhauseffekt einzelner Treibhausgase verglichen und in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet werden. Methan GWP 23 (21), SF<sub>6</sub> GWP 22.200 (23.900), N<sub>2</sub>O GWP 296 (310), FKW GWP 6.000 – 9.000. Werte aus 3. Sachstandsbericht (IPCC 2001), in Klammern aus 2. Sachstandsbericht des IPCC 1995. Diese Werte werden für Berechnungen zum Kyoto Protokoll verwendet.

**Tropopause:** Grenzschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre.

**Troposphäre:** Unterster Teil der Atmosphäre bis ca. 10 km in mittleren Breitengraden (durchschnittlich 9 km in hohen Breitengraden und 16 km in den Tropen). In der Troposphäre nimmt die Temperatur normalerweise mit der Höhe ab.

**Ultraviolettstrahlung (UV):** Elektromagnetische Energie mit höheren Frequenzen bzw. kürzeren Wellenlängen (unter 400 nm) als sichtbares Licht; die UV-Strahlung unterteilt sich in drei Bereiche: UV-A (320 - 400 nm), UV-B (280 - 320 nm) und UV-C (40 - 280 nm).

**Unsicherheit (Uncertainty):** Eine Bezeichnung über den Grad der Unkenntnis eines Wertes (z.B. der Unkenntnis des künftigen Klimasystems). Unsicherheiten können aus dem Mangel an Informationen oder von einer Nichtübereinstimmung über das was bekannt oder sogar erkennbar ist, entstehen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten Unsicherheiten zu quantifizieren. Sie können daher durch verschiedene Maßnahmen quantifiziert werden (z.B. ein Bereich von Werten berechnet durch verschiedene Modelle) oder durch qualitative Aussagen (z.B. Wiedergabe des Urteils eines Expertenteams)

**Upwelling:** Englischer Begriff für das Aufströmen von tieferem, gewöhnlich kälterem und dichterem Meerwasser an die Oberfläche mit Schwerpunkten in bestimmten Auftriebsgebieten. In Bereichen mit Upwelling werden beträchtliche Mengen Kohlendioxid an die Atmosphäre abgegeben. Dies ist besonders im äquatorialen Pazifik von Bedeutung, wo 1-2 Gt C/a emittiert werden können. Gleichzeitig sind Auftriebsgebiete durch eine verstärkte Primärproduktion (Planktonbildung) gekennzeichnet.

**Versauerung der Ozeane:** Ein Rückgang des pH-Werts von Meerwasser aufgrund der Aufnahme von anthropogenem Kohlendioxid.

**Verwundbarkeit/Vulnerabilität:** Verwundbarkeit ist das Maß, zu dem ein System gegenüber nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderung, einschließlich Klimavariabilität und Extremwerte, anfällig ist und nicht damit umgehen kann.

**Walker-Zirkulation:** Bezeichnung für eine zonale Windzirkulationszelle über dem äquatorialen Pazifik.

**Wahrscheinlichkeit:** Die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses, einer Auswirkung oder eines Ergebnisses, wird, sofern sie wahrscheinlichkeitstheoretisch abgeschätzt werden kann, in IPCC-Berichten mit Standardbezeichnungen ausgedrückt, die wie folgt definiert sind:

<b>Terminologie</b>	<b>Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses/ einer Auswirkung</b>
praktisch sicher	>99% Eintrittswahrscheinlichkeit
sehr wahrscheinlich	>90% Wahrscheinlichkeit
wahrscheinlich	>66% Wahrscheinlichkeit
wahrscheinlicher als nicht	>50% Wahrscheinlichkeit
etwa so wahrscheinlich wie nicht	33% bis 66% Wahrscheinlichkeit
unwahrscheinlich	<33% Wahrscheinlichkeit
sehr unwahrscheinlich	<10% Wahrscheinlichkeit
außergewöhnlich unwahrscheinlich	<1% Wahrscheinlichkeit

**Wasserdampffenster:** Bezeichnung für Bereiche des elektromagnetischen Spektrums (3-5 µm, 8-11 µm, teilweise bis 20 µm), in denen das Treibhausgas "Wasserdampf" nur geringe Absorptionswirkung besitzt und so die terrestrische Ausstrahlung (bei wolkenfreier Atmosphäre) in das Weltall ermöglicht.

**Wetter:** Augenblicklicher Zustand der Atmosphäre

**Zugbahnen von Stürmen:** Ursprünglich bezog sich der Begriff auf die Zugbahnen einzelner zyklonischer Wettersysteme, aber heute wird er oft allgemein für die Region verwendet, wo die Hauptzugbahnen von außertropischen Störungen als Abfolge von Hoch- (antizyklonal) und Tiefdruckgebieten (zyklonal) auftreten.

Für das Glossar wurden u.a. verwendet:

IPCC Glossary for Climate Change

Glossar Synthesebericht 2007 (<http://proclimweb.scnat.ch/portal/ressources/33685.pdf>)

([www.greenfacts.org/de/klima-wandel/toolboxes/glossary.htm](http://www.greenfacts.org/de/klima-wandel/toolboxes/glossary.htm)),

ENSO-Lexikon ([www.enso.info/enso-lexikon/lexikon.html](http://www.enso.info/enso-lexikon/lexikon.html)),

Fernerkundungslexikon ([www.fe-lexikoninfo/pages/lexikon-f.htm](http://www.fe-lexikoninfo/pages/lexikon-f.htm)).

## 15 Abkürzungen

<i>AO</i>	Arktische Oszillation
<i>AAO</i>	Antarktische Oszillation
<i>AOGCM</i>	Gekoppeltes Atmosphären-Ozean-Modell
<i>ACIA</i>	Arctic Climate Impact Assessment (intern. Arktis Projekt mit Report 2004)
<i>ACSYS</i>	Arctic Climate System Study
<i>AMSU</i>	Amplified Microwave Sounding Unit
<i>AR4</i>	Fourth Assessment Report (IPCC), 4. Sachstandsbericht des IPCC
<i>BDEW</i>	Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft
<i>BMBFT</i>	Bundesministerium für Bildung, Forschung und Technologie
<i>BMU</i>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
<i>CCS</i>	Carbon Capture and Storage, Kohlendioxidabscheidung und Speicherung
<i>CCSP</i>	Climate Change Science Program USA
<i>CFC</i>	Chlorofluorocarbons, Fluorchlorkohlenwasserstoffe, FCKW
<i>CH<sub>4</sub></i>	Methan
<i>CLIVAR</i>	Climate Variability and Predictability Programme
<i>CMC</i>	Chemical Coupled Model (gekoppeltes Klimamodell mit atmosphärischer Chemie)
<i>CMIP</i>	Coupled Model Intercomparison Project
<i>CO</i>	Kohlenmonoxid, Kohlenstoffmonoxid
<i>CO<sub>2</sub></i>	Kohlendioxid, Kohlenstoffdioxid
<i>COP</i>	Conference of the Parties des UNFCCC
<i>CTM</i>	Chemisches Transportmodell
<i>DEKLIM</i>	Deutsches Klimaforschungsprogramm (BMFB-Programm)
<i>DENA</i>	Deutsche Energieagentur
<i>DLR</i>	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
<i>DPG</i>	Deutsche Physikalische Gesellschaft
<i>DWD</i>	Deutscher Wetterdienst
<i>EEA</i>	European Environment Agency, Europäische Umweltagentur
<i>EIA</i>	U.S. Energy Information Administration
<i>EMIC</i>	Erdsystemmodell mittlerer Komplexität
<i>ENES</i>	European Network for Earth System Modelling
<i>ENSO</i>	El Niño Southern Oscillation
<i>EPA</i>	Environment Protection Agency, USA
<i>EPICA</i>	European Project for Ice Coring in Antarctica (europ. Eisbohrkernprojekt 1996-2006)
<i>ESM</i>	Erdsystemmodell

<i>FCKW</i>	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
<i>FRA</i>	Forest Resources Association
<i>GOME</i>	Global Atmosphere Monitoring Experiment
<i>GWP</i>	Global Warming Potential, Treibhauspotential
<i>HBS</i>	Hamburger Bildungsserver
<i>HFC</i>	Hydrofluorocarbons, Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW)
<i>HFCKW</i>	Wasserstoffhaltige Fluorchlorkohlenwasserstoffe
<i>HFKW</i>	Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe
<i>ICSU</i>	International Council for Science (internat. Dachverband der wissenschaftl. Akademien)
<i>IEA</i>	Internationale Energieagentur
<i>IGCC</i>	Integrated Gasification Combined Cycle, Kohlevergasungsprozess mit Gas- und Dampfturbinenanlage
<i>INDOEX</i>	Indian Ocean Experiment (Feldexperiment Wechselwirkung Ozean – Atmosphäre)
<i>IPCC</i>	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (International Panel of Climate Change) der UN
<i>IR</i>	Infrarot
<i>ITK</i>	Innertropische Konvergenzzone
<i>LIA</i>	Little Ice Age, Kleine Eiszeit
<i>LULUCF</i>	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (land use, land use change and forestry), IPCC Special Report
<i>KLIWA</i>	Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (Kooperationsvorhaben Baden-Württemberg, Bayern und DWD)
<i>MOC</i>	Meridional Ocean Circulation = Meridionale Atlantische Umwälzbewegung
<i>MOP</i>	Treffen der Vertragsparteien des Kyoto-Protokolls
<i>MPI</i>	Max-Planck-Institut
<i>MSU</i>	Microwave Sounding Unit
<i>MWP</i>	Medial Warm Period, Mittelalterliche Warmperiode
<i>NAO</i>	Nordatlantische Oszillation (North Atlantic Oscillation)
<i>NASA</i>	National Aeronautics and Space Administration (US Raumfahrtbehörde)
<i>NIR</i>	Nationaler Inventarbericht
<i>NOAA</i>	National Oceanic and Atmospheric Administration (US Wetterdienst)
<i>N<sub>2</sub>O</i>	Distickstoffoxid, Lachgas
<i>NH<sub>3</sub></i>	Ammoniak
<i>NMVOC</i>	Non Methane Volatile Organic Compounds, Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan
<i>NO</i>	Stickstoffmonoxid
<i>NO<sub>2</sub></i>	Stickstoffdioxid

<i>PCMDI</i>	Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison
<i>PIK</i>	Potsdam Institut für Klimafolgenforschung
<i>PFC</i>	Perfluorocarbons, Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
<i>PRUDENCE</i>	Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects (EU-Forschungsprogramm)
<i>RSS</i>	Remote Sensing Systems, Santa Rosa California
<i>SAM</i>	Southern Annular Mode, Antarktische Oszillation
<i>SF<sub>6</sub></i>	Schwefelhexafluorid
<i>SO<sub>2</sub></i>	Schwefeldioxid
<i>SPM</i>	Summary for Policy Makers
<i>SRES</i>	Special Report on Emission Scenarios IPCC (Emissionsszenarien)
<i>TAR</i>	Third Assessment Report (IPCC), 3. Sachstandsbericht des IPCC 2001
<i>THC</i>	Thermo Haline Circulation, Thermohaline Zirkulation
<i>THG</i>	Treibhausgase
<i>TOC</i>	Gesamtkohlenstoff
<i>TS</i>	Technical Summary
<i>UAH</i>	University of Alabama, Huntsville
<i>UBA</i>	Umweltbundesamt, Dessau
<i>UNEP</i>	United Nations Environment Programme
<i>UNFCCC</i>	United Nations Framework Convention on Climate Change, Rahmenabkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen
<i>VDEW</i>	Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V., jetzt BDEW
<i>VGB</i>	VGB PowerTech e.V., europäischer Fachverband der Strom- und Wärmeerzeuger
<i>VOC</i>	Volatile organic compounds, flüchtige organische Verbindungen
<i>WBGU</i>	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
<i>WCI</i>	Water Cycle Initiative des USGCRP (US Global Change Research Program)
<i>WDCGG</i>	World Data Center for Greenhouse Gases
<i>WMO</i>	World Meteorological Organisation
<i>WCRP</i>	World Climate Research Programme
<i>ZVEI</i>	Zentralverband der Elektroindustrie

## Multiplikationsfaktoren, Abkürzungen, Vorsilben und Symbole

Multiplikationsfaktor	Abkürzung	Vorsatz	
		Name	Symbol
1.000.000.000.000.000	$10^{15}$	Peta	P
1.000.000.000.000	$10^{12}$	Tera	T
1.000.000.000	$10^9$	Giga	G
1.000.000	$10^6$	Mega	M
1.000	$10^3$	Kilo	k
100	$10^2$	Hekto	h
0,1	$10^{-1}$	Dezi	d
0,01	$10^{-2}$	Zenti	c
0,001	$10^{-3}$	Milli	m
0,000.001	$10^{-6}$	Mikro	$\mu$

Einheit	entspricht
1 Tonne (t)	1 Megagramm (Mg)
1 Kilotonne / Tausend Tonnen (kt)	1 Gigagramm (Gg)
1 Megatonne / Million Tonnen (Mt)	1 Teragramm (Tg)

Quelle: NIR 2010

## 16 Internetadressen

### Diskussionsforen:

www.real.climate.org (Klimawissenschaftler)  
<http://www.wissenslogs.de/wblogs/blog/klimalounge> (Rahmstorf)  
[www.co2science.org](http://www.co2science.org)  
 www.climateaudit.org  
 www.worldclimatereport.com  
<http://www.climateark.org/>  
<http://www.climatesciencewatch.org/>  
<http://www.worldviewofglobalwarming.org/>  
<http://www.climatedenial.org/>

**Klimakritik:** <http://www.tu-berlin.de/~kehl/project/lv-twk/02-intro-3-twk.htm>

**Klimaleugner:** EIKE: <http://eike-klima-energie.eu>, mit vielen Falschaussagen

Klimaskeptiker: <http://www.klimaskeptiker.info> mit vielen Falschaussagen

### Beobachtungen (Klimaelemente, Treibhausgase etc.):

CO2 jetzt: <http://co2now.org>  
 Kohlenstoffemissionen: <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/ndp030/>  
 Treibhausgase: [http://cdiac.esd.ornl.gov/pns/current\\_ghg.html](http://cdiac.esd.ornl.gov/pns/current_ghg.html)  
 CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center), <http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg.html>  
 Temperaturtrends: <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/>  
 NOAA Global Monitoring System: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>  
 Sonnenflecken: <http://sidc.oma.be>  
 Eis: State of the Cryosphere <http://nsidc.org/sotc/>  
 Gletscher: World Glacier Inventory, <http://nsidc.org/data/g01130.html>  
 Klimamodellvergleichsprojekt: [http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about\\_ipcc.php](http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php)  
 State of the Climate: <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/?report=global>  
 Strahlungsmessungen: [www.pmodwrc.ch](http://www.pmodwrc.ch)

### Institutionen:

Alfred-Wegener-Institut, Bremen: <http://www.awi-bremerhaven.de/>  
 Amerikanische Ozeanographie und Wetterbehörde: <http://www.noaa.gov/>

BMU: <http://www.bmu-klimaschutzinitiative.de/de>  
Climate Service Center (CSC):  
[http://www.gkss.de/science\\_and\\_industrie/klimaberatung/csc/index.html.de](http://www.gkss.de/science_and_industrie/klimaberatung/csc/index.html.de)  
Deutsche Meteorologische Gesellschaft (DMG): <http://www.dmg-ev.de/>  
Deutscher Wetterdienst – Klimainformationssystem: [www.dwd.de/de/Fund/EKlima/KLIS/](http://www.dwd.de/de/Fund/EKlima/KLIS/)  
Deutsches Klimarechenzentrum: [www.dkrz.de](http://www.dkrz.de)  
Englischer Wetterdienst: <http://www.met-office.gov.uk/>  
Europäische Umweltagentur: <http://eea.europa.eu/>  
European Climate Forum: [www.european-climate-forum.net/](http://www.european-climate-forum.net/)  
GKSS Forschungszentrum: <http://www.gkss.de/>  
Hamburger Bildungsserver:  
<http://www.hamburgerbildungsserver.de/index.phtml?site=themen.klima>  
IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): <http://www.ipcc.ch>  
IFM Geomar: <http://www.ifm-geomar.de/>  
Klimabüros: <http://www.klimabuero.de>  
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg: [www.mpimet.mpg.de](http://www.mpimet.mpg.de)  
Meteorologisches Institut Uni Hamburg: <http://www.mi.uni-hamburg.de/>  
National Academies Press, USA: <http://www.nap.edu/>  
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung: [www.pik-potsdam.de](http://www.pik-potsdam.de)  
ProClim – Schweizer Portal für Klimaforschung: [www.proclim.ch](http://www.proclim.ch)  
Klimainformation: <http://www.atmosphere.mpg.de/enid/660>  
Sekretariat der UN-Klimakonvention, (offizielle Texte): <http://unfccc.int>  
Umweltbundesamt, Dessau: [www.uba.de](http://www.uba.de)  
Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen:  
[www.wbgu.de](http://www.wbgu.de)  
UNEP-WCMC Forstprogramm: <http://www.unep-wcmc.org/forest/original.htm>  
WMO: <http://www.wmo.ch/index-en.html>

## 17. Anhang - Stellungnahmen zum Klimawandel

Die folgenden wissenschaftlichen Organisationen unterstützen die Konsensus Position, dass " der Großteil der globalen Erwärmung in den vergangenen Dekaden kann menschlichen Aktivitäten zugeordnet werden" (Quelle: <http://www.skepticalscience.com/global-warming-scientific-consensus.htm> ):

- American Association for the Advancement of Science
- American Astronomical Society
- American Chemical Society
- American Geophysical Union
- American Institute of Physics
- American Meteorological Society
- American Physical Society
- Australian Coral Reef Society
- Australian Meteorological and Oceanographic Society
- Australian Bureau of Meteorology and the CSIRO
- British Antarctic Survey
- Canadian Foundation for Climate and Atmospheric Sciences
- Canadian Meteorological and Oceanographic Society
- Environmental Protection Agency
- European Federation of Geologists
- European Geosciences Union
- European Physical Society
- Federation of American Scientists
- Federation of Australian Scientific and Technological Societies
- Geological Society of America
- Geological Society of Australia
- International Union for Quaternary Research (INQUA)
- International Union of Geodesy and Geophysics
- National Center for Atmospheric Research
- National Oceanic and Atmospheric Administration
- Royal Meteorological Society
- Royal Society of the UK

Die Akademien der Wissenschaften von 19 verschiedenen Ländern unterstützen alle den Konsensus. 11 Länder haben ein joint statement endorsing the consensus position unterzeichnet:

- Academia Brasileira de Ciencias (Brazil)
- Royal Society of Canada
- Chinese Academy of Sciences
- Academie des Sciences (France)
- Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (Germany)
- Indian National Science Academy
- Accademia dei Lincei (Italy)
- Science Council of Japan
- Russian Academy of Sciences
- Royal Society (United Kingdom)
- National Academy of Sciences (USA) (12 Mar 2009 news release)

Die Deutsche Meteorologische Gesellschaft hat 2007 zwei Stellungnahmen zum Klimawandel herausgegeben. Die Hauptaussage lautet: " Es ist wissenschaftlich gesichert, dass der Mensch in zunehmendem Maß das Klima beeinflusst".

([http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/stellungnahmen/DMG-KlimastatementKurzf\\_160307.pdf](http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/stellungnahmen/DMG-KlimastatementKurzf_160307.pdf),

[http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/stellungnahmen/Klimastatement\\_dmg\\_2007\\_09\\_10\\_c2.pdf](http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/stellungnahmen/Klimastatement_dmg_2007_09_10_c2.pdf)

Eine Umfrage unter 3146 Geowissenschaftlern stellte folgende Frage: "**Denken Sie, dass menschliche Aktivitäten einen entscheidenden Einfluss auf die Veränderung der durchschnittlichen globalen Temperaturen haben?**" (Doran 2009). Über 90% der Teilnehmer hatten Ph.D.s und 7% hatten einen Masters-Abschluss. Insgesamt beantworteten 82% der Wissenschaftler die Frage mit Ja. Was jedoch bemerkenswert ist, sind die Antworten verglichen mit der Erfahrung in Klimawissenschaften. Von den Wissenschaftlern, die keine Klimatologen waren und die auch keine Forschungsarbeiten veröffentlichten, antworteten 77% mit Ja. Demgegenüber antworteten 97,5% der Klimatologen, die aktuell Forschungsergebnisse über den Klimawandel veröffentlichen, mit Ja.

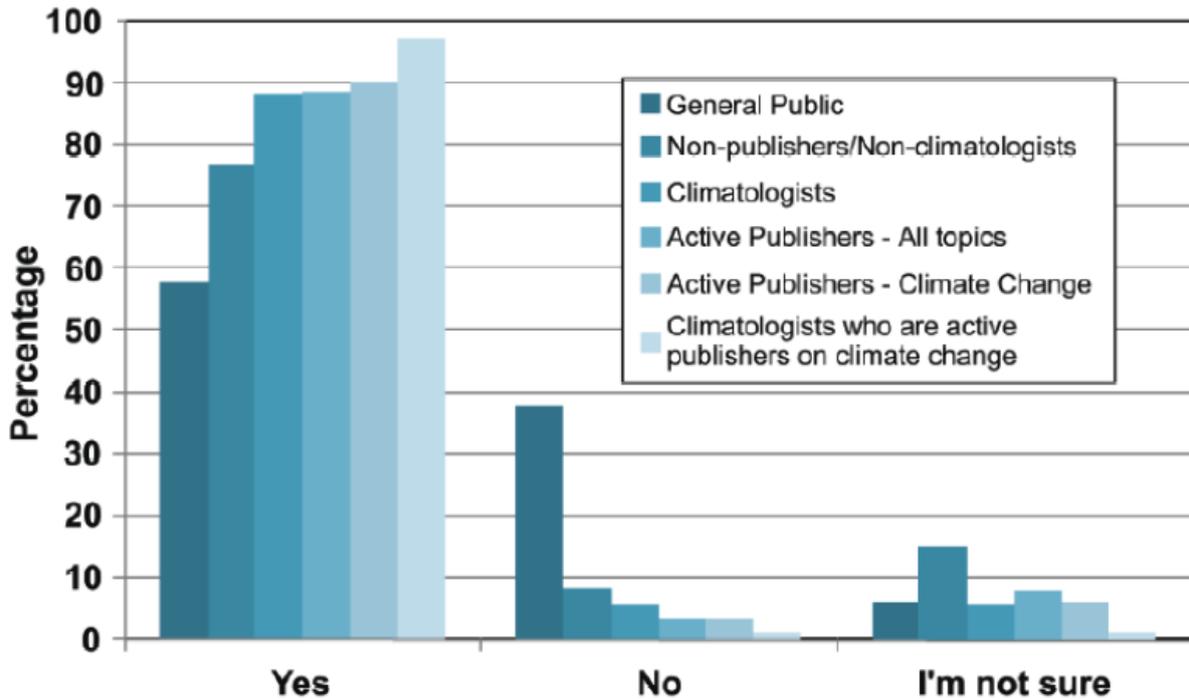


Abbildung : Antworten auf die Frage "Denken Sie, dass menschliche Aktivitäten einen entscheidenden Einfluss auf die Veränderung der durchschnittlichen globalen Temperaturen haben?" (Doran 2009) Die Zahlen für die Allgemeinheit (General Public) stammen von einer [Gallup Umfrage aus dem Jahr 2008](#)

## 18 Ausgewählte Literatur

### 18.1 Bücher, Broschüren

- Archer D, Rahmstorf S (2010):* The climate crisis. Cambridge University Press; 249 S.
- Berner, U. und Streif, H.-J. (2004):* Der Rückblick – Ein Schlüssel für die Zukunft, 4. Auflage, 259 Seiten, ISBN 3-510-95913-2, Klimafakten, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
- BMBF (2003):* Herausforderung Klimawandel, Broschüre  
([www.bmbf.de/pub/klimawandel.pdf](http://www.bmbf.de/pub/klimawandel.pdf))
- Brönnimann, S. (2002):* Ozon in der Atmosphäre. Verlag Paul Haupt AG, Bern, 184 S.
- Cubasch, U. und Kasang, D. (2000):* Anthropogener Klimawandel. Klett-Perthes-Verlag, Stuttgart, ISBN 3-623-00856-7, 128 S.
- Düwel-Hösselbart (2002):* Ernteglück und Hungersnot, Konrad Theiß Verlag GmbH, Stuttgart, 144 S.
- Flannery T (2007):* Wir Wettermacher. Wie die Menschen das Klima verändern und was das für unser Leben bedeutet. Fischer Verlag, Frankfurt; 382 S.
- Glaser R (2008):* Klimageschichte Mitteleuropas. 1200 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. 2. Aufl., Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt; 264 S.
- Graßl H (2007):* Klimawandel — Was stimmt? Die wichtigsten Antworten. Verlag Herder, Freiburg i. Br.; 128 S.
- Hauser, W. (2002):* Klima. Das Experiment mit dem Planeten Erde., Begleitband und Katalog zur Sonderausstellung des Deutschen Museums vom 7.11.2002 bis 15.6.2003, München
- Hupfer P, Kuttler W (Hrsg, 2006):* Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 12. Aufl., B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden; 553 S. (Lehrbuch)
- Hurrell, J., Kushnir, Y., Ottersen, G., and Visbeck M. (2003):* The North Atlantic Oscillation. Climatic Significance and Environmental Impact. AGU, Washington DC
- IPCC (2001):* Climate Change 2001: The Scientific Basis, Cambridge University Press UK, S. 944 ff (Third Assessment Report. WG 1)
- IPCC 2001 (2002):* Klimaänderung 2001, Synthesebericht, Herausgeber: Deutsche IPCC Koordinierungsstelle des BMBF und des BMU  
([http://www.ipcc.ch/pub/nonun/IPCC02\\_Synthese\\_D.pdf](http://www.ipcc.ch/pub/nonun/IPCC02_Synthese_D.pdf))
- IPCC (2007) 4th Assessment Report:* <http://www.ipcc.ch/> und weiteres Material zum Thema auf der Web-Seite
- Klima (2002):* Das Experiment mit dem Klima Erde, Begleitband und Katalog zur Sonderausstellung des Deutschen Museums vom 7.11.2002 bis 15.6.2003, München, S. 138-149
- Latif, M. (2003):* Hitzerekorde und Jahrhundertflut. Herausforderung Klimawandel. Was wir jetzt tun müssen. Heyne Verlag, 160 S.
- Latif M (2009):* Klimawandel und Klimadynamik. UTB Ulmer Verlag; 220 S.
- Lozán, J. L., Graßl, H., Hupfer, P. (1998):* Warnsignal Klima. Wissenschaftliche Fakten. 465 S., Wissenschaftliche Auswertungen + GEO, Hamburg; engl. überarbeitete Ausgabe 2001
- Müller M, Fuentes U, Kohl H (2007):* Der UN-Weltklimareport — Bericht über eine aufhaltsame Katastrophe. Kiepenheuer & Witsch, Köln; 429 S.
- Pfister, C. (1999):* Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496-1995). Verlag Paul Haupt
- Promet (2002):* Das Klimasystem der Erde, DWD, Heft 3/4, Teil I
- Promet (2003):* Modellierung natürlicher Klimaschwankungen, DWD, Heft 1-4, Teil II
- Promet (2004):* Modellierung der Klimaänderungen durch den Menschen, 1. und 2. Teilheft, DWD, Heft 3 und 4 Teil III
- Rahmstorf S, Schellnhuber HJ (2007):* Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie. CH Beck Wissen, München; 144 S.
- Schellnhuber, Hans Joachim, W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley und G. Yohe (Hrsg.) (2006):* Avoiding Dangerous Climate Change, Cambridge University Press

*Schönwiese CD (2008):* Klimatologie. 3. Aufl. Ulmer, Stuttgart; 472 S.

*Schuchardt, B., und Schirmer, M. (2005):* Klimawandel und Küste: Die Zukunft der Unterwe-  
serregion. Springer Verlag, Heidelberg, 342 S.

*Wanner, H., Gyalistras D., Luterbacher, J., Rickli, R., Salvisberg, E., und Schmutz, C. (2000):*  
Klimawandel im Schweizer Alpenraum. vdf Hochschulverlag AG an der ETH, Zürich, 296 S.

*Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen WBGU (2008):* Climate Change as  
a Security Risk. Berlin; 248 S.

*Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen WBGU (2009):* Kassensturz für  
den Weltklimavertrag - Der Budgetansatz. Berlin; 58 S.

## 18.2 Beiträge (Literaturauswahl, insbesondere nach dem IPCC Report 2007)

*ACIA Bericht (2005):* Arctic Climate Impact Assessment  
(<http://www.acia.uaf.edu/pages/scientific.html>)

*Adams, J. B., Mann, M. E., and Ammann, C. M. (2003):* Proxy evidence for an El Niño-like  
response to volcanic forcing, *Nature* 426, S. 274-278

*AMAP (2009):* Update on Selected Climate Issues of Concern (Observations, Short-lived  
Climate Forcers, Arctic Carbon Cycle, Predictive Capability). Arctic Monitoring and Assess-  
ment Programme (AMAP), Oslo, Norway. v+15 pp.,  
<http://www.amap.no/assessment/generalpublic.htm>

*Andreae M.O. et al. (2008):* Aerosol–cloud–precipitation interactions. Part 1. The nature and  
sources of cloud-active aerosols, *Earth-Science Reviews* 89, S. 13–41

*Anthoff D. Et al. (2009):* Klimaschäden und Klimaverhandlungen, ifo Schnelldienst 22/2009 –  
62. Jahrgang, [http://www.cesifo-group.de/portal/page/portal/ifoContent/N/pr/pr-  
PDFs/Schnelldienst2009PDF/ifosd\\_2009\\_22\\_5.pdf](http://www.cesifo-group.de/portal/page/portal/ifoContent/N/pr/pr-PDFs/Schnelldienst2009PDF/ifosd_2009_22_5.pdf)

*Anthoff, D. Tol, R.S. et al. (2009):* Discounting for Climate Change, *Economics*, Vol. 3, 2009-  
24, <http://www.economics-ejournal.org/economics/journalarticles/2009-24>

*Arndt, D. S., M. O. Baringer, and M. R. Johnson, Eds., (2010):* State of the Climate in 2009.  
*Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91 (6), S. 1-S224.

Avoiding Dangerous Climate Change, Scientific Symposium on Stabilisation of Greenhouse  
Gases, Febr. 1st to 3rd, 2005, Met Office, Exeter, United Kingdom  
(<http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/dangerous-cc.htm>)

AWI (2006): Rekordluftverschmutzung über der Arktis, Pressemitteilung.AWI, 11.05.2006

*Bader, D. (2004):* An Appraisal of Coupled Climate Model Simulations, UCRL-TR-202550  
([www-pcmdi.llnl.gov/model\\_appraisal.pdf](http://www-pcmdi.llnl.gov/model_appraisal.pdf))

*Bakan S., Raschke E. (2002):* Der natürliche Treibhauseffekt, *promet*, Jahrg. 28, Nr. 3/4, S.  
85 - 94

*Bard, E. (2005):* More Notes on Global Warming, *Physics Today*, May 2005,  
([www.Physicstoday.org](http://www.Physicstoday.org))

*Barnett, T. P., et al. (2005):* Penetration of Human-Induced Warming into the World's  
Oceans, *Science* 309, No. 5732, S. 284-287

*Barring, L., and Von Storch, H. (2004):* Scandinavian storminess since about 1800, *Geophys.*  
*Res. Lett.*, 31, L20202, GL020441

*Bartels H., et al. (2006):* Klimaentwicklung und Hochwasserschutz, *Klimastatusbericht 2005*  
(DWD), S. 33-43

*BASC (2005):* Radiative Forcing of Climate Change: Expanding the Concept and Addressing  
Uncertainties, Board on Atmospheric Sciences and Climate (BASC), National Academy of  
Science, USA

*Beck C. et al. (2007):* Entwicklung einer Beobachtungsdatengrundlage für DEKLIM und  
statistische Analyse der Klimavariabilität, Abschlussbericht zum DEKLIM Forschungsvorha-  
ben, [http://www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima/PDF\\_Dateien/Inst\\_6\\_mod1.pdf](http://www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima/PDF_Dateien/Inst_6_mod1.pdf)

*Beerling, W.P. et al. (2008):* Missing methane emissions from leaves of terrestrial plants. *Global*  
*Change Biology* 14, S. 1821-1826.

- Bender M.A. (2010):* Modeled Impact of Anthropogenic Warming on the Frequency of Intense Atlantic Hurricanes, *Science* 22, Vol. 327. Nr.. 5964, S. 454 - 458
- Benestad, R. E., and G. A. Schmidt (2009),* Solar trends and global warming, *J. Geophys. Res.*, 114, D14101, doi:10.1029/2008JD011639.
- Bengtsson, L. (2004):* Natürliche und anthropogene Antriebe des Klimasystems und die Folgen in Klimamodellrechnungen für Vergangenheit und Zukunft, *Promet (DWD)* 30, Nr.4, S. 188-201
- Bengtsson, L., et al. (2004):* The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic – A Possible Mechanism, *J. Climate* 17, S. 4045-4057
- Bengtsson, L., K.I Hodges and E. Roeckner, (2006):* Storm tracks and climate change. *J. of Climate*
- Bengtsson, L., et al. (2007):* How may Tropical Cyclones Change in a Warmer Climate? *Tellus*, V59A, S. 539-561
- Bengtsson, L., and K. I. Hodges (2008):* Comment on “Is the number of North Atlantic tropical cyclones significantly underestimated prior to the availability of satellite observations?” by Edmund K. M. Chang and Yanjuan Guo, *Geophys. Res. Lett.*,35,
- Bengtsson, L., K. I. Hodges and N. Keenlyside (2009):* Will Extratropical Storms Intensify in a Warmer Climate? In: *Journal of Climate* 22, 2276-2301
- Bindschadler, R. (2006):* Hitting the Ice Sheets where it hurts, *Science* 311, No. 5768, S. 1720-1721
- Blessing, S., et al. (2005):* Daily North-Atlantic Oscillation (NAO) index: Statistics and its stratospheric polar vortex dependence, *Meteorologische Zeitschrift* 14, No. 6, S. 763-769
- Bissolli P. (2001):* Vulkanismus und Klima, *Klimastatusbericht 2000*, DWD
- BMBF (2003):* Herausforderung Klimawandel, Broschüre
- BMU (2007):* Entwicklungsstand und Perspektiven von CCS-Technologien in Deutschland, [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/kabinetbericht\\_ccs.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/kabinetbericht_ccs.pdf)
- BMU 2009: ERNEUERBARE ENERGIEN IN ZAHLEN*, Internet-Update ausgewählter Daten, Stand: Ende 2009, [http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere\\_ee\\_zahlen\\_update\\_bf.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_ee_zahlen_update_bf.pdf)
- BMU 2010: Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2009* Stand: 18. März 2010, ([http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee\\_hintergrund\\_2009\\_bf.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_hintergrund_2009_bf.pdf))
- BMWi (2010):* für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung 28. September 2010, (<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/energiekonzept-2010,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>)
- Böhm R. (2006):* Homogenisierung langer Klimareihen des Hohenpeißenberg und des Alpenraums, *GAW Brief (DWD) Nr. 36* ([www.dwd.de/gaw](http://www.dwd.de/gaw))
- Bony, S. et al., (2006):* How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *J. Climate* 19, S. 3445-3482,
- Böttinger, M. (2004):* Das Erdsystem im Höchstleistungsrechner – Klimaprognosen, *DKRZ Jahrbuch 2004*
- Boucher, O., Pham, M. (2002):* History of sulfate aerosol radiative forcings, *GRL* 29, No. 9, 1308
- Bousquet, P. et al. (2006):* Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability. *Nature* 443, S. 439-443
- Box J.E. et al. (2009):* Greenland Ice Sheet Surface Air Temperature Variability: 1840–2007, *JOURNAL OF CLIMATE*, VOL. 22, S. 4029-4049
- Brand, S., K. Dethloff und D. Handorf (2008):* Tropospheric circulation sensitivity to an interactive stratospheric ozone, *Geophys. Res. Lett.* 35, L05809
- Brasseur, G. P. Roeckner, E. (2005):* Impact of improved air quality on the future evolution of climate. *Geophysical Research Letters* 32

- Brönnimann, S., et al. (2004):* Extreme climate of the global troposphere and stratosphere in 1940 – 1942 related to El Niño, *Nature* 431, S. 971-974
- Brönnimann, S., et al. (2005):* New Approaches for Extending the Twentieth Century Climate Record, *EOS* 86, No. 1, S. 1-3
- Brönnimann, S. (2004/05):* Vorlesungsskript “Großräumige Klimaschwankungen”, WS 2004/05  
[http://www.iac.ethz.ch/people/stefanbr/teaching/vorlesung1/Klimaschwankungen\\_31\\_32.pdf](http://www.iac.ethz.ch/people/stefanbr/teaching/vorlesung1/Klimaschwankungen_31_32.pdf)  
 ) ([http://www.iac.ethz.ch/education/largescale\\_climate\\_variability/index](http://www.iac.ethz.ch/education/largescale_climate_variability/index))
- Brönnimann, S. (2005/06):* - Grossräumige Klimaschwankungen – WS 05/06, [http://tomix.homelinux.org/~thomas/eth/7\\_semester/largescale\\_climate\\_variability\\_WS\\_2006\\_2007/unterlagen/klimaschwankungen\\_1\\_2.pdf](http://tomix.homelinux.org/~thomas/eth/7_semester/largescale_climate_variability_WS_2006_2007/unterlagen/klimaschwankungen_1_2.pdf)
- Brohan, P., et al. (2006):* Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850, *J. Geophys. Res.* 111
- Brovkin, V., et al. (2004):* Role of land use changes for atmospheric CO<sub>2</sub> increase and climate change during the last 150 years. *Global Change Biology* 10, S. 1253 – 126
- Brownstein, J.S. et al., (2005):* Effect of climate change on Lyme Disease Risk in North America, *EcoHealth* 2, No. 1, S. 38-46
- Budikova, D. (2009):* Role of Arctic sea ice in global atmospheric circulation: A review, *Global and Planetary Change* 68, S. 149–163
- Bryden, H. L. (2005):* Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N, *Nature* 438, S. 655-657
- Calogovic, J., C. Et al. (2010):* Sudden cosmic ray decreases: No change of global cloud cover, *Geophys. Res. Lett.*, 37,
- Canadell, J.G. et al. (2007):* Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 10.1073/pnas.0702737104
- Caspary, H. J. (2004):* Zunahme kritischer Wetterlagen als Ursache für die Entstehung extremer Hochwasser in Süddeutschland, *KLIWA-Symposium 2004*, S. 135-151 (<http://www.kliwa.de>)
- Chapin III, F. S., et al. (2005):* Role of Land-Surface Changes in Arctic Summer Warming, *Science* 310, No. 5748, S. 657-660
- Chen, J.L., et al. (2006):* Satellite Gravity measurements Confirm Accelerated Melting of Greenland Ice Sheet, Published Online August 10, 2006 *Science* DOI: 10.1126/science.1129007
- Chen, J.L., et al. (2009):* Spectral signatures of climate change in the Earth’s infrared spectrum between 1970 and 2006, [http://www.eumetsat.int/Home/Main/Publications/Conference\\_and\\_Workshop\\_Proceedings/groups/cps/documents/document/pdf\\_conf\\_p50\\_s9\\_01\\_harries\\_v.pdf](http://www.eumetsat.int/Home/Main/Publications/Conference_and_Workshop_Proceedings/groups/cps/documents/document/pdf_conf_p50_s9_01_harries_v.pdf)
- Christy, J. R., et al. (2003):* Error estimates of version 5.0 of MSU-AMSU bulk atmospheric temperatures, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20, No. 5, S. 613-629
- Christy, J. R., and Norris, W. B. (2004):* What may we conclude about global tropospheric temperature trends? *Geophys. Res. Lett.* 31, L06211
- Chylek, P., C. K. Folland, G. Lesins, M. K. Dubey, and M. Wang (2009):* Arctic air temperature change amplification and the Atlantic Multidecadal Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 36,
- Ciais P, Reichstein M, Viovy N, et al. (2005):* Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 437, S. 529–533.
- Claussen, M. (2003):* Klimaänderungen: Mögliche Ursachen in Vergangenheit und Zukunft, *UWSF- Umweltchem. Ökotox.* 15 (1), S. 21-30
- Claussen, M. (2003):* Die Rolle der Vegetation im Klimasystem, *Promet (DWD)* 29, Nr.1-4, S. 80-89
- Claussen, P. (2008) :* Vortrag Prof. Claussen, [http://www.sdw-nds.de/index.php?option=com\\_content&task=view&id=203&Itemid=207](http://www.sdw-nds.de/index.php?option=com_content&task=view&id=203&Itemid=207)

- Cofala, J. et al. (2006):* Scenarios of Global Anthropogenic Emissions of Air Pollutants and Methane until 2030, Final Report for WP3, IIASA No. 04-114
- Cofala, J. et al. (2009):* Emissions of Air Pollutants for the World Energy Outlook 2009 Energy Scenarios, Final Report, IIASA, [www.iiasa.ac.at](http://www.iiasa.ac.at)
- Cogley, J.G. (2009):* Geodetic and direct mass-balance measurements: comparison and joint analysis. *Annals of Glaciology* 50(50), S. 96-100.
- COORETEC (2003):* Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke, BMWA ([www.fz-juelich.de/pj/projekte/datapool/page/1329/doku527.pdf](http://www.fz-juelich.de/pj/projekte/datapool/page/1329/doku527.pdf))
- Copenhagen Diagnosis 2009:* The Copenhagen Diagnosis, Nov 2009, [http://www.ccrcc.unsw.edu.au/Copenhagen/Copenhagen\\_Diagnosis\\_HIGH.pdf](http://www.ccrcc.unsw.edu.au/Copenhagen/Copenhagen_Diagnosis_HIGH.pdf)
- Crutzen, P. (2006):* Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change* 77, S. 211-219
- Cubasch, U. (2002):* Variabilität der Sonne und Klimaschwankungen, *promet (DWD)* 28, Nr.3/4, S. 123-132
- Cubasch, U. (2003):* Perspektiven der Klimamodellierung, *DWD Klimastatusbericht 2002*, S. 7-16
- Cubasch, U. (Hrsg.) (2007):* Perspektiven der Klimamodellierung in *Der belebte Planet II. – Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin*, <http://www.geo-fu-berlin.de/met/ag/klimod/forschung/Cubasch.pdf>
- Cubasch, U., et al. (2006):* Simulation of the role of solar and orbital forcing on climate, *Advances in Space Research* 37, S. 1629-1634
- Cunningham S.A. et al. (2007):* Temporal Variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26.5°N, *Science* Vol. 317, Nr. 5840, S. 935 - 938
- DKRZ (2009):* Höchstleistung für die Klimaforschung: Das Deutsche Klimarechenzentrum, [http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2010/4955/pdf/DKRZ\\_Brochure\\_2009\\_DE\\_screen.pdf](http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2010/4955/pdf/DKRZ_Brochure_2009_DE_screen.pdf)
- DEHSt (2008):* Emissionshandel: Die Zuteilung von Emissionsberechtigungen in der Handelsperiode 2008–2012, [http://www.dehst.de/cfn\\_153/SharedDocs/Downloads/Publikationen/Zuteilung2012\\_\\_Auswertung\\_\\_Zuteilung,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Zuteilung2012\\_\\_Auswertung\\_Zuteilung.pdf](http://www.dehst.de/cfn_153/SharedDocs/Downloads/Publikationen/Zuteilung2012__Auswertung__Zuteilung,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Zuteilung2012__Auswertung_Zuteilung.pdf)
- DEHSt (2010):* Kohlendioxidemissionen der Emissionshandelspflichtigen Anlagen im Jahr 2009 in Deutschland, [http://www.dehst.de/cfn\\_153/SharedDocs/Downloads/Publikationen/Zuteilung2012\\_\\_VET-Bericht2009,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Zuteilung2012\\_\\_VET-Bericht2009.pdf](http://www.dehst.de/cfn_153/SharedDocs/Downloads/Publikationen/Zuteilung2012__VET-Bericht2009,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Zuteilung2012__VET-Bericht2009.pdf)
- Delworth, T. L., and Knutson, T. R. (2000):* Simulation of early 20th century global warming, *Science* 287, S. 2246 – 2250
- Dena (2005):* „Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020“ (dena-Netzstudie), [http://www.offshore-wind.de/page/fileadmin/offshore/documents/dena\\_Netzstudie/dena-Netzstudie\\_Zusammenfassung\\_2005-2-23.pdf](http://www.offshore-wind.de/page/fileadmin/offshore/documents/dena_Netzstudie/dena-Netzstudie_Zusammenfassung_2005-2-23.pdf)
- Dentener F., et al., (2006):* 2006: Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: A multimodel evaluation. *Global Biogeochem. Cycles*, 20, GB4003
- Dessler E. et al. (2008):* Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations, 2003–2008, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 35
- Dessler, A. E. and S. M. Davis (2010):* Trends in tropospheric humidity from reanalysis systems, *J. Geophys. Res.*, 115, D19127
- Dethloff, K., et al. (2006):* A dynamical link between the Arctic and the global climate system, *Geophys. Res. Lett.* 33, L03703
- Dlugokencky, E.J., L. Bruhwiler, J.W.C. White, L.K. Emmons, P.C. Novelli, S.A. Montzka, K.A. Masarie, P.M. Lang, A.M. Crotwell1, J.B. Miller, and L.V. Gatti. (2009)* Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH<sub>4</sub> burden, *Geophys. Res. Lett.*, 36,

- DNK (2006)*: Studie Weltenergieericht 2006, DNK/WEC ([http://www.co2-handel.de/media/docs/Studien/studie\\_weltenergieericht\\_2006.pdf](http://www.co2-handel.de/media/docs/Studien/studie_weltenergieericht_2006.pdf) )
- Donat MG, Leckebusch GC, Pinto JG, Ulbrich U (2010)*: European storminess and associated circulation weather types: future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. *Clim Res* 42, S.27-43
- Dowdeswell, J. A. (2006)*: The Greenland Ice Sheet and Global Sea-Level Rise, *Science* 311, S. 963-964
- DPG (2005)*: Klimaschutz und Energieversorgung in Deutschland 1990 – 2020 ([www.dpg-physik.de/info/broschueren/klimastudie\\_2005.pdf](http://www.dpg-physik.de/info/broschueren/klimastudie_2005.pdf))
- Dueck, T.A., et al. (2007)*: No evidence for substantial aerobic methane emission by terrestrial plants: a <sup>13</sup>C-labelling approach. *New Phytologist* 175, S.29-35.
- Dürr, D. (2009)*: Carbon Capture and Storage (CCS), Chancen und Risiken der Kohlendioxidabscheidung und –speicherung, Inagendo GmbH, energy policy consulting, ([http://inagendo.com/res/doc/inagendo\\_ccs\\_v10.pdf](http://inagendo.com/res/doc/inagendo_ccs_v10.pdf))
- DWD (2010)*: Klimastatusbericht 2009, [http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU22/klimastatusbericht/einzelne\\_berichte/download\\_ksb2009.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/download\\_ksb2009.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU22/klimastatusbericht/einzelne_berichte/download_ksb2009.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/download_ksb2009.pdf)
- Ecofys (2005)*: reductions of SF<sub>6</sub> emissions from high and medium voltage electrical equipment in Europe, <http://www.ecofys.de/de/veroeffentlichungen/documents/EcofysFinalReportJune28.pdf>
- EEA (2006)*: Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2004 and inventory report 2006, EEA Technical report No 6/2006, version 31 January 2007
- EEA (2008)*: Impacts of Europe's changing climate — 2008 indicator-based assessment, EEA Report No 4/2008, ([http://www.eea.europa.eu/publications/eea\\_report\\_2008\\_4](http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_4))
- EEA (2009)*: European Environment Agency, Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2009 Tracking progress towards Kyoto targets, [http://www.eea.europa.eu/publications/eea\\_report\\_2009\\_9/ghg-trends-and-projections-2009-summary.pdf](http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2009_9/ghg-trends-and-projections-2009-summary.pdf)
- EEA (2010)*: Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2008 and inventory report 2010, EEA Technical Report No 6/2010, (<http://www.eea.europa.eu/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2010>)
- EEA/LRTAP (2010)*: European Union emission inventory report 1990–2008 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP), EEA Technical report No 7/2010, <http://www.eea.europa.eu/publications/european-union-emission-inventory-report>
- EEA/7 (2010)*: Tracking progress towards Kyoto and 2020 targets in Europe, EEA Report, No 7/2010, (<http://www.eea.europa.eu/publications/progress-towards-kyoto> )
- Elsner J.B. (2008)*: The increasing intensity of the strongest tropical cyclones, *Nature*, Vol. 455
- Emanuel, K. (2005)*: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years, *Nature* 436, S. 686-688
- Emanuel, K. (2005)*: Emanuel replies to Pielke and Landsea, *Nature* 438, E13
- Emanuel, K., R. Sundararajan, and J. Williams, 2008*: Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, S. 89, 347-367
- Emmrich P. (2010)*: Bemerkungen zur statistischen Sicherheit des Wandels der Zonalität in der Westwindzone im vergangenen Jahrhundert, *DMG Mitteilungen* 1/2010
- Energieszenarien (2010)*: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung, Projekt Nr. 12/10, ewi, gws, prognos, [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energieszenarien\\_2010.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energieszenarien_2010.pdf)
- EPA (2001)*: Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions from Developed Countries, 1990-2100, EPA-430-R-01-007
- EPA (2005)*: Global Anthropogenic Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020, Draft

- EPA (2006)*: Global Mitigation of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases (EPA Report 430-R-06-005) <http://www.epa.gov/nonco2/econ-inv/international.html>
- EPA (2010)*: Methane and Nitrous Oxide Emissions From Natural Sources, EPA 430-R-10-001, <http://www.epa.gov/methane/sources.html>
- EPA (2010)*: EPA's Response to the Petitions to Reconsider the Endangerment and Cause or Contribute Findings for Greenhouse Gases under Section 202(a) of the Clean Air Act, Volume 2: Issues Raised by Petitioners on EPA's Use of IPCC, (<http://www.epa.gov/climatechange/endangerment/petitions.html>)
- Erykin et al. (2009)*: Solar activity and the mean global temperature, *Environ. Res. Lett.* 4 (2009) 014006 (5pp)
- Exeter (2005)*: Avoiding Dangerous Climate Change, Scientific Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gases, Febr. 1st to 3rd, 2005, Met Office, Exeter, United Kingdom, <http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/dangerous-cc.htm>
- Feichter, J., et al. (2004)*: Nonlinear Aspects of the Climate Response to Greenhouse Gas and Aerosol Forcing, *Journal of Climate* 17, S. 2384- 2398
- Feichter, J., Lohmann, U. (2004)*: Aerosole und Klima, *Promet (DWD)* 30, Nr.3, S. 122-133
- Feulner, G., and S. Rahmstorf (2010)*: On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth, *Geophys. Res. Lett.*, 37,
- Fischer, B., Kruhl, J. (2006)*: Erste Erfahrungen mit dem Emissionsrechtshandel, *VGB PowerTech*, Nr. 1/2, S. 50-54
- Flanner, M. G. (2009)*, Integrating anthropogenic heat flux with global climate models, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L02801
- Flentje H. et al. (2010)*: The Eyjafjallajökull eruption in April 2010 – detection of volcanic plume using in-situ measurements, ozone sondes and a new generation ceilometer network *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 10, 14947–14968, 2010 [www.atmos-chem-phys-discuss.net/10/14947/2010/](http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/10/14947/2010/)
- FRA (2010)*: Global Forest Resources Assessment 2010, <http://foris.fao.org/static/data/fra2010/KeyFindings-en.pdf>
- Franke R. et al. 2008*: Die Winterstürme im Jahr 2007, Klimastatusbericht 2007, (DWD), [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=dwd\\_www\\_klima\\_umwelt&T3420054081166520506140gsbDocumentPath=Content%2FOeffentlichkeit%2FKU%2FKU2%2FKU22%2FKlimastatusbericht%2Feinzelne\\_\\_berichte%2Fksb2007\\_\\_pdf%2Fa4\\_\\_2007.html](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwd_www_klima_umwelt&T3420054081166520506140gsbDocumentPath=Content%2FOeffentlichkeit%2FKU%2FKU2%2FKU22%2FKlimastatusbericht%2Feinzelne__berichte%2Fksb2007__pdf%2Fa4__2007.html):Fricke, W. (2001): Wie entwickeln sich das bodennahe und das troposphärische Ozon? *Ozonbulletin des DWD* ([www.dwd.de/research/mohp/hp2/oz\\_start.htm](http://www.dwd.de/research/mohp/hp2/oz_start.htm))
- Friis-Christensen, E., and Lassen, K. (1991)*: Length of the solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate, *Science* 254, S. 698-700
- Fritsche, U.R. (2007)*: Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuklearen, fossilen und erneuerbaren Strombereitstellung - Arbeitspapier -, ([http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hintergrund\\_atomco2.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hintergrund_atomco2.pdf))
- Gleckler, P. et al. (2007)*: Summary of the 3rd WGNE Workshop on Systematic Errors in Climate and NWP Models. UCRL-TR-403078, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 8 S. ([http://www.pcmdi.llnl.gov/wgne2007/wgne-pcmdi\\_3rd\\_errors\\_workshop\\_summary.pdf](http://www.pcmdi.llnl.gov/wgne2007/wgne-pcmdi_3rd_errors_workshop_summary.pdf))
- Gillett, N., and Thompson, D. W. J. (2003)*: Simulation of recent Southern Hemisphere climate change, *Science* 302, S. 273-275
- Gillett, N. (2005)*: Northern Hemisphere Circulation, *Nature* 437, S. 496
- Gilge, S. (2001)*: Kohlenmonoxid: Ein wichtiges Spurengas in der Troposphäre, *GAW Brief* (DWD), Nr. 3
- Gilge, S. et al. (2007)*: Trend des bodennahen Ozons, *GAW Brief* Nr. 38
- Gilge, S. Plass-Dülmer C. (2010)*: Stark erhöhte SO<sub>2</sub>-Konzentrationen an der Zugspitze infolge des Eyjafjallajökull-Ausbruchs, *GAW Brief* des DWD, Nr. 51, April 2010
- Goodale, C. L., et al. (2002)*: Forest Carbon Sinks in the Northern Hemisphere, *Ecological Applications* 12(3), S. 891-899

- Gordon, L.J. et al. (2005):* Human modification of global water flows from the land surface, PNAS 102, No. 21, S. 7612-7617
- Goswami, B. N., et al. (2006):* A physical mechanism for North Atlantic SST influence on the Indian summer monsoon, Geophys. Res. Lett. 33, LO2706
- Graf, H. (2002):* Klimaänderungen durch Vulkane, Promet (DWD) 28, Nr. 3/4, S. 133-138
- Graf, H. F. (2004):* The Complex Interaction of Aerosols and Clouds, Science 303, S. 1309-1311
- Graßl, H. (2004):* Einführung, Numerische Klimamodelle – Was können sie, wo müssen sie verbessert werden? Promet (DWD) 30, Nr. 3, S. 97-98
- Gray, L. J., et al. (2005):* A review of the influences of solar changes on the earth climate, Hadley Centre technical note 62 (Jan. 2005)
- Gray, L.J., J. Beer, M. Geller, J.D. Haigh, M. Lockwood, K. Matthes, U. Cubasch, D. Fleitmann, G. Harrison, L. Hood, J. Luterbacher, G.A. Meehl, D. Shindell, B. van Geel, and W. White, (2010):* Solar influence on climate. *Rev. Geophys.*, in press,
- Greve, R. (2003):* Inlandeismodelle, Promet (DWD) 29, Nr.1-4, S. 98-104
- Grieser, J., Schönwiese, C.-D. (1999):* Parametrization of spation-temporal patterns of volcanic aerosol induced stratospherical optical depth and its climate radiative forcing. *Atmosphäre*, 12, S. 111 - 133.
- 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 ([http://user.uni-frankfurt.de/~staeger/Inst\\_ber\\_103/node3.html](http://user.uni-frankfurt.de/~staeger/Inst_ber_103/node3.html))
- Grinsted et al. (2009):* Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD. *Clim. Dyn.* doi:10.1007/s00382-008-0507-2. [pdf]
- Güssow K., et al. (2009):* Ocean iron fertilization: Why further research is needed, <http://www.ifw-members.ifw-kiel.de/publications/ocean-iron-fertilization-why-further-research-is-needed/kwp1574>
- Haerberli, W., et al. (2005):* Glacier Mass Bulletin, No.8, World Glacier Monitoring Service, University of Zurich
- Hagen, E. (2003):* Klimavariabilität und Fischbestandsschwankungen, *Traditio et Innovatio*, Forschungsmagazin der Univ. Rostock, Heft 1, S. 12 - 16
- Hansen, J., et al. (2004a):* Soot climate forcing via snow and ice albedos, PNAS, 101 (2), S. 423-428
- Hansen, J., Osterhus, S., et al. (2004b):* Already the day after tomorrow? *Science* 305 (5686), S. 953-954
- Hansen, J. (2004c):* Defusing the Global Warming Time Bomb, *Scientific American* 290, No.3, S. 68-77
- Hansen, J. (2006):* Can we still avoid Dangerous Human-Made Climate-Change? Presentation February, 10, 2006, New School University, New York
- Hansen, J., et al. (2006):* Global temperature change. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103, S.14288-14293
- Hansen, J., et al. (2007):* Climate change and trace gases, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, S. 1925–1954
- Hansen, J., R. Ruedy, Mki. Sato, and K. Lo, (2010):* Global surface temperature change. *Rev. Geophys.*, in press, ([http://data.giss.nasa.gov/gistemp/paper/gistemp2010\\_draft0803.pdf](http://data.giss.nasa.gov/gistemp/paper/gistemp2010_draft0803.pdf))
- Harries, J., et al. (2001):* Increases in greenhouse forcing from the outgoing longwave spectra of the Earth in 1970 and 1997, *Nature* 410, S. 355-357
- Hemmer C.J. (2007):* Globale Erwärmung: Wegbereiter für tropische Infektionskrankheiten in Deutschland? *Dtsch. Med. Wochenschr.*, 132 (48), S. 2583-2589
- Hense, A. et al. (2008):* Auswirkungen der Nordatlantischen Oszillation, *promet (DWD)*, Heft 3/4, S. 89-94

- Hofmann, M., Rahmstorf S. (2009):* On the stability of the Atlantic meridional overturning circulation, [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0909146106](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0909146106), S. 1- 6.
- Holland et al. (2010):* The sea ice mass budget of the Arctic and its future change as simulated by coupled climate models, *Climate Dynamics*, 34 (2)
- Hurrell, J. (1995):* Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation, *Science* 269, S. 676-679
- Hurrell, J., et al. (2003):* An Overview of the North Atlantic Oscillation, in Hurrell, J., Y. Kushnir, G. Ottersen und M. Visbeck (Hrsg.) *The North Atlantic Oscillation. Climatic Significance and Environmental Impact. Geophysical Monographs Series, AGU, Washington DC*, S. 1-36
- Huybrechts, P. et al. (2004):* Modelling Antarctic and Greenland volume changes during the 20th and 21st centuries forced by GCM time slice integrations, *Global and Planetary Change*, 42, S. 83-105
- IAC (2010):* Climate Change Assessments, Review of the Processes & Procedures of the IPCC, (<http://reviewipcc.interacademycouncil.net/report.html>)
- IEA (2005):* Shares and Trends in Greenhouse Gas Emissions <http://data.iea.org/ieastore/Assets/products/CO2/Co2non.pdf>
- IEA (2006):* Key World Energy Statistics, <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/key2006.pdf>
- IEA (2008):* Key World Energy Statistics, [http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/key\\_stats\\_2008.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/key_stats_2008.pdf)
- IEA (2009):* RENEWABLES INFORMATION (2009 Edition), (<http://www.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2009/03711.pdf>)
- Ikeda, M., Wang, J., and Makshatas, A. (2003):* Importance of clouds to the decaying trend and decadal variability in the Arctic ice cover, *J. Meteor. Soc. Japan* 81(1), S. 179-189
- IPCC (2001):* Climate Change 2001: The Scientific Basis, Cambridge University Press UK, S. 944 ff (Third Assessment Report. WG 1)
- IPCC (2001a):* Climate Change 2001: Impacts, Adaption and Vulnerability, Cambridge University Press UK, (Third Assessment Report. WG II)
- IPCC (2001b):* Climate Change 2001 – Mitigation: Contribution of Working Group III to TAR of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC (2001c):* Climate Change 2001: Synthesis Report. Summary for Policy Makers, IPCC (<http://www.ipcc.ch/pub/un/syren/spm.pdf>) in Deutsch: [http://www.dfld.de/cgi-bin/200209\\_IPCC\\_Synthesebericht.pdf](http://www.dfld.de/cgi-bin/200209_IPCC_Synthesebericht.pdf)
- IPCC (2003):* IPCC Press Information on AR4 and emission scenarios ([www.ipcc.ch/press/pr08122003.htm](http://www.ipcc.ch/press/pr08122003.htm))
- IPCC (2005a):* on Carbon Dioxide Capture and Storage ([www.ipcc.ch/pub/reports.htm](http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm))
- IPCC (2005b):* IPCC/TEAP Expert Meeting on Emission Scenarios, Washington D.C., 12-14 January 2005 ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch))
- IPCC (2005c):* Special Report Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons ([www.ipcc.ch/pub/reports.htm](http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm))
- IPCC 2007: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007* Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html)
- IPCC 2007: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg2/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/contents.html)

*IPCC 2007: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg3/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/contents.html)*

*IPCC 2007: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.), IPCC, Geneva, Switzerland. pp 104, [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html)*

*IPCC 2007: Klimaänderungen 2007, Synthesebericht, [http://www.de-ipcc.de/media/IPCC-SynRepComplete\\_final.pdf](http://www.de-ipcc.de/media/IPCC-SynRepComplete_final.pdf)*

*Isaksen, I.S.A. et al. (2009): Atmospheric composition change: Climate–Chemistry interactions, Atmospheric Environment 43, S. 5138–5192, [http://www.iup.uni-bremen.de/doas/paper/ae\\_09\\_isaksen.pdf](http://www.iup.uni-bremen.de/doas/paper/ae_09_isaksen.pdf)*

*Jacobeit (2007): Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Klimasystem, Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke (Klimawandel), Herausgeber: Wilfried Endlicher; Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe, <http://edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel-28044/1/PDF/1.pdf>*

*Jevrejeva, S., Grinsted, A., Moore, J.C. and Holgate, S. (2006): Nonlinear trends and multi-year cycles in sea level records, Journal of Geophysical Research 111, C09012*

*Jin, M. (2004): Analysis of Skin Temperature Variations Using Long Duration AVHRR Observations, Bull. Am. Met. Soc. 85, No. 4. S.587-600*

*Johannessen, O.M. (2004): Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability, Tellus 56 A, No.4, S. 328-341*

*Jonas, M., et al. (2005): Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen – Schwerpunkt Deutschland - , UBA Studie ([www.umweltbundesamt.org/fpdf-k/2946.pdf](http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-k/2946.pdf))*

*Jones, P. D., et al. (1999): Surface air temperature and its changes over the past 150 years, Rev. Geophys. 37, S. 173-199 (update 2005:<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>)*

*Jones, P. D. et al. (2009): High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: a review of current status and future prospects, The Holocene 19,1, S. 3–49*

*Jung T. et al. (2008): Wechselwirkung der NAO mit dem Ozean und Meereis, promet (DWD), Heft 3/4 S. 113-121*

*Juckes, M.N. et al. (2007): Millennial temperature reconstruction intercomparison and Evaluation, Clim. Past, 3, S.591–609, [www.clim-past.net/3/591/2007/](http://www.clim-past.net/3/591/2007/)*

*Juckes, M.N. (2009): Refining error estimates for a millennial temperature reconstruction, Clim. Past Discuss., 5, S. 2631–2668, [www.clim-past-discuss.net/5/2631/2009/](http://www.clim-past-discuss.net/5/2631/2009/)*

*Jungclaus, J. et al. (2008): Die Stabilität der atlantischen Umwälzbewegung, Jahrbuch 2007, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg*

*Kaminski, U., und Cubasch, U. (2003): Globaler Temperaturanstieg: Natürliche Variation oder durch den Menschen verursacht ? GAW Brief DWD Nr.14, ([www.wmo.ch/web/arep/gaw\\_home.html](http://www.wmo.ch/web/arep/gaw_home.html))*

*Kampen, H., und W.A. Maier (2008): Wird die Malaria wieder eine Gefahr für Europa?, in: Lozán, J.L. (Hg.): Warnsignal Klima. Gesundheitsrisiken. Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. Hamburg, Freiburg, Bonn, List/Sylt, S. 169-172*

*Keith, D. (2003): Geoengineering – die technologische Gestaltung des Planeten Erde, in: Das Experiment mit dem Klima Erde, Begleitband und Katalog zur Sonderausstellung des Deutschen Museums vom 7. November 2003 bis 30. November 2003, München, S.138-149*

*Keith, D.W., Ha-Duong M & Stolaroff J (2005): Climate strategy with CO2 capture from the air, Climatic Change, 74, S.17 – 45*

*Kemfert, C. (2004): Die ökonomischen Kosten des Klimawandels, DIW-Wochenbericht 71/42, S. 615-623*

*Kemfert, C., Schill, W.P., (2009): Methan – das unterschätzte Treibhausgas, Wochenbericht des DIW Berlin Nr. 39/2009, [http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.340724.de/09-39-1.pdf](http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.340724.de/09-39-1.pdf)*

- Keppler, F., et al. (2006):* Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions, *Nature* 439, S. 187-191
- Kinne, Stefan; Quaas, Johannes (2008):* Einfluss der Luftverschmutzung auf den Klimawandel – neue Erkenntnisse aus Satellitendaten und Klimamodellen, Tätigkeitsbericht 2007 Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
- Klasen J. (2009):* Neue Krankheitserreger und ihre Überträger: Klimawandel könnte Gesundheitsgefahren in Deutschland zur Folge haben, UMID-Themenheft Klimawandel und Gesundheit, Ausgabe 3
- Knutti R. (2008):* Should we believe model predictions of future climate change?, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 366, S. 4647–4664
- Koch, D., T.C. Bond, D. Streets, N. Unger, and G. van der Werf, (2007):* Global impacts of aerosols from particular source regions and sectors. *J. Geophys. Res.*112,
- Köhler et al. (2010):* What caused Earth's temperature variations during the last 800,000 years? Data-based evidence on radiative forcing and constraints on climate sensitivity, *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29, S.129-145
- Koppe C. (2009):* Das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes, UMID-Themenheft Klimawandel und Gesundheit, Ausgabe 3
- Kristjánsson, J. E., et al. (2008),* Cosmic rays, cloud condensation nuclei and clouds, A reassessment using MODIS data, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, S. 7373–7387
- Kvalevåg M. M., Myhre G., (2007) :* Human impact on direct and diffuse solar radiation during the industrial era. *Journal of Climate*, 20(19), S. 4874-4883.
- Labitzke, K. G., and van Loon, H. (1999):* The stratosphere. Phenomena, History, and Relevance. Springer, Berlin
- Labitzke, K. G. (2003):* The global signal of the 11-year sunspot cycle in the atmosphere: When do we need the QBO? *Met. Zeitschrift* 12, No. 4, S. 209-216
- Labitzke K. et al., (2006):* Sunspots, the QBO and the stratosphere in the North Polar Region – 20 years later, *Meteorolog. Z.* 15, No.3, S. 355-363
- Latif, M. (2003):* Simulation und Vorhersage von ENSO-Extremen, *Promet (DWD)* 29, Nr.1-4, S. 72-79
- Latif, M. (2006):* Is the Thermohaline Circulation Changing? *J. Climate* 19, No. 18, S. 4631-4637
- Latif, M., N. Keenlyside, and J. Bader (2007):* Tropical sea surface temperature, vertical wind shear, and hurricane development, *Geophys. Res. Lett.*, 34,
- Latif, M. (2008):* El Nino/Southern Oscillation response to global warming, [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0710860105](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0710860105) PNAS
- Laken, B., A. Wolfendale, and D. Kniveton (2009):* Cosmic ray decreases and changes in the liquid water cloud fraction over the oceans, *Geophys. Res. Lett.*, 36,
- Landsea, C. et al. (2007):* Counting Atlantic Tropical Cyclones Back to 1900, *Eos*, Vol. 88, No. 18,
- Landsea, C. et al.. (2010):* Impact of Duration Thresholds on Atlantic Tropical Cyclone Counts, *Journal of Climate*
- Langematz U. et al. (2008):* Stratosphäre, Vulkanismus und die NAO/AO, *promet (DWD)*, Heft 3/4, S. 122-129
- Lazo, L. et al. (2010):* Nucleocapsid-like particles of dengue-2 virus enhance the immune response against a recombinant protein of dengue-4 virus. *Archives of Virology*
- Lawson et al. (2005):* The Economics of Climate Change, House of Lords, 2nd Report of Session 2005/06 ([http://www.parliament.uk/parliamentary\\_committees/lords\\_economic\\_affairs.cfm](http://www.parliament.uk/parliamentary_committees/lords_economic_affairs.cfm))
- Lean, J., Rind, D. (1998):* Climate Forcing by Changing Solar Radiation, *J. Climate* 11, S. 3069-3094
- Leckebusch, G.C. et al (2008):* Mid-latitude Cyclones and Storms in an Ensemble of European AOGCMs under ACC, CLIVAR Exchanges, Volume 13, No.3, S. 3-5

- Lelieveld, J. (2004):* Veränderte troposphärische Chemie, *Promet (DWD) 30, Nr. 3, S. 116-121*
- Lemke, P. (2003):* Was unser Klima bestimmt: Einsichten in das System Klima. In: *Das Experiment mit dem Klima Erde, Begleitband und Katalog zur Sonderausstellung des Deutschen Museums vom 7. November 2003 bis 30. November 2003, München, S.138-149*
- Lee, T., and M. J. McPhaden (2010):* Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, 37,
- Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S. and Schellnhuber, H. J. (2008):* Tipping elements in the Earth's climate system. *PNAS*, Vol. 105, No. 6, S. 1786-1793 (<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/kipp-punkte.pdf>).
- Le Quéré C. et al. (2009):* Trends in the sources and sinks of carbon dioxide, [www.nature.com/naturegeoscience](http://www.nature.com/naturegeoscience)
- Levitus S. et al., (2005):* Warming of the world ocean, 1995-2003, *Geophys. Res. Lett.* 32, L02604
- Levermann, A, et al. (2009):* Basic mechanism for abrupt monsoon transitions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 10.1073/PNAS
- Levitus, S., J. I. et al. (2009):* Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07608
- Liess, S., und Dümenil-Gates, L. (2004):* Wirkung von Landnutzungsänderungen, *Promet (DWD) 30, Nr. 3, S. 134-140*
- Lin, Jia-Lin, (2007):* The Double-ITCZ Problem in IPCC AR4 Coupled GCMs: Ocean–Atmosphere Feedback Analysis, *J. Climate*, 20, S. 4497–4525.
- Livingstone, W. et al. (2009):* Are Sunspots Different During This Solar Minimum? *Eos*, Vol. 90, No. 30, S. 254 - 264
- Lohmann, G. et al. (2008):* Estimating trends of Atlantic meridional overturning circulation from long-term hydrographic data and model simulations, *Ocean Dynamics* (2008) 58, S. 127–138
- Loster, T. (2007):* Naturkatastrophen: Auswirkungen und Folgen für die Ökonomie, MüRü [http://www.aktion-deutschland-hilft.de/library/data/redner\\_02\\_loster.pdf](http://www.aktion-deutschland-hilft.de/library/data/redner_02_loster.pdf)
- Lozier, S.M. (2010):* Deconstructing the Conveyor Belt, *Science* 18 June 2010, Vol. 328. No. 5985, S. 1507 - 1511
- Lublinski, J. (2010):* Eisbeutel für die Erde, *Bild der Wissenschaft*, 09/2010, S.38 - 43
- Lyman, J.M., et al. (2010):* Robust warming of the global upper ocean, *Nature*, Vol. 465, S.:334–337
- Mann, M. E., Bradley, R. S., and Hughes, M. K. (1998):* Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing Over the Past Six Centuries, *Nature* 392, S. 779-787
- Mann, M. E. et al. (1999):* Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millenium: Inferences, Uncertainties, and Limitations, *Geophys. Res. Lett.* 26, No. 6, S. 759-762
- Mann, M. E. (2002):* The Value of Multiple Proxies, *Science* 297, S. 1481-1482
- Mann, M. E., and Hughes, M. L. (2002):* Tree-Ring Chronologies and Climate Variability, *Science* 296, S. 848
- Mann, M. E., and Jones, P. D. (2003):* Global surface temperature over the past two millenia, *Geophys. Res. Lett.* 30, No. 15, S. 1820
- Mann, M. E., et al. (2003):* On past temperatures and anomalous late-20th century warmth, *Eos* 84, S. 473-476
- Mann, M. E. (2004):* On smoothing potentially non-stationary climate time series, *Geophys. Res. Lett.* 31, L07214
- Mann, M. E., et al. (2005):* Testing the Fidelity of Methods Used in Proxy-based Reconstructions of Past Climate, *Journal of Climate* 18, S. 4097-4107
- Mann, M. E., et al. (2007):* Evidence for a modest undercount bias in early historical Atlantic tropical cyclone counts, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 34,

- Mann, M. E., et al. (2009): Atlantic hurricanes and climate over the past 1,500 years, *Nature*, Vol. 460
- Mann, M.E. et al. (2008): [Proxy-Based Reconstructions of Hemispheric and Global Surface Temperature Variations over the Past Two Millennia](#), *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 105, 13252-13257, 2008
- Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K. (2009), Reply to McIntyre and McKittrick: Proxy-based temperature reconstructions are robust, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 106, E11.
- Markus, T., J. C. Stroeve, and J. Miller (2009): Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length, *J. Geophys. Res.*, 114,
- Marland, G. T., et al. (2005): Global, Regional, and National CO<sub>2</sub> Emissions. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Marland, G.T.,(2008): <http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/glo.htm>
- Marsh, N., and Svensmark, H. (2000): Low cloud properties influenced by cosmic rays, *Phys. Rev. Lett.* 85, 5004
- Marsh, N., and Svensmark, H. (2003): Galactic cosmic ray and El Niño-Southern Oscillation trends in International Satellite Cloud Climatology Project D2 low-cloud Properties, *J. Geophys. Res.* 108(D6), 4195
- Marsh, N., and Svensmark, H. (2004): Comment on “Solar influences on cosmic rays and cloud formation: A reassessment” by R. Sun and R.S. Bradley, *J. of Geophys. Res.* 109, D14205
- Matulla, C., et al. (2003): Empirisches Downscaling – Überblick und zwei Beispiele, *Klimastatusbericht DWD 2002*, S. 20-31
- Matulla, C., et al. (2007): European Storminess: Late 19th Century to Present, *Climate Dynamics* 31, S. 1125-130
- Mayewski, P.A. et al. (2004): Holocene climate variability, *Quaternary Research* 6, S. 243–255
- Mazzocchi, M.G., et al. (2009). [A non-diatom plankton bloom controlled by copepod grazing and amphipod predation: Preliminary results from the LOHAFEX iron-fertilisation experiment](#), *GLOBEC International Newsletter*, 15(2)October, 3-6., <http://web.pml.ac.uk/globec/products/newsletter/news15.2.pdf> .
- McIntyre, M., and McKittrick, R. (1998): Corrections to the Mann et al.: proxy data base and northern hemispheric average temperature series, *Energy Environ.* 14, No. 6, S. 751-771
- McIntyre, M., and McKittrick, R. (2005): Hockey stick, principal components, and spurious significance, *Geophys. Res. Lett.* 32, L03710
- McIntyre, M., and McKittrick, R. (2005): Reply to comment by Huybers on “Hockey sticks, principal components, and spurious significance”, *Geophys. Res. Lett.* 32, L20713
- McIntyre S, McKittrick R (2009): Proxy inconsistency and other problems in millennial paleoclimate reconstructions. *Proc Natl Acad Sci USA* 106:E10.
- MC KINSEY (2007): Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland, Berlin, <http://www.wirtschaft-fuer-klimaschutz.de/de/78.asp>
- MC KINSEY (2009): Aktualisierte Energieszenarien und -sensitivitäten, März 2009, <http://www.wirtschaft-fuer-klimaschutz.de/de/78.asp>
- McKittrick, R. R., and P. J. Michaels (2007): Quantifying the influence of anthropogenic surface processes and inhomogeneities on gridded global climate data, *J. Geophys. Res.*, 112,
- Mac Cracken, M.C. (2009): On the possible use of geoengineering to moderate specific climate change impacts, *Environ. Res. Lett.* 4, 045107 (14pp)
- Mears, C. A., Schabel, M. C., and Wentz, F. J. (2003): A reanalysis of the MSU channel 2 tropospheric temperature record, *Journal of Climate* 16, S. 3560-3664
- Mears, C. A., and Wentz, F. J. (2005): The effect of diurnal correction on satellite-derived lower tropospheric temperature, *Science* 309, S. 1548 -1551

- Mears, C. A. and F. J. Wentz (2009):* Construction of the Remote Sensing Systems V3.2 Atmospheric Temperature Records from the MSU and AMSU Microwave Sounders, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, published online, Vol. 26:8, S.1493-1509
- Meehl, G. A., et al. (2005):* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project, *AMS, BAMS*, Jan 2005, S. 89-93
- Meehl, G.A., J.M. Arblaster, K. Matthes, F. Sassi and H. van Loon, (2009):* Amplifying the Pacific Climate System Response to a Small 11-Year Solar Cycle Forcing, *Science*, 325, 1114,
- Meinke, I. Et al. (2010):* Regionaler Klimaatlas Deutschland der Helmholtz-Gemeinschaft informiert im Internet über möglichen künftigen Klimawandel, *DMG Mitteilungen*, 2/2010
- Meinshausen, M. (2005):* On the Risk of Overshooting 2° C, Symposium "Avoiding Dangerous Climate Change", MetOffice, Exeter, 1-3 February 2005
- Meinshausen, M. et al. (2009):* Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 C. *Nature* (458), S. 1158-1162
- Merrifield M.A. (2009):* An Anomalous Recent Acceleration of Global Sea Level Rise, *Journal of Climate*, Vol. 22, No. 21, S. 5772-5781
- Min, S-K., Hense A. (2006):* Nachweis und Zuordnung von Klimaänderungssignalen im 20. Jahrhundert unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten, *Klimastatusbericht 2005 (DWD)*, S. 18-32
- Moeller, T. (2010):* No cause for concern? Climate Change impacts on European Oilseed and Cereal markets in 2050, Paper at the IATRC Public Trade Policy Research and Analysis Symposium, [https://iatrc2010.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/iatrc2010/Papers/Moeller\\_et\\_al.\\_IATRC\\_Summer\\_2010.pdf](https://iatrc2010.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/iatrc2010/Papers/Moeller_et_al._IATRC_Summer_2010.pdf)
- Monks, P.S. et al. (2009):* Atmospheric composition change – global and regional air quality, *Atmospheric Environment* 43, S. 5268–5350
- MPA (2009):* Pressemitteilung, [http://www.mpa.uni-stuttgart.de/aktuelles/Pressemitteilung\\_verbundforschungsprojekt.pdf](http://www.mpa.uni-stuttgart.de/aktuelles/Pressemitteilung_verbundforschungsprojekt.pdf)
- MPI-M (2006):*, Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert, Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg (<http://www.mpimet.mpg.de/de/web/institute/Klimaprojektionen2006.pdf>)
- Mudelsee, M., et al. (2003):* No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe, *Nature* 421, S. 166-169
- Müller, M., Bistry T. (2008):* Überschwemmungen in Mitteleuropa: Ursachen, Auswirkungen und Perspektiven, *promet (DWD)*, Jahrg. 34, Nr. 1/2, S. 21 - 34
- Münchner Rück (Munich Re Group), (2000,...,2010):* Topics, Jahresrückblicke Naturkatastrophen (jährlich erscheinende Broschüre), Eigenverlag, München, <https://www.munichre.com/>
- Munich Re Group (2005):* Schadenspiegel, *Spezial Wind und Wasser*, 3/2005
- Munich Re Group, Präsentation Höppe (2006):* ([http://www.jahreskonferenz.de/beitraege\\_vortraege/beitraege\\_2006/07\\_%20H\\_%F6ppe\\_%20pr\\_%E4sentation.pdf](http://www.jahreskonferenz.de/beitraege_vortraege/beitraege_2006/07_%20H_%F6ppe_%20pr_%E4sentation.pdf))
- Muscheler, R., et al. (2005):* How unusual is today's solar activity? *Nature* 436, E3-E4
- Muscheler, R., et al. (2005):* How unusual is today's solar activity? *Nature*, 436, E3-E4 and Solanki, et al. Reply, *Nature*, 436, E4 (2005)
- Myhre, G. et al (2010):* Addendum to 'A fast method for updating global fossil fuel carbon dioxide emissions,' *Environ. Res. Lett.* 5
- Naik, V., et al. (2005):* Net radiative forcing due to changes in regional emissions of tropospheric ozone precursors, *Geophys. Res. Lett.* 110, D24306
- NKGCF-DKK (2010):* Offener Brief des Nationalen Komitees für Global Change Forschung und des Deutschen Klima-Konsortiums hinsichtlich der Kritik an den IPCC Sachstandsberichten, ([http://openletter.nkgcf.org/Offener+Brief\\_IPCC\\_100531\\_1.pdf](http://openletter.nkgcf.org/Offener+Brief_IPCC_100531_1.pdf))

- Nisbert, E. et al. (2008)*: Emissions of methane from plants. In: Proceedings of the Royal Society B 10.1098
- NIR (2006)*: Nationaler Inventarbericht 2006, Umweltbundesamt: Deutsches Treibhausgasinventar 1990-2004
- NIR (2010)*: Nationaler Inventarbericht 2008, Umweltbundesamt: Deutsches Treibhausgasinventar 1990-2008
- Nordhaus, W.D. (2007)*: Critical Assumptions in the Stern Review on Climate Change. Science, 317: S. 201–202
- NRC (2006)*: Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years, National Academies of Sciences, [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=11676#toc](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=11676#toc)
- Oman, L. (2005)*: Climatic response to high-latitude volcanic eruptions, J. Geophys. Res. 110, D13103
- Otte, U. (2000)*: Häufigkeit von Sturmböen in den letzten Jahren. Klimastatusbericht 1999, DWD, S. 7-15
- Overholt, A.C. et al. (2009)*: Testing the Link between terrestrial Climate Change and Galactic Spiral Arm Transit. ApJ, 705, S. 101- 103
- Overpeck, J., et al. (2005)*: Arctic Systems On Trajectory To New Seasonally Ice-Free State, EOS, Trans AGU 86, S. 309-313
- Overpeck, J. T., et al. (2006)*: Paleoclimatic Evidence for Future Ice-Sheet Instability and Rapid Sea-Level Rise, Science 311, No. 5768, S. 1747-1750
- Pachauri, R.K. (2007)*: Climate Change 2007, The Physical Science Basis [http://www.ipcc.ch/present%5CWMEF\\_FINAL.ppt](http://www.ipcc.ch/present%5CWMEF_FINAL.ppt)
- Paeth, H. (2007)*: Das Monsunklima in Asien, promet (DWD), Jahrg. 32, Nr. 3/4, S. 98-113
- Parker, D. E. (2004)*: Climate: Large-scale warming is not urban, Nature 432, S. 290-291
- Parker, D. E. (2006)*: A Demonstration that Large-Scale Warming Is Not Urban, J. Climate 19, No. 12, S. 2882-2895
- Parry, M. (2005)*: Climate change, global food supply and risk of hunger, Phil. Trans. R. Soc., B 360, 2125-2138
- Parry M. et al. (2009)*: Assessing the Costs of Adaptation to Climate Change: A Review of the UNFCCC and Other Recent Estimates, International Institute for Environment and Development and Grantham Institute for Climate Change, London.
- Patz, J. A., et al. (2005)*: Impact of regional climate change on human health, Nature 438, S. 310-317
- PBL 2010*: Assessing an IPCC assessment, An analysis of statements on projected regional impacts in the 2007 report, Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), ([http://www.pbl.nl/images/500216002\\_tcm61-48119.pdf](http://www.pbl.nl/images/500216002_tcm61-48119.pdf))
- Pfeifer, S., Jacob, D. (2005)*: Changes of the Arctic Climate under SRES B2 scenario conditions, Meteorologische Zeitschrift 14, No. 16, S. 711-719
- Philipona, R., et al. (2004)*: Radiative forcing - measured at Earth's surface - corroborates the increasing greenhouse effect, Geophys. Res. Lett. 31
- Philipona R. et al. (2005)*: Anthropogenic greenhouse forcing and strong water vapor feedback increase temperature in Europe, Geophys. Res. Lett. 32, (L19808),
- Philipona, R.,K. Behrens, and C. Ruckstuhl (2009)*: How declining aerosols and rising greenhouse gases forced rapid warming in Europe since the 1980s, Geophys. Res. Lett., 36,
- Pielke Jr., R. A., et al. (2005)*: Hurricanes and Global Warming, Bul. of the Am. Met. Society 86, S. 1571-1575
- Pielke Sr., R. A. (2005)*: Land Use and Climate Change, Science 310, S. 1625-1626
- Pielke Jr., R. A. (2005)*: Are there trends in hurricane destruction? Nature 438, E11
- Pinker, R. T., et al. (2005)*: Do satellite detect trends in surface solar radiation? Science 308, S. 850 – 854

- Platz-Dülmer, C. (2005):* Trends von atmosphärischen Kohlenwasserstoffen (VOC) und ihre Klimarelevanz, GAW Brief Nr.27, März 2005  
([http://www.dwd.de/de/FundE/Observator/MOHP/hp2/gaw/gaw\\_briefe/gaw\\_brief\\_027.pdf](http://www.dwd.de/de/FundE/Observator/MOHP/hp2/gaw/gaw_briefe/gaw_brief_027.pdf) )
- Platz-Dülmer, C. et al. (2009):* Entwicklung klimarelevanter Spurengase, DWD 2009, Klimastatusbericht 2009
- Plumb, R. A., and Semeniuk, K. (2003):* Downwards migration of extratropical zonal winds anomalies, *J. Geophys. Res.* 108, D7, S. 4223
- Pongratz, J., C. Reick, T. Raddatz, and M. Claussen (2008),* A reconstruction of global agricultural areas and land cover for the last millennium, *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB3018, doi:10.1029/2007GB003153.
- Pongratz, J., C. H. Reick, T. Raddatz, and M. Claussen (2009):* Effects of anthropogenic land cover change on the carbon cycle of the last millennium. *Global Biogeochem. Cycles*
- Pritchard H. D. et al., (2009),* Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets, *Nature*, 461, S. 971-975
- Quaas, J., Boucher, O., Lohmann, U. (2006):* Constraining the total aerosol indirect effect in the LMDZ and ECHAM4 GCMs using MODIS satellite data, *Atmos. Chem. Phys.* 6, S.947-955
- Quaas, J., O. Boucher, N. Bellouin, and S. Kinne (2008):* Satellite-based estimate of the direct and indirect aerosol climate forcing, *J. Geophys. Res.*, 113
- Quaas, J., (2010):* "Wolkenstudien auf globaler Skala: Klimamodelle und Satelliten", DMG Mitteilungen 1/2010,  
[http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/publikationen/pdf/dmg-mitteilungen/2010\\_1.pdf](http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/publikationen/pdf/dmg-mitteilungen/2010_1.pdf)
- Rahmstorf, S., (2002):* Ocean circulation and climate during the past 120,000 years, *Nature*, 419, S. 207–214,
- Rahmstorf, S. (2003):* Timing of abrupt climate change, *Geophysical Research Letters* 30, S. 1510
- Rahmstorf, S., et al. (2004):* Cosmic rays, Carbon Dioxide, and Climate, *EOS* 85, No. 4, S. 38-41
- Rahmstorf, S., et al. (2004):* Reply, *EOS* 85, No. 48, S. 511-512
- Rahmstorf, S., Schellnhuber H.J. (2006):* Der Klimawandel, Beck Verlag
- Rahmstorf, S., (2006):* Testing Climate Reconstructions, and Response von Storch et al., *Science* 312, S.1872-1873
- Rahmstorf, S., (2006):* A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise, *Science (express)* 10.1126/science.1135456, 14 Dec. 2006.
- Rahmstorf, S., et al. (2007):* Recent Climate Observations Compared to Projections, *ScienceExpress* 1 February 2007: 1136843v1DOI: 10.1126/science.1136843
- Rahmstorf, S., (2010):* A new view on sea level rise, *Nature reports climate change*, VOL 4
- Ramanathan, V., et al. (2001):* Indian Ocean Experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze, *J. Geophys. Res.* 106, No D22, S.28371-28398
- Ramanathan, V., et al. (2005):* Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle, *PNAS* 102, S. 5326-5333  
([www.pnas.org/cgi/dol/10.1073/pnas.0500656102](http://www.pnas.org/cgi/dol/10.1073/pnas.0500656102))
- Ramanathan V. et al. (2007),* Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption, *Nature* 448, 575.
- Ramanathan V. et al. (2008):* Atmospheric Brown Clouds: Regional Assessment Report with Focus on Asia. Published by the United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- Ramanathan V. et al. (2008),* Why is Earth's albedo 29% and was it always 29%? [http://www.ramanathan.ucsd.edu/publications/Ram\\_ILEAPSnewsletter-apr08.pdf](http://www.ramanathan.ucsd.edu/publications/Ram_ILEAPSnewsletter-apr08.pdf)
- Ramanathan, V. and G. Carmichael (2008):* [Global and regional climate changes due to black carbon.](#) *Nature Geoscience*, 1, S. 221-227
- Raschke, E., Quante, M. (2002):* Wolken und Klima, *Promet (DWD)* 28, Nr.3/4, S. 95-107

- Rayner, N.A. et al. (2006):* Improved analysis of changes and uncertainties in sea surface temperature data measured in situ since the mid-nineteenth century: The HadSST2 dataset. *J. Climate*, 19, S. 446–469.
- Redler, R. et al. (2009):* OASIS4 – a coupling software for next generation earth system modelling, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 2, S. 797–843, [www.geosci-model-dev-discuss.net/2/797/2009/](http://www.geosci-model-dev-discuss.net/2/797/2009/)
- Reichert, B., et al. (2002):* Global ocean warming tied to anthropogenic forcing, *Geophys. Res. Lett.* 29, No. 11, S. 20-1 – 20-4
- Reichert, B., et al. (2004):* Recent glacier retreat exceeds internal variability, *J. Climate* 15(21), S. 3069-3081
- Reichler, T., and J. Kim, (2008):* How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 303, S. 303 - 311
- Reiter, P. (2008):* Global warming and malaria: knowing the horse before hitching the cart, *Malaria Journal* 2008, 7(Suppl 1): S3, <http://www.malariajournal.com/content/7/S1/S3>
- REN21 (2010):* "Renewables 2010 Global Status Report", [http://www.ren21.net/globalstatusreport/REN21\\_GSR\\_2010\\_full.pdf](http://www.ren21.net/globalstatusreport/REN21_GSR_2010_full.pdf)
- Richter-Menge, J., and J.E. Overland, Eds., (2009):* Arctic Report Card 2009, <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard>.
- Ries, L. (2006):* Results from GAW Global Station Zugspitze/Hohenpeissenberg at Platform Zugspitze, The German Contribution to the GAW Programme: Upon the 225th Anniversary of GAW, Hohenpeissenberg Observatory - (WMO TD No. 1336)
- Rigby, M., et al. (2008):* Renewed growth of atmospheric methane, *Geophys. Res. Lett.*, 35
- Rignot, E., and Kanagaratnam, P. (2006):* Changes in the Velocity Structure of the Greenland Ice Sheet, *Science* 311, No. 5763, S. 986-990
- Rind, D., J. Perlwitz, and P. Lonergan (2005):* AO/NAO response to climate change: 1. Respective influences of stratospheric and tropospheric climate changes. *J. Geophys. Res.* 110,
- Ritter, C., et al., (2005):* Direct thermal radiative forcing of tropospheric aerosol in the Arctic measured by ground based infrared spectrometry, *Geophys. Res. Lett.* 32, L23816
- Rosenhagen, G. (2008):* Meteorologischer Hintergrund II, Zur Entwicklung der Sturmaktivität in Mittel- und Westeuropa, *promet*, Jahrg. 34, Nr. 1/2, S. 60 - 62
- Rybski, D., et al. (2006):* Long-term persistence in climate and the detection problem, *Geophys. Res. Lett.* 33, L06718, S. 1-4
- Robock, A. (2000):* Volcanic eruptions and climate, *Reviews of Geophysics* 38, S. 191-219
- Robock, A. (2002):* Pinatubo eruption: The climatic aftermath, *Science* 295, S. 1242-1244
- Robock, A. et al. (2009):* Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering *Geophys. Res. Lett.*, 36 L19703
- Robock, A. et al. (2010):* A Test for Geoengineering?, *Science*, VOL 327, S. 530 - 531
- Roeckner, E. (2004):* Wirkung erhöhter Treibhausgasemissionen, *Promet (DWD)* 30, Nr. 3, S. 99-105
- Rotenberg, E., Yakir, D. (2010):* Contribution of Semi-Arid Forests to the Climate System. *Science* 327, S. 451-454,
- Ruckstuhl, C., et al. (2008):* Aerosol and cloud effects on solar brightening and the recent rapid warming. *Geophysical Research Letters* 35
- Ruckstuhl, C., and J. R. Norris (2009),* How do aerosol histories affect solar "dimming" and "brightening" over Europe? IPCC-AR4 models versus observations, *J. Geophys. Res.*, 114
- Rummukainen, M. (2009),* New Climate Science 2006–2009 A brief review of research into the physical science basis of the climate change issue since IPCC AR4/WG I of 2007 (Markku Rummukainen, Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) Erland Källén, Stockholm University, May 2009, <http://www.sweden.gov.se/content/1/c6/12/73/90/f3ffebe1.pdf>

- RWE (2006):* Weltenergiereport  
(<http://www.rwe.com/generator.aspx/property=Data/id=266750/weltenergiereport-2005.pdf>)
- RWE (2006):* power: perspektiven 2005 ([www.rwe.com](http://www.rwe.com) )
- Sabine, C.L., R.A. Feely, et al. (2004):* The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>, *Science* 305, S. 367–371
- Santer, B. D., et al. (2005):* Amplification of surface temperature trends and variability in the tropical tropopause, *Science* 309, S. 1551-1555
- Santer, B. D., et al. (2007):* Identification of human-induced changes in atmospheric moisture content, *PNAS*, Vol. 104, No. 39, S. 15248–15253
- Santer, B. D., et al. (2008):* Consistency of modelled and observed temperature trends in the tropical troposphere, *Int. J. Climatol.*, ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com))
- Sausen, R., et al. (2003):* Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit, *Klimastatusbericht 2002*, DWD, S. 190 – 192
- Scafetta, N., and West, B. J. (2008):* Estimated solar contribution to the global surface warming using the ACRIM TSI satellite component, *GPR* 32, L18713
- SCAR (2009):* Antarctic climate Change and the Environment,  
[http://www.scar.org/publications/occasionals/ACCE\\_25\\_Nov\\_2009.pdf](http://www.scar.org/publications/occasionals/ACCE_25_Nov_2009.pdf)
- Schär, C., et al. (2004):* The role of increasing temperature variability in European summer heat waves, *Nature* 427, S. 332-336
- Schellnhuber, H. J. (2005):* The Climate Problems: Diagnosis, Prognosis, Therapy, Vortrag DPG 2005 ([http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE\\_Archiv/DPG2005-AKE\\_Berlin/Vortraege/DPG2005\\_SyKE1.1Schellnhuber\\_CC\\_Diagnosis-Prognosis-Therapy.pdf](http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2005-AKE_Berlin/Vortraege/DPG2005_SyKE1.1Schellnhuber_CC_Diagnosis-Prognosis-Therapy.pdf))
- Schellnhuber, H. J. (2009):* Tipping elements in the Earth System, *PNAS*, Vol. 106, No. 49, S. 20561–20563
- Schmidt, G. A., (2009):* Spurious correlations between recent warming and indices of local economic activity, *Int. J. Climatol.* 29, S. 2041–2048
- Schmidt, G. A., R. A. Ruedy, R. L. Miller, and A. A. Lacis (2010):* Attribution of the present- day total greenhouse effect, *J. Geophys. Res.*, 115,  
([http://pubs.giss.nasa.gov/docs/2010/2010\\_Schmidt\\_etal\\_1.pdf](http://pubs.giss.nasa.gov/docs/2010/2010_Schmidt_etal_1.pdf))
- Schmidhuber, J. et al. (2007):* Global food security under climate change, *PNAS*, Vol. 104, No. 50, S. 19703–19708
- Schneider, R., Lohmann G. (2004):* Das Klima der letzten 11.000 Jahre, *DWD Klimastatusbericht 2003*, <http://epic.awi.de/Publications/Sch2004aj.pdf>
- Schönwiese, C. D. (2003):* Zum Aktuellen Stand der Klimaproblematik: Nachweis des Klimafaktors Mensch in den Beobachtungen und Modellabschätzungen (Uni Frankfurt)
- Schönwiese, C. D. (2003):* Jahreszeitliche Struktur beobachteter Temperatur- und Niederschlagstrends in Deutschland, in: Chmielowski F.-M., Foken, Th. (Hrsg.): Beiträge zur Klima- und Meeresforschung, Berlin und Bayreuth, S. 59-68
- Schönwiese, C. D., et al. (2004):* Statistisch-klimatologische Analyse des Hitzesommers 2003 in Deutschland, *Klimastatusbericht 2003*, DWD, S. 123-132 ([www.ksb.dwd.de](http://www.ksb.dwd.de))
- Schönwiese, C. D., et al. (2004):* The hot summer 2004 in Germany. Some preliminary results of a statistical time series analyses, *Meteorol. Z.* 13, Nr.4, S. 323-327
- Schönwiese, C. D. (2006):* Globaler und regionaler Klimawandel, Beobachtungsindizien, Ursachen, Modelle und Zukunftsperspektiven (Vortrag ppt, Sw-fh-frankfurt-2006)
- Schönwiese, C.-D. Janoschitz, R., (2008):* [Klima-Trendatlas Europa 1901-2000](#). Bericht Nr. 7, Inst. Atmosph. Umwelt, Univ. Frankfurt/Main, 82. S..
- Schönwiese, C. D., et al. (2008):* Klima-Trendatlas Deutschland 1901 – 2000, Bericht des Instituts für Atmosphäre und Umwelt der Univ. Frankfurt/Main, Nr. 4, 2. Aktual. Auflage 2008, [http://www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima/PDF\\_Dateien/Inst\\_Ber\\_4\\_21.pdf](http://www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima/PDF_Dateien/Inst_Ber_4_21.pdf)
- Schönwiese, C. D. (2008):* Meteorologischer Hintergrund III Extremereignisse aus meteorologisch-statistischer Sicht *promet*, Jahrg. 34, Nr. 1/2, 2008, S. 61 - 65

- Schröter, D., et al. (2005):* Ecosystems Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe, *Science* 310, S. 1333-1337
- Schuur, E.A.G. et al. (2009):* The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra, *Nature*, 459, S. 556-559
- Schwarz, W. (2010):* Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2008  
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3999.pdf>
- Screen, J.A., Simmonds I. (2010) :* The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification, *Nature*, Vol. 464, S. 1334 - 1337
- Shaviv, N. (2002):* Cosmic ray diffusion from the galactic spiral arms, iron meteorites, and a possible climate connection? *Phys. Rev. Lett.* 89, 051102
- Shaviv, N., Veizer, J. (2003):* Celestial driver phanerozoic climate? *GSA Today* 13, No. 7, S. 4-10
- Shepherd A., Wingham D. (2007):* Recent Sea-Level Contributions of the Antarctic and Greenland Ice Sheets, *Science*, Vol. 315. no. 5818, S. 1529 - 1532
- Sherwood, S. C., C. L. Meyer, R. J. Allen, and H. A. Titchner, (2008):* Robust tropospheric warming revealed by iteratively homogenised radiosonde data, *J. Climate.*, 21
- Shindell, D. T., Schmidt, G. A. (2004):* Southern Hemisphere Climate Response to Ozone Changes and Greenhouse gas increases, *Geophys. Res. Lett.* 31, L18209
- Shindell, D. T., et al. (2009):* Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. *Nature Geoscience*, 2 (4)
- Siegenthaler, U., et al. (2005):* Stable Carbon Cycle Climate Relationship during the Late Pleistocene, *Science* 310, No. 5752, S. 1313-1317
- Slingo, J. Et al. (2009):* Developing the next-generation climate system models: challenges and achievements, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 367, S. 815–831,  
<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/367/1890/815.full.pdf+html>
- Smith, T.M. et al. (2008):* Improvements to NOAA's Historical Merged Land–Ocean Surface Temperature Analysis (1880–2006), *Journal of Climate*, Vol. 21, S. 2283 - 2296
- Soden, B.J., Held I.M. (2006):* An Assessment of Climate Feedbacks in Coupled Ocean-Atmosphere Models, *J. Climate* 19, No. 14, S. 3354-3360
- Solanki, S. K., Schussler, M., and Fligge, M. (2002):* Secular variation of the Sun's magnetic flux. *Astron. Astrophys.* 383, S. 706–712
- Solanki, S. K., Krivova, N. A. (2003):* Can solar variability explain global warming since 1970? *JGR* 108, No. A5,
- Solanki, S. K. et al. (2003):* Sonne spielt nur eine untergeordnete Rolle. *Chemische Rundschau*, Juli 2003, S. 29-30
- Solanki, S. K., et al. (2004):* Unusual activity of the sun during recent decades compared to the previous 11,000 years, *Nature* 431, S. 1084-1087
- Solanki, S. K., et al. (2005):* Reply to Muscheler, *Nature*, 436, E4
- Sole, A. et al. (2008):* Testing hypotheses of the cause of peripheral thinning of the Greenland Ice Sheet: Is land-terminating ice thinning at anomalously high rates? *The Cryosphere*, 2, S. 205–218, ([www.the-cryosphere.net/2/205/2008/](http://www.the-cryosphere.net/2/205/2008/))
- Solomon, S. (2005):* US Climate Change Science Program (CCSP), Workshop: Climate Science in Support of Decision Making, Nov 14-16, 2005
- SRCCS (2005):* siehe: IPCC Special Report Carbon Dioxide Capture and Storage
- Steinmetz, O. (2009)* Vortrag von Oliver Steinmetz, Desertec Foundation, [http://www.eine-welt-netz-nrw.de/seiten/fileadmin/ewn/seiten/Archiv/Landeskonferenz\\_2009/beitrag\\_steinmetz.pdf](http://www.eine-welt-netz-nrw.de/seiten/fileadmin/ewn/seiten/Archiv/Landeskonferenz_2009/beitrag_steinmetz.pdf)
- Steinbrecht, W. Et al. (2006):* Hat die Erholung der Ozonschicht begonnen? Vortrag Klimatagung DKT, [http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/dkt/abstracts/atmosphaerenchemie/steinbrecht\\_v.pdf](http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/dkt/abstracts/atmosphaerenchemie/steinbrecht_v.pdf)
- Stern, N. (2006):* Stern Review on the economics of Climate Change, London, UK: Her Majesty's Treasury, [http://www.la21bb.de/service/stern\\_review.pdf](http://www.la21bb.de/service/stern_review.pdf)

- Stocker, T. (2007):* Polare Eisbohrkerne – Eckpfeiler der Klimarekonstruktion, Geographische Rundschau 59, Heft 4, S. 40 - 48
- Stocker T. (2008):* Einführung in die Klimamodellierung, FS 2008, <http://www.climate.unibe.ch/~stocker/papers/stocker08EKM.pdf>
- Stone, R.S. et al. (2010):* A three-dimensional characterization of Arctic aerosols from airborne Sun photometer observations: PAM-ARCMIP, April 2009, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 115, D13203, 18 PP
- Stott, P. A., (2003):* Do Models Underestimate the Solar Contribution to Recent Climate Change? Journal of Climate 16, No. 24, S. 4079-4093
- Stott, P. A., (2003):* Estimation of natural and anthropogenic contributions to twentieth century temperature change, J. Geophys. Res. 107, D16
- Stott, P. A., (2003):* Attribution of regional-scale temperature changes to anthropogenic and natural causes, Geophys. Res. Lett., 30(14), 1728,
- Stott, P. A., et al (2004):* Human Contribution to the European heatwave of 2003, Nature 432, S. 610-614
- Stroeve, J., M. M. Holland, W. Meier, T. Scambos, and M. Serreze (2007):* Arctic sea ice decline: Faster than forecast, Geophys. Res. Lett., 34, L09501,
- Strömberg, L. (2004):* A future “CO2Free” Power Plant for Coal, Technology and Economics, Vortrag DPG, Okt. 2004
- Sun, D. Z. (2003):* A possible effect of an increase in the warm-pool SST on the magnitude of El Niño Warming, Journal of Climate 16, S. 185-205
- Sun Yin (2008):* Retrieval and Application of Land Surface Temperature, <http://www.geo.utexas.edu/courses/387h/PAPERS/Term%20paper-Sun.pdf>
- Svensmark, H., Friis-Christensen, E. (1997):* Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage-a missing link in Solar-terrestrial Physics, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 59 (11), S. 1225-1232
- Svensmark, H., et al. (2006):* Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions, Mathematical, Physical and Engineering Sciences ISSN: 1364-5021 (Paper) 1471-2946 (Online) Issue: FirstCite Early Online Publishing DOI: 10.1098/rspa.2006.1773
- Svensmark, H., T. Bondo, and J. Svensmark (2009):* Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds, Geophys. Res. Lett., 36,
- Synthesis Report 2009:* Synthesis Report from CLIMATE CHANGE, Global Risks, Challenges & Decisions COPENHAGEN 2009, 10-12 March, <http://climatecongress.ku.dk/pdf/synthesisreport>
- Teller, E., et al. (1997):* Global Warming and Ice Ages: Prospects for Physics-Based Modulation of Global Change, Lawrence Livermore National Laboratory (<http://www.llnl.gov/global-warm/231636.pdf>)
- TemmaNord (2010):* Physical Climate Science since IPCC AR4, A brief update on new findings between 2007 and April 2010, TemaNord 2010:549, © Nordic Council of Ministers, Copenhagen 2010, <http://www.norden.org/en/publications/publications/2010-549>
- The Royal Society (2009):* The Royal Society Geoengineering the Climate, Report 10/9, <http://royalsociety.org/Geoengineering-the-climate/>
- Thompson, D. W. J. (2000):* Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part II: Trends, Journal of Climate 13, No. 5, S. 1018-1036
- Thompson, D. W. J., and Wallace, J. M. (2001):* Regional Climate Impacts of the Northern Hemisphere Annular Mode, Science 293, S. 85-89
- Thompson, D. W. J., and Solomon, S. (2002):* Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change, Science 296, S. 895-899
- Thompson D.W.J., et al. (2008):* A large discontinuity in the mid-twentieth century in observed global-mean surface temperature. In: Nature. 453, S. 646-649
- Titchner H.A. et al. (2009):* Critically Reassessing Tropospheric Temperature Trends from Radiosondes Using Realistic Validation Experiments. Journal of Climate, 22, S. 465-485

- Tinz, B. (2002):* Die Nordatlantische Oszillation und ihr Einfluss auf die europäischen Lufttemperaturen, DWD Klimastatusbericht, S. 32 -41
- Tol, R. S. J. (2004):* Exchange Rates And Climate Change: An Amplification Of FUND, Working Paper FNU-45 ([www.uni-hamburg.de/Wiss/FB/15/Sustainability/ppmerwp.pdf](http://www.uni-hamburg.de/Wiss/FB/15/Sustainability/ppmerwp.pdf))
- Tol, R. S. J. et al. (2005):* A critical Assessment of the IPCC Scenarios (<http://www.uni-hamburg.de/Wiss/FB/15/Sustainability/ensemblsres.pdf>)
- Tol, R. S. J. (2009):* Die Kosten des Klimawandels, FAZ, 23.11.2009
- Trenberth, K. et al. (2009):* Earth's Global Energy Budget, BAMS, 3/2009, S.311-325
- Trenberth, K. E., (2009):* An imperative for adapting to climate change: Tracking Earth's global energy. Current Opinion in Environmental Sustainability, 1, S. 19-27. DOI 10.1016/j.cosust.2009.06.001.  
[http://www.wired.com/images\\_blogs/threatlevel/2009/11/energydiagnostics09final.pdf](http://www.wired.com/images_blogs/threatlevel/2009/11/energydiagnostics09final.pdf)
- Trenberth, K. E., (2009):* Changes in the flow of energy through the Earth's climate system, Meteorol. Z., 18, S. 369 - 376
- Trenberth, K. et al. (2010):* Climate Change: Tracking Earth's Energy, Science, Vol. 328, No. 5976, S. 316 - 317
- Trenberth, K. (2010):* The Ocean is warming, isn't it? Nature, Vol 465, S. 304
- Trick, C. et al. (2010):* Iron enrichment stimulates toxic diatom production in high-nitrate, low-chlorophyll areas. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 10.1073/pnas
- Trigo, I. F., I. T. Monteiro, F. Olesen, and E. Kabsch (2008):* An assessment of remotely sensed land surface temperature, *J. Geophys. Res.*, 113
- Turner, J., et al. (2006):* Significant warming of the Antarctic winter troposphere, Science 311, No. 5769, S. 1914-1917
- UBA (2000):* Jahresbericht 1999, aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes, 3.1 Ausgewählte Treibhausgase in Deutschland (Beilke, Uhse), Texte 58/00
- UBA (2003):* Umweltdaten Deutschland 2002
- UBA (2003):* Jahresbericht 2002, Spezielle Umweltprobleme, 3.1 Der nordhemisphärische Transport von Ozon und Feinstaub und sein Beitrag zur Luftqualität in Deutschland, Texte 88/03
- UBA (2004):* Broschüre: Klimaänderung, wie stichhaltig sind die Argumente der Skeptiker? ([www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de))
- UBA (2006):* Hintergrundpapier: Künftige Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert, MPI-M, Hamburg ([www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Klimaaendeungsworkshop.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Klimaaendeungsworkshop.pdf))
- UBA (2006):* UBA-Hintergrundpapier „Klimagefahr durch tauenden Permafrost?“
- UBA (2008):* Kipp-Punkte des Klimasystems – Welche Gefahren drohen?, <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/kipp-punkte.pdf>
- UBA (2010):* Pressemitteilung 3/2010, [http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2010/pdf/pd10-013\\_treibhausgasemissionen\\_grafiken.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2010/pdf/pd10-013_treibhausgasemissionen_grafiken.pdf)
- Ulbrich U, Christoph M (1999):* A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing. *Clim Dyn* 15, S.551–559
- Ulbrich, U. et al. (2008):* Veränderungen der NAO im anthropogen beeinflussten Klima, *promet* (DWD), Heft 3/4, S. 138-142
- Ulbrich, U. Leckebusch, G. C. Pinto J. G. (2009):* Extra-tropical cyclones in the present and future climate:a review, *Theor Appl Climatol*, 96, S.117–131, <http://www.springerlink.com/content/g401m1562612332r/fulltext.pdf>
- Usoskin, I. G., et al. (2004):* Reconstruction of solar activity for the last millenium using 10Be data, *Astron. Astrophys.* 413, S. 745–751
- Usoskin, I. G., et al. (2004):* Latitudinal dependence of low cloud amount on cosmic ray induced ionization, *Geophys. Res. Let.* 31, 101029

*Usoskin, I.G., et al. (2005):* Solar activity, cosmic rays, and Earth's temperature: A millennium-scale comparison. *Journal of Geophysical Research* 110, 10.1029

*Usoskin, I. G., and Kromer, B. (2005):* Reconstruction of the <sup>14</sup>C production rate from measured relative abundance. *Radiocarbon* 47, No.1, S. 31-37

*Valcke, S. et al. (2007):* A European Network for Earth System Modeling, *Eos Trans. AGU*, 88(12)

*van den Broeke, M. et al.,* Partitioning Recent Greenland Mass Loss, *Science* 2009, S. 984-986

*van Dorland, R. (2009):* News in Climate Science Since IPCC 2007, Topics of interest in the scientific basis of climate change, R. van Dorland et al (Nov. 2009), Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL),  
[http://www.knmi.nl/samenw/cop15/News\\_in\\_climate\\_science\\_physical\\_basis.pdf](http://www.knmi.nl/samenw/cop15/News_in_climate_science_physical_basis.pdf)

*van de Wal, R.S.W., et al.,* 2008. Large and Rapid Melt-Induced Velocity Changes in the Ablation Zone of the Greenland Ice Sheet. *Science*, 321, S. 111-113.

*Vattenfall (2006):* Curbing Climate Change  
([www.vattenfall.com/files/news\\_and\\_comments/climate\\_change\\_report.pdf](http://www.vattenfall.com/files/news_and_comments/climate_change_report.pdf))

*VDE (2010):* ETG Positionspapier Übertragung elektrischer Energie,  
<http://www.vde.com/de/InfoCenter/>

*Velicogna, I. (2009):* Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 36,

*VGB PowerTech (2004):* CO2 Capture and Storage, VGB Report on the State of the Art, Essen 2004 (<http://www.vgb.org>)

*VGB (2010):* VGB Zahlen und Fakten zur Stromerzeugung 2010/2011,  
([http://www.vgb.org/daten\\_stromerzeugung.html](http://www.vgb.org/daten_stromerzeugung.html))

*VGB (2010):* Kraftwerke (KW) 2020+ Kraftwerksoptionen für die Zukunft und der damit verbundene Forschungsbedarf, Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats des VGB PowerTech e.V. 2010, ([http://www.vgb.org/vgbmultimedia/News/Kraftwerke2020plus\\_D.pdf](http://www.vgb.org/vgbmultimedia/News/Kraftwerke2020plus_D.pdf))

*Vidale, P. L., D. Lüthi, C. Frei, S. I. Seneviratne, and C. Schär (2003):* Predictability and uncertainty in a regional climate model, *J. Geophys. Res.*, 108(D18),

*Von Storch, H., et al. (2004):* Reconstructing past climate from noisy proxy data, *Science* 306, S. 679-682

*Von Storch, H., et al. (2005):* Comment on "Hockey sticks, principal components, and spurious significance", *Geophys. Res. Lett.* 32, L20701, S. 1022-1023,

*Von Storch, H., Weisse, R. (2005):* Regional storm climate and related marine hazards in the NE Atlantic, Extended Abstracts for "Climate Variability and Extremes During the Past 100 Years", Gwatt, Switzerland, 24-26 July 2006

<http://w3g.gkss.de/staff/storch/pdf/060724.thun.storms.extended.pdf>

*Von Storch, H. (2006):* Klimaänderungsszenarien  
(<http://w3g.gkss.de/G/Mitarbeiter/storch/pdf/szenarien.geografie.2005.pdf>) von Storch, H., 2006: in: Gebhardt, H., Glaser, R., Radtke, U., und Reuber, P. (Hrsg.): Lehrbuch Geographie Spektrum Verlag, Heidelberg (im Druck)

*Von Storch, H., et al. (2006):* Response to Comment on "Reconstructing Past Climate from Noisy Data", *Science* 312, 529 b, c

*Wagner, T. (2004):* ([www.iup.uni-heidelberg.de/institut/studium/lehre/Atmosphärenphysik/script2/](http://www.iup.uni-heidelberg.de/institut/studium/lehre/Atmosphärenphysik/script2/))

*Wang, X., Key, J. R. (2003):* Recent Trends in Arctic Surface, Cloud, and Radiation Properties from Space, *Science* 299, S. 1725-1728

*Wang, C. (2002):* Atmospheric circulation cells associated with the El Niño-Southern Oscillation, *Journal of Climate* 15, S. 399-419

- Wang, C. (2005): ENSO; Atlantic Climate Variability, and the Walker and Hadley Circulations; in Diaz, H. F., and Bradley, R. S. (eds.), *The Hadley Circulation: Present, Past and Future*, S. 173 -202, Kluwer Academic Publications, The Netherlands
- Wang, K. et al. (2009): Clear Sky Visibility Has Decreased over Land Globally from 1973 to 2007, *Science* Vol. 323. No. 5920, S. 1468 - 1470
- Wang, X. et al. (2009): Study on immunity of dengue virus and dengue vaccine development. *Frontiers of Biology in China* 4:2, S. 125-128
- Wanner, H., et al. (2001): North Atlantic Oscillation - Concepts and Studies, *Surveys in Geophysics* 22 (4), S. 321-381
- WBGU (2003): Sondergutachten, Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert, [http://www.wbgu.de/wbgu\\_sn2003.html](http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003.html)
- WBGU (2006): Sondergutachten - Die Zukunft der Meere: zu warm, zu hoch, zu sauer [http://www.wbgu.de/wbgu\\_sn2006\\_voll.html](http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006_voll.html)
- Webster, P. J., et al. (2005): Changes in tropical cyclone, number, duration, and intensity in a warming environment, *Science* 309, S. 1844-1846
- Weisse, R. (2005): Northeast Atlantic and North Sea Storminess as Simulated by a Regional Climate Model during 1958 - 2001 and Comparison with Observations, *Journal of Climate* 18(3): 465
- Werner, P.C. und Gerstengarbe F.W. (2007): WELCHE KLIMAÄNDERUNGEN SIND IN DEUTSCHLAND ZU ERWARTEN? (<http://edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel-28044/56/PDF/56.pdf>)
- Wicke, L., Schellnhuber H.J., Klingefeld D.: NACH KOPENHAGEN NEUE STRATEGIE ZUR REALISIERUNG DES 2° MAX KLIMAZIELES, PIK Report No. 116
- Wild, M., (2009): Global dimming and brightening: A review, *J. Geophys. Res.*, 114
- Willett, K. M., P. D. Jones, N. P. Gillett, and P. W. Thorne (2008): Recent changes in surface humidity: Development of the HadCRUH dataset, *J. Clim.*, 21, S. 5364–5383.
- Willis, J. K. (2010), Can in situ floats and satellite altimeters detect long-term changes in Atlantic Ocean overturning?, *Geophys. Res. Lett.*, 37,
- Wissel, S. et al. (2008): Stromerzeugungskosten im Vergleich, Bericht Nr. 4, IER, ([http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/arbeitsberichte/Arbeitsbericht\\_04.pdf](http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/arbeitsberichte/Arbeitsbericht_04.pdf))
- WMO (2009): WMO Statement on the Status of the Global Climate 2008, WMO-No. 1039. [http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcdmp/documents/WMO1039\\_EN\\_web.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcdmp/documents/WMO1039_EN_web.pdf)
- WMO (2010): WMO WDCGG DATA SUMMARY WDCGG No. 34, GAW DATA Volume IV-Greenhouse Gases and Other Atmospheric Gases, <http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg/products/summary/sum34/sum34.pdf>
- Wolff, E.W. et al. (2010): Changes in environment over the last 800,000 years from chemical analysis of the EPICA Dome C ice core, *Quaternary Science Reviews* 29, S. 285–295
- WEO (2009): World Energy Outlook 2009, [http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/WEO2009\\_es\\_german.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/WEO2009_es_german.pdf), [http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/climate\\_change\\_excerpt.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/climate_change_excerpt.pdf)
- Woth, K., Weisse, R., von Storch, H. (2005): Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models, *Ocean Dynamics*, ISSN: 1616-7341, (auch GKSS Report 2005) (<http://w3g.gkss.de/G/Mitarbeiter/storch/pdf/woth.od.2005.pdf>)
- Xu, Q. (2001): Abrupt change of the mid-summer climate in central east China by influence of atmospheric pollution, *Atmospheric Environment* 35, S. 5029-5040
- Zebisch, M., et al. (2005): Klimawandel in Deutschland, Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme, PIK, UBA Studie ([www.umweltbundesamt.org/fpdf-k/2947.pdf](http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-k/2947.pdf))
- Zemp, M. et al. (2009): Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network, *Annals of Glaciology*, 50, S. 101 - 111
- Zickfeld, K., B. Knopf, V. Petoukhov, and H. J. Schellnhuber (2005): Is the Indian summer monsoon stable against global change?, *Geophys. Res. Lett.*, 32,

*Zimmermann, L., et al. (2003):* Langzeitverhalten von Starkniederschlägen in Süddeutschland, Klimastatusbericht 2002, S. 151-165

*Zittel, W., Altmann, M. (1994):* Der Einfluss von Wasserdampf auf das Klima, ENERGIE, Jg.45, Nr.4

*Zorita, E., et al. (2003):* Statistical temperature reconstruction in a 1000-year-long control climate simulation: an exercise with Mann's et al (1998) method, J. Climate 16, S. 1378-1390

*Zorita, E., et al. (2005):* Natural and anthropogenic modes of surface temperature variations in the last thousand years. Geophys. Res. Lett. 32, L08707

*Zorita, E., T. F. Stocker, and H. von Storch (2008):* How unusual is the recent series of warm years?, Geophys. Res. Lett., 35

*ZVEI (2005):* Freiwillige Selbstverpflichtung der SF<sub>6</sub> –Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln