



Christoph Buchal  
Christian-Dietrich Schönwiese

# KLIMA

Die Erde und ihre Atmosphäre  
im Wandel der Zeiten

 HELMHOLTZ  
| GEMEINSCHAFT



Wieviele Menschen werden  
im Jahr 2100 auf der Erde leben?

**7 Milliarden ... 15 Milliarden?**

Wieviel CO<sub>2</sub> wird die Atmosphäre  
im Jahr 2100 enthalten?

**500 ppm ... 1000 ppm?**

Wie weit wird die Temperatur  
im Jahr 2100 angestiegen sein?

**2°C ... 7°C?**

Christoph Buchal  
Christian-Dietrich Schönwiese

# KLIMA

Die Erde und ihre Atmosphäre  
im Wandel der Zeiten





#### Herausgeber

Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung,  
Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren

#### Konzept, Texte und Redaktion

Prof. Dr. Christoph Buchal  
Institut für Bio- und Nanosysteme  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
52425 Jülich  
E-Mail: c.buchal@fz-juelich.de

Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese  
Institut für Atmosphäre und Umwelt  
Goethe-Universität Frankfurt/M.  
Postfach 111932, 60054 Frankfurt/M.  
E-Mail: schoenwiese@meteor.uni-frankfurt.de

#### Design, digitale Realisation, Illustration und Produktion

MIC GmbH, 50674 Köln  
Tel. 0221 925950-0

#### Bestellungen

MIC GmbH, 50674 Köln  
www.mic-net.de  
info@mic-net.de

#### Druck und Verarbeitung

MOHN Media  
Mohndruck GmbH, Gütersloh

1. Auflage: 2010, 50.000 Exemplare  
ISBN 978-3-89336-589-0

#### Bilder

AGCO GmbH, S. 175  
Alexander Blum, S. 172  
Alfred-Wegener-Institut für Polar- und  
Meeresforschung (AWI), S. 91, 110, 116  
Austrian Airlines, S. 45, 47  
BirdLife International/Marco Lambertini,  
S. 175  
Bremische Deichverband am rechten  
Weserufer, S. 136  
Cleveland Museum of Natural History, S. 95  
Dave Hickey, S. 12/13  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
(DLR), S. 84/85  
Dinosaur National Monument, Utah, S. 97  
Forschungsverbund Sonnenenergie e.V.,  
S. 175  
Forschungszentrum Jülich, S. 139  
G. Bohrmann, S. 155  
Ian Giammanco, S. 60

Intergovernmental Panel on Climate Change  
(IPCC), S. 110, 130, 142, 146/147  
Joachim Clüsserath, Köln,  
www.mosellandschaft.de, S. 22/23  
Koenigsegg, S. 174  
Lufthansa AG, S. 45  
National Aeronautics and Space  
Administration (NASA), S. 38/39, 47, 56, 58  
National Oceanic and Atmospheric  
Administration (NOAA), S. 14  
National Optical Astronomy Observatory  
(NOAO), S. 87  
Natural Earth II, S. 29, 32, 33, 36  
70/71, 75, 80/81, 86, 107  
PAUAT Architekten – Heinz Plöder, S. 172  
Phil Munday, S. 148/149, 160/161  
SeeBa Energiesysteme GmbH, S. 174  
Shell AG, S. 174  
Siemens AG, S. 173  
Singapore Airlines, S. 45  
Statkraft, S. 173

Wikipedia, Antoine Sonrel, S. 106  
Wikipedia, Arpingstone, S. 106  
Wikipedia, Gerhard Pietsch, S. 14  
Wikipedia, Heinz-Josef Lücking, S. 174  
Wikipedia, Jan Rehschuh, S. 175  
Wikipedia, Rolf Cosar, S. 13  
Wikipedia, S. 66/67, 88, 95, 135, 137, 169  
Wikipedia, Thomas Schiet, S. 120/121  
Wikipedia, Leaflet, S. 182  
www.alaskanshores.com, S. 106  
www.stockxper.com, S. 10/11  
US Navy, S. 24  
W. Oschmann et al.: Evolution des System  
Erde. Kleine Senckenberg-Reihe Nr. 35,  
Frankfurt a.M. (2000), 57 S. (dort auf S. 18),  
S. 100  
Alle anderen Grafiken wurden von MIC  
GmbH vollständig neu erstellt,  
z.T. unter Anlehnung an Vorlagen aus den  
dort angegebenen Primärquellen.

*Herstellung und Druck dieses Werkes  
wurden durch die Wilhelm und Else  
Heraeus-Stiftung finanziert.  
Die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung  
ist eine Stiftung des bürgerlichen  
Rechts zur Förderung von Forschung  
und Ausbildung auf dem Gebiet der  
Naturwissenschaften, insbesondere  
der Physik. Sie unterstützt die  
naturwissenschaftliche Bildung im  
Bereich der Schulen, wozu wesentlich  
auch das Wissen um den bewussten  
und verantwortungsvollen Umgang mit  
Rohstoffen und Energie gehört.  
Die Stiftung hat ihren Sitz in Hanau,  
ihre Internetadresse lautet  
[www.we-heraeus-stiftung.de](http://www.we-heraeus-stiftung.de).*



**JOACHIM TREUSCH**

Physiker  
Präsident der Jacobs-University, Bremen

### **Liebe Leserinnen, liebe Leser,**

angesichts des weit verbreiteten Wunsches nach verlässlichen Informationen über das Klima der Erde hat die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung beschlossen, zusammen mit der Helmholtzgemeinschaft deutscher Forschungszentren ein allgemein verständliches Sachbuch zu diesem Thema herauszugeben. Für alle interessierten Leser und für den Gebrauch an Schulen bietet dieses Buch eine breite Wissensbasis zusammen mit den neuesten Resultaten der Klimaforschung. Um diese Erkenntnisse einordnen zu können, wird ein größerer Rahmen abgesteckt: Wie ist die Atmosphäre entstanden, was geht in ihr vor und wie ist sie heute beschaffen? Warum gibt es Stürme, Hurrikane und Tornados? Warum ist der Kohlenstoff so überragend bedeutsam? Welche Rolle spielen die Ozeane, Gletscher und Vulkane für das Klima der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft? Wie verhielt sich der Meeresspiegel in Warmzeiten und während der Eiszeitalter?

Natürlich werden auch die möglichen zukünftigen Entwicklungen des Klimas betrachtet und die Handlungsoptionen im Detail erläutert. Den Autoren ist es gelungen, ein spannendes und leicht lesbares Buch über ein faszinierendes Thema zu schreiben und fast nebenbei auch all die wichtigen Naturgesetze, Zusammenhänge, Zahlen und Statistiken einzuflechten. Sie, liebe Leser, haben nun die Möglichkeit, den klar formulierten Gedanken zügig zu folgen, ohne sich dabei im Detail mit der Datenlage, etwa der Kohlenstoffstatistik, der Erdbevölkerung oder den Emissionsszenarien, auseinander zu setzen – oder aber Sie können dieses Buch als wahre Fundgrube benutzen, um sich mit Daten und Fakten zu wappnen, so dass Sie einen kompetenten und realistischen Standpunkt in der gegenwärtigen Diskussion vertreten können. Ich persönlich vermute, dass Sie manche Kapitel sogar mehrfach lesen und dabei immer wieder neue Zusammenhänge entdecken werden. Lassen Sie sich nun von einem „Megathema der Gegenwart“ einfangen und in den Bann ziehen.

Prof. Dr. Joachim Treusch  
Mitglied des Vorstands der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung



**CHRISTOPH BUCHAL**

*Physiker  
Autor dieses Buches und  
des Werkbuches „Energie“*



**CHRISTIAN-DIETRICH SCHÖNWIESE**

*Klimaforscher und Meteorologe  
Erfahrener Fachmann und Koautor  
Autor des Lehrbuches „Klimatologie“*

### ***Liebe Leserinnen, liebe Leser,***

die Klimaentwicklung auf unserer Erde ist eine recht verwickelte Angelegenheit. Aus der Sicht eines Lehrers könnte man sagen: Das Klima ist ein fachübergreifendes Thema. Wenn Sie das Buch nun zur Hand nehmen, finden Sie zahlreiche Bezüge zu Physik, Chemie, Biologie, Geographie, Astronomie, Politik und Technik. Ganz bewusst haben wir unseren Text immer wieder mit Basiswissen aus diesen Fächern verknüpft und verankert, denn die Querverbindungen zu Bekanntem – und möglicherweise schon wieder Vergessenem – können das Verständnis sehr erleichtern und vertiefen.

Genau wie in dem erfolgreichen und in gleicher Ausstattung erschienenen Werkbuch „Energie“ (2. Auflage 2008) steht dabei die wissenschaftliche Sichtweise und Genauigkeit im Vordergrund – stets verbunden mit unserem Bemühen um Klarheit und Verständlichkeit. Unsere Texte sind geschrieben für interessierte Schülerinnen und Schüler und in gleichem Maße auch für Erwachsene. Wir haben für Sie einen weiten Bogen gespannt von der erstaunlichen Vergangenheit über die unmittelbare Gegenwart bis in die Zukunft, von der Wissenschaft über den Alltag bis zur konfliktgeladenen Klimapolitik.

Weil Sie, liebe Leserinnen und Leser, natürlich Ihre persönlichen Vorlieben haben, schauen Sie doch bitte zuerst in die „Kleine Einleitung“ ab S. 10 und wählen Sie dann Ihren persönlichen Pfad durch die Kapitel. Wir versprechen Ihnen erstaunliche Fakten und viele Einblicke, die sich zu einem umfassenden Bild vom Klima der Erde zusammen fügen werden.

Am allerbesten wäre es natürlich, wenn Sie sich nun auf Ihr Lieblingsplätzchen zurückziehen könnten, um das Buch ganz einfach von vorne bis hinten zu studieren, zu genießen und die Dinge in Ruhe zu überdenken.






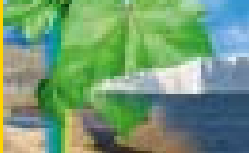
Wir bedanken uns besonders bei Herrn Dr. Ernst Dreisigacker, Hanau, für seine vielfältige kompetente Unterstützung und bei der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung für die Bereitstellung der finanziellen Basis für dieses wundervolle Projekt.


Wir wünschen Ihnen interessante Stunden mit diesem Buch und viele neue Erkenntnisse.

Prof. Dr. Christoph Buchal  
Universität zu Köln und  
Forschungszentrum Jülich


Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese  
Goethe-Universität, Frankfurt/M.

# INHALT

		<b>Eine kleine Einleitung</b> ..... 10 Unser dynamischer Planet ..... 12
		<b>Vom Wetter zum Klima</b> ..... 20 Ein angenehmes Klima ..... 22 Das Klima als die Statistik des Wetters ..... 25 Das Klima als Resultat der Triebkräfte der Atmosphäre..... 28
		<b>Die Physik der Atmosphäre</b> ..... 30 Wärme setzt alles in Bewegung ..... 32 Der Planet der Meere ..... 34 Unsere höchst erstaunliche Atmosphäre ..... 40
		<b>Die Energiebilanz in der Atmosphäre – der Treibhauseffekt</b> ..... 66 Temperaturausgleich ..... 68 Eine nackte Felsen-Erde im Weltraum ..... 70 Die geniale Wärmeschutzdecke – ein einfaches Modell..... 72 Die atmosphärische Energiebilanz – genaue Werte ..... 76

<b>Das Klima der Erde im Rückblick</b> ..... 80 Sternenstaub und die Hölle auf Erden..... 82 Die „zweite“ und „dritte“ Atmosphäre..... 88 Vereisung und Vulkanismus ..... 90 Eiseskälte, Treibhaushitze, Katastrophen ..... 94 Wandernde Kontinente und große Überflutungen..... 98 Von der Wärme in die rätselhaften Vereisungen..... 103 Das Klimaarchiv im Eis – bis zur Gegenwart ..... 109	 <b>4</b>
--	--

<b>Der Weg in die Gegenwart</b> ..... 120 Die jüngeren Klimadaten..... 122 Verstehen wir die Daten? ..... 129 Rätselhafte Klimaschwankungen, Kleine Eiszeit ..... 134 Klimaprojektionen – mögliche zukünftige Klimaentwicklungen ..... 138 Kippelemente im Klimasystem ..... 144 IPCC-Berichte ..... 146	 <b>5</b>
--	--

<b>Die Gegenwart</b> ..... 148 König Kohlenstoff – zu Land, zu Wasser und in der Luft. ... 150 Die Rolle der gewaltigen Ozeane..... 156 Die Bilanz des Kohlenstoffs in der Gegenwart ..... 162 Realitäten des Energiebedarfs und der Energieversorgung . 164 Zukünftige Energieversorgung und Emissionsszenarien ... 170 Umweltschutz, Vermeidungskosten und Marktwirtschaft .. 179	 <b>6</b>
---	---

<b>Das Gespräch</b> ..... 183 Literatur ..... 192 Forschung, Ausbildung und Berufe ..... 194 Stichwortverzeichnis ..... 202	 <b>7</b>
--	--

# EINE KLEINE EINLEITUNG

UNSER DYNAMISCHER PLANET ..... 12



# UNSER DYNAMISCHER PLANET

Die Erde ist nicht statisch.

Sie ist in stetigem Wandel begriffen. Das ist uns kaum bewusst, weil die meisten Veränderungen schleichend und nahezu unmerklich verlaufen – bisweilen aber brechen sie sich Bahn mit der Urgewalt großer Naturkatastrophen. In vielen Regionen der Erde bauen sich langsam Spannungen im Gestein auf, bis sie die Stabilitätsgrenzen überschreiten. Dann entlädt sich die gespeicherte Energie urplötzlich in Erdbeben, Tsunamis und Vulkanausbrüchen. Steht die Atmosphäre und das Klima auch vor katastrophalen Umbrüchen oder nur in einem langsamen, aber weniger gefährlichen Wandel? Diese Frage bewegt gegenwärtig alle verantwortungsbewussten Menschen.

Eine Entwarnung kann derzeit nicht gegeben werden. Wir alle wissen, dass die Atmosphäre gewaltige Energien speichern und in Unwettern und Starkregen frei setzen kann. Das Zerstörungspotential von Stürmen kann durch das Zusammenspiel mit den Ozeanen enorm verstärkt werden: Sturmfluten und Überschwemmungen haben schon oft in kurzer Zeit katastrophale Veränderungen bewirkt. Durch eine Erwärmung der Luft und vor allem

der Meere nimmt diese Gefahr mit Sicherheit zu. Langfristig bereiten deshalb auch die schleichenden Änderungen große Sorgen: Wie warm wird die Luft, wie warm werden die Meere, wie weit wird der Meeresspiegel noch ansteigen?

Dass sich die Erde ständig wandelt, ist keine neue Erkenntnis. Tatsächlich war sie niemals ein stabiler Garten Eden. Seit Anbeginn mussten die Menschen in allen Klimazonen die oft grausamen Launen des Wetters ertragen. Dürrekatastrophen, Hochwasser, Stürme, Schnee und Eis: Unwetter waren Sache des Schicksals oder gar Strafe der Götter. Der Mensch war machtlos und konnte nur versuchen, Haus, Hof und Wirtschaft dem Wandel des Wetters und der Jahreszeiten anzupassen. Man musste sich rechtzeitig Vorräte anlegen und so gut wie möglich Vorsorge treffen. Nur mit größten gemeinsamen Anstrengungen konnte man versuchen, möglichen Katastrophen vorzubeugen. Das eindrucksvollste Beispiel dafür sind die Deichbaumaßnahmen unserer Vorfahren.

Der Kampf ums Überleben war immer auch ein Kampf gegen die Natur. Das ist uns heute kaum noch bewusst, denn unsere gegen-

*Seit Anbeginn lebt die Menschheit auf einem Feuerball mit einer dünnen festen Kruste.*

wärtigen persönlichen Katastrophenerlebnisse fallen meistens recht milde aus: einige Tage ohne Zentralheizung im kalten Winter, ein wegen eines Unwetters verspäteter Zug oder, schon schlimmer, ein Unfall auf Glatt-eis. Tatsächlich haben sich viele Menschen den mächtigen Kräften der Natur inzwischen entfremdet und können ihr wechselhaftes Wirken gar nicht mehr einordnen. Eine wegen Schneefalls gesperrte Autobahn oder gar ein ausgefallener Flug löst bei den Betroffenen häufig empörte Reaktionen aus, obwohl eine vermiedene Gefahr doch zu nachdenklicher Dankbarkeit motivieren könnte. Tatsächlich haben sich die meisten Menschen auch den wechselhaften Einflüssen der Jahreszeiten bereits weitgehend entzogen. Ihre Zentralheizungen und „Klimaanlagen“ sorgen problemlos für ein günstiges Raumklima, und wer es sich leisten kann, fliegt bisweilen sogar vor der Kälte auf und davon in wärmere Urlaubsregionen. Gleichzeitig aber tragen sie durch den damit verbundenen Bedarf an Brennstoffen, Strom und Kerosin dazu bei, die Zusammensetzung der Luft ein winziges bisschen weiter zu verändern.

In krassem Gegensatz zu unserem geordneten und gut organisierten Alltag stehen die detaillierten Bilder von schweren Naturkatastrophen in aller Welt, die uns das Fernsehen regelmäßig ins Wohnzimmer liefert: eine Fülle von Unwettern, dazu Erdbeben und Vulkanausbrüche. Dennoch sind wir vermutlich alle zutiefst von der Stabilität unserer eige-



nen Heimat, der Städte, Landschaften und Küsten überzeugt. Hier wird hoffentlich alles so bleiben, wie wir es gewohnt sind. Das ist verständlich, doch was zeigt bereits der Blick in die jüngere Vergangenheit?

Die letzten gewaltigen Vulkanausbrüche in der Eifel liegen nur 10 000 Jahre zurück. Davon waren unsere Vorfahren heftig betroffen, wir aber können heute die Reste dieser Vulkane seelenruhig zu Baustoffen verarbeiten. Deutschland hat derzeit einfach viel Glück, denn der Rheingraben ist inzwischen relativ friedlich geworden, besonders im Vergleich zu den aktiven Erdbebengebieten rund um den Pazifik, im Mittelmeerraum oder im Bereich der Kollisionszone des indischen Subkontinents mit der eurasischen Platte.

In Südasien starben beim letzten Tsunami an Weihnachten 2004 etwa 230 000 Menschen in einer Flutwelle. Der letzte große Tsunami in der Nordsee führte ebenfalls zu einer 12 m



*Elbe-Hochwasser im Februar 1962  
in Hamburg und Zerstörungen  
durch den Hurrikan Katrina im  
August 2005.*

hohen Flutwelle. Seine Spuren hat man in Norwegen eindeutig nachgewiesen, obwohl er bereits 9000 Jahre zurück liegt.

Sind wir uns der zahlreichen großen Flutkatastrophen in der Geschichte unseres Landes bewusst? Der große Jadebusen bei Wilhelmshaven entstand erst 1219 bei einer Sturmflut. Im Januar 1362 drang das Meer dann weit nach Nordfriesland ein, die Stadt Rungholt versank, und aus dem fruchtbaren Ackerland wurde das heutige Wattenmeer und die Inseln. Dabei ertranken über 100 000 Menschen. 1421 und 1530 war dann vor allem Holland von vergleichbaren Katastrophen betroffen – wieder ertranken Hunderttausende in der wilden Nordsee. Höhere Deiche können heute besseren Schutz vor Überschwemmungen bieten, aber noch im Februar 1962 hat das Elbe-Hochwasser bei 5,70 m über Normal in Hamburg 340 Menschen getötet.

Wir werden uns auch in Zukunft mit höheren Deichen gut schützen können. Die dazu notwendigen großen Deichbauten und Sperrwerke stellen allerdings erhebliche Eingriffe in die Natur dar, denn die natürlichen Überschwemmungsprozesse werden dadurch behindert. Andererseits wollen wir auch unsere Naturlandschaften erhalten. Naturschutz und menschliches Wohlergehen, der „Menschenschutz“, müssen nun gegeneinander abgewogen werden. Dieser Konflikt wird sich auch in aller Schärfe beim „Klimaschutz“ zeigen.

Die Geschichte der Küstenländer wirft eine sehr strittige Frage auf: Was ist naturgegeben und schützenswert? Wäre eine mögliche zukünftige Überflutung weiter Teile Nord-



deutschlands und der Niederlande naturbedingt und deshalb zu akzeptieren? Wohl kaum. Liegt aber eine gewaltige Naturkatastrophe ausreichend weit zurück, so scheint sich unsere Sichtweise anzupassen. Letztendlich wird der Wandel akzeptiert und das Resultat schrecklicher Sturmfluten sogar zum wertvollen Naturschutzgebiet erklärt. Zumindest in Deutschland will wohl niemand das Wattenmeer wieder eindeichen, um das von der See geraubte Land zurück zu gewinnen und den Küstenschutz wieder zu den Inseln vorzuverlegen. Was würden unsere Vorfahren dazu sagen? Zeigt das gegenwärtige Bild der Erde wirklich einen stabilen und naturgegebenen Endzustand?

Bildberichte über Naturkatastrophen hinterlassen beim Zuschauer im allgemeinen tiefe Eindrücke und erzeugen starke emotionale Reaktionen. Derzeit werden Unwetterkatastrophen bereits als Vorboten eines gefürchteten (Klima-)Wandels bewertet. Nach wie vor zählen die Zerstörungen durch Überschwemmungen bei Fluss- und Meereshochwasser, bei Starkregen und Sturmfluten zu den schlimmsten Naturkatastrophen in Deutschland. Wir erinnern uns alle noch lebhaft an das Hochwasser der Oder 1997 oder der Elbe 2002, wo die Region Dresden unter Wasser stand. An zweiter Stelle der deutschen Statistik stehen die Schäden durch schwere Stürme. Der Wintersturm Kyrill hat im Januar 2007 Schäden von etwa 10 Milliarden Euro angerichtet. Dabei kamen (nur) 49 Personen ums Leben. Die Zerstörungskraft des Hurrikans Katrina im August 2005 war weitaus größer als die der Orkane in unserer Region. Wind und Überschwemmungen haben die Großstadt New Orleans verwüstet, wobei 1322 Tote zu beklagen waren. Der geschätzte Schaden betrug über 125 Milliar-

den US\$, und die Stadt hat sich bis jetzt nicht davon erholen können. Sind diese Unwetter wirklich Anzeichen oder gar Beweise eines weltweiten Klimawandels? Wir werden sehen, dass es dazu klare statistische Aussagen und Erkenntnisse gibt.

Gegen so übermächtige Naturgewalten wie Hurrikane werden die Menschen wohl immer relativ schutzlos bleiben. Ein zukünftiger Klimawandel mit der Konsequenz von gehäuften und zunehmend heftigen Unwettern und Überflutungen wäre mit Sicherheit extrem bedrohlich. Zum Konzept eines umfassenden Schutzes der Erde

*Abb. 1: Das Resultat vieler  
Überschwemmungs-  
katastrophen: die Küsten-  
linie der Deutschen Bucht  
und das Wattenmeer. Die  
hellbraunen Flächen werden  
zweimal täglich von der Flut  
überschwemmt und fallen  
danach bei Ebbe wieder  
trocken.*





(Naturschutz) gehört deshalb inzwischen auch der so genannte Klimaschutz. Der Ausdruck Klimaschutz ist weit verbreitet, aber nicht sehr passend. Wir werden im ersten Kapitel erklären, wie das Klima in der Meteorologie und Klimatologie als eine mathematisch berechenbare statistische Größe definiert ist. Wie aber kann eine statistische Größe geschützt werden? Statt dessen sind die Menschen selbst zu beschützen vor einem befürchteten Klimawandel. Dessen mögliche Folgen müssen begrenzt und abgemildert werden, und die Menschen sollten sich zumindest einem veränderten Klima ausreichend anpassen können. Derzeit haben sich dafür zwei englische Worte durchgesetzt: „Mitigation“ beschreibt eine Milderung des zu erwartenden Klimawandels, wobei vor allem die vielfältigen Alternativen zur Reduzierung der ständigen Treibhausgas-Emissionen diskutiert werden, „Adaptation“ fasst die zahlreichen Maßnahmen zur Anpassung an das möglicherweise Unabänderliche zusammen. Angesichts der enormen Kosten der Vermeidungsmaßnahmen sollten auch die möglichen Anpassungsstrategien sorgfältig geprüft und erwogen werden.

Der Schutz der Atmosphäre vor zunehmenden Emissionen muss dennoch das primäre Ziel aller Bemühungen sein. Es handelt sich dabei um eine Art von globalem Katastrophenschutz, der vergleichbar wäre mit den langfristigen, mühevollen und aufwendigen Deichbauanstrengungen unserer Vorfahren. Sehr erschwerend kommt bei der Bewertung und Durchführung der Maßnahmen zum Schutz der Atmosphäre hinzu, dass sich viele der derzeitigen Emissionen erst nach Jahrzehnten oder, wie beim Meeresspiegel, nach vielen Jahrhunderten voll auswirken werden. Wir dürfen deshalb das Wohl der zukünftigen Generationen nicht außer Acht lassen.



Im ersten Kapitel betrachten wir den Begriff des Klimas: Wie ist das Klima definiert und wie grenzt es sich vom Wettergeschehen ab? Ist das Klima ebenso launisch und unvorhersehbar wie das Wetter? Wie erhält man aus der Statistik der Wetterereignisse die für das Klima charakteristischen Häufigkeitsverteilungen?



Die Atmosphäre der Erde steht im Zentrum dieses Buches. Ihre Eigenschaften und ihre vielfältigen Energieströme und Kräfte bestimmen das Wettergeschehen und sind verantwortlich für das Klima und die extremen Ereignisse, wie beispielsweise die Unwetter. Im zweiten Kapitel beschäftigen wir uns deshalb sorgfältig mit der Physik der Atmosphäre. Hier liegt der Schlüssel zum Verständnis der „Wetterküche“ und zu den unterschiedlichen Klimazonen von den Tropen bis zu den Polen. Einige Betrachtungen zu den Ozeanen sind dabei unerlässlich, denn über 70 % der Erdoberfläche sind von Wasser bedeckt.



Die Energiebilanz der Atmosphäre wird im dritten Kapitel besprochen. Weil die zusätzlichen Treibhausgasanteile deutliche Veränderungen in dieser Bilanz bewirken, stellen sie einen entscheidenden Faktor für einen Klimawandel dar. Ein vereinfachtes und verständliches Modell für den Treibhauseffekt wird vorgestellt und ausgewertet. Es bietet bereits viele wichtige Einsichten zum Energietransport in der Atmosphäre.



Nach den „Kochrezepten der Wetterküche“ und den Erläuterungen zum „Treibhaus Erde“ erweitern wir im vierten Kapitel unsere Kenntnisse ganz wesentlich mit Hilfe einer Zeitreise durch die Geschichte unseres Planeten. Wenn man mit Geologen über das vergangene Klimageschehen diskutiert und die wechselvolle Erdgeschichte betrachtet, muss man zugestehen, dass die Erde selbst derzeit keineswegs gefährdet ist. Sie hat schon ganz andere Klimaperioden überstanden, und das biologische Leben auf der Erde ist immer wieder unglaublich vielfältige Wege gegangen, um sich anzupassen und durchzusetzen. Die eindrucksvolle Rückschau auf lange geologische Zeiträume zeigt die natürlichen Entwicklungen

aus einer übergeordneten Warte: Wo eine Art ausstarb, konnte sich eine andere ansiedeln. Doch möchte niemand nach dem Aussterben der Saurier demnächst von einem möglichen Massensterben der Spezies Homo Sapiens berichten müssen, weil sich diese Art innerhalb weniger Generationen explosionsartig vermehrt und mit ihren wachsenden Ansprüchen die eigene Lebensgrundlage überfordert hat.

## DIE ENERGIEBILANZ IN DER ATMOSPHERE IST EIN SCHLÜSSEL FÜR ALLE WESENTLICHEN KLIMAÄNDERUNGEN

*Die Details der Energieaufnahme von der Sonne und der Energieabstrahlung ins All liefern wichtige Hinweise, um die Klimaänderungen zu verstehen. Dazu zählen:*

1. Die Veränderung der Strahlungsleistung unserer Sonne in ihrem Lebenszyklus. Zeitskala: Jahrmilliarden
2. Veränderungen der Lage der Landmassen der Erde (pol- oder äquatornahe Lage) infolge der Kontinentaldrift. Zeitskala: Hunderte von Jahrtausenden
3. Veränderungen der Erdumlaufbahn um die Sonne, die so genannten Orbitalparameter. Zeitskala: ca. 20 000 bis 100 000 Jahre
4. Zyklische Veränderungen der Sonnenausstrahlung, die so genannte Sonnenaktivität. Zeitskala: Jahrzehnte bis Jahrtausende
5. Veränderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre (Treibhausgase, Aerosole, Stäube). Zeitskala: wenige Jahre (bei einzelnen Vulkanausbrüchen) bis Jahrmilliarden (Entwicklungsgeschichte der Atmosphäre)

*Wir werden sehen, welche Auswirkungen auf das Klima zu beobachten waren. Es wird sich zeigen, dass unter den vielfältigen klima-bestimmenden Faktoren der Einfluss der Treibhausgase besonders deutlich ist.*

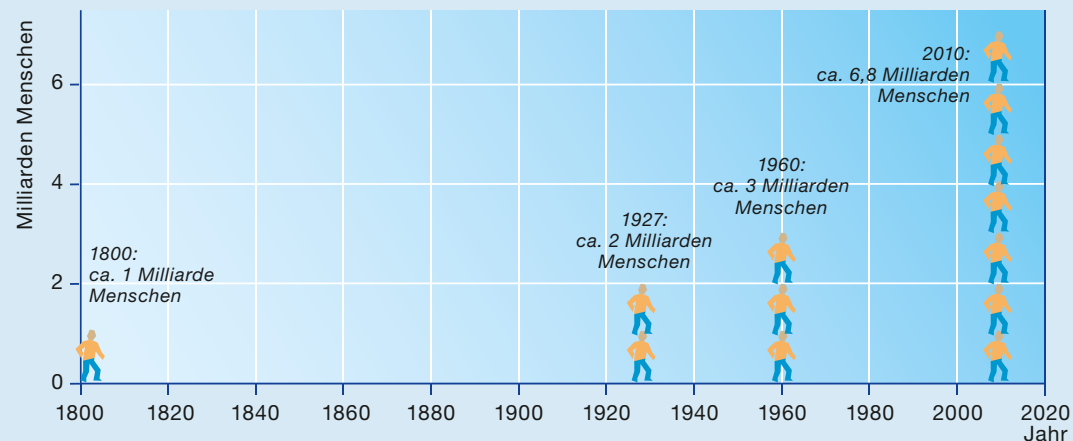


Abb. 2: Große Fortschritte von Medizin, Landwirtschaft und Technik haben zu einem unglaublichen Bevölkerungswachstum in den letzten Jahrzehnten geführt. Während für viele Jahrhunderte vor allem die tägliche Sorge um ausreichende Nahrungsmittel im Vordergrund stand, wird seit etwa 50 Jahren auch die Deckung des Energiebedarfs einer rapide anwachsenden Menschheit (mit ihren obendrein steigenden Ansprüchen) zunehmend schwieriger und komplizierter. Nun müssen wir erkennen, dass die dadurch bedingte Belastung der Atmosphäre auch erhebliche Konsequenzen für das globale Klima haben wird.

Deshalb kann die ferne Vergangenheit nicht als Verharmlosung in die gegenwärtige Diskussion eingebracht werden. Dennoch, die Geschichte der Erde und ihrer Atmosphäre ist so unglaublich, dass die Reise in die Vergangenheit spannend wie ein Krimi wird. In vieler Hinsicht eröffnet das vierte Kapitel besonders eindrucksvolle Perspektiven und Erkenntnisse über die vielen drastischen Klimawandel der Vergangenheit. Die dargestellten Zusammenhänge sind auch für das Verständnis der gegenwärtigen Situation unerlässlich. So merkwürdig es klingen mag, aus geologischer Sicht stecken wir derzeit in einer der kurzen(?) Warmzeiten innerhalb eines sehr langen Eiszeitalters, das schon seit 3 Millionen Jahren andauert. Ob diese Sicht der Dinge auch zukünftig noch Bestand haben wird, sollte sich jeder Leser nach der Lektüre des fünften und sechsten Kapitels noch einmal fragen.



Doch zurück zu den von den Menschen verursachten, den „anthropogenen“ Emissionen. Seit Beginn der Industrialisierung vor über 150 Jahren und der dabei anwachsenden Kohleverbrennung stehen uns auch ausreichend genaue Klimadaten zur Verfügung, um die Wirkungszusammenhänge der Klimaentwicklung in der jüngsten Vergangenheit analysieren zu können. Im fünften Kapitel verfolgen wir deshalb diese Entwicklung im Detail. An Hand der modernen Daten lernen wir einige der Beobachtungen und Erkenntnisse kennen, die sich aus dem derzeitigen Wissensstand der Klimaforschung ergeben. Darauf aufbauend wagen wir zum Schluss mit Hilfe der Klimamodellrechnungen einen

Blick in die Zukunft. Vorsichtige und korrekte Wissenschaftler vermeiden dabei das Wort Klimavorhersage und sprechen stattdessen von Projektionen, die unter bestimmten Annahmen gemacht werden können. Es wird uns nicht überraschen, dass diese Projektionen ganz entscheidend von der Entwicklung der menschlichen Aktivitäten, insbesondere den CO<sub>2</sub>-Emissionen abhängen. Dieser Schlüsselfrage ist deshalb das sechste Kapitel gewidmet.



Die moderne Klimaforschung kann die Konsequenzen der Emissionen erkennen und vor zukünftigen Gefahren warnen. Doch die Begrenzung der Emissionen und der globale Schutz der Atmosphäre ist inzwischen eine beispiellose und unvergleichlich gewaltige Aufgabe geworden, die trotz der Anstrengungen von Wissenschaft und Technik die Weltgemeinschaft zu überfordern droht. Die Bewahrung einer unbelasteten Atmosphäre steht gegenwärtig leider im Konflikt zum Energiebedarf einer aufstrebenden und wachsenden Weltbevölkerung. Die fossilen Energieträger werden überall eingesetzt und sind preiswert verfügbar. Sie bleiben deshalb weltweit begehrt und sind keineswegs generell und problemlos durch ausreichend leistungsfähige emissionsarme Alternativen zu ersetzen, obwohl das außerordentlich wünschenswert wäre. Deshalb ziehen wir im sechsten Kapitel eine klare und nüchterne Bilanz:


- Wo genau stehen wir heute, wie viel fossile Rohstoffe haben wir bereits verbrannt, wie viel verbrennen wir Jahr für Jahr? Wo verbleiben die Emissionen?
- Warum ist der Kohlenstoff so vielseitig und wichtig?
- Welche Hilfe kommt von den Ozeanen und von der Biosphäre?
- Was ist mit den verfügbaren Technologien zu erreichen?
- Wo liegen die größten Chancen, um die Entwicklungen in eine günstige Richtung zu lenken?



Im siebten Kapitel werden einige der wichtigsten Fragen in Form eines Gesprächs noch einmal aufgegriffen.

Das vorliegende Buch bietet zahlreiche sorgsam recherchierte Daten und ausführlich erläuterte Fakten. Sie bilden eine unverzichtbare Basis für das Verständnis kommender Entwicklungen. Wir haben keinen Grund, uns in Sicherheit zu wiegen, denn die Erde und ihre Atmosphäre verändern sich deutlich.

Die Erde selbst ist nicht statisch. Obendrein beeinflussen die Menschen die Treibhausgaskonzentration bereits sehr deutlich. Entwarnung kann deshalb derzeit nicht gegeben werden.



# VOM WETTER ZUM KLIMA

1.1 EIN ANGENEHMES KLIMA .....	22
1.2 DAS KLIMA ALS DIE STATISTIK DES WETTERS .....	25
DIE GRAFISCHE DARSTELLUNG DES KLIMAS .....	27
1.3 DAS KLIMA ALS RESULTAT DER TRIEBKRÄFTE IN DER ATMOSPÄRE .....	28

# EIN ANGENEHMES KLIMA

Wir verstehen sofort, was gemeint ist, wenn das gesunde Reizklima an der See oder das freundliche Klima bei einer Unterredung gelobt wird. Bei schwierigen Verhandlungen hilft ein angenehmes Raumklima, für das möglicherweise eine Klimaanlage sorgt. Das Wort Klima löst vielfältige Assoziationen aus dem Bereich der Umwelteinflüsse und Gefühle aus. Wie aber wird das Klima im wissenschaftlichen Sinn definiert und wie grenzt es sich vom Wettergeschehen ab?

Ein sonniger Tag bietet schönes Wetter, ein warmer Sommermonat ist ein „Witterungsabschnitt“, und erst die regelmäßige Beobachtung des Wetters über mehrere Jahrzehnte erlaubt uns eine Aussage über das Klima. Das Klima kann man kaum auf der Basis von persönlichen Erinnerungen bewerten. Verlassen sollte man sich nur auf Aufzeichnungen und Messdaten. Viele Charakterzüge des Klimas, etwa warm oder kalt, nass oder trocken, erkennt man aber auch an den langfristigen Wirkungen auf Fauna und Flora, an Verwitterung und den Schichten von Ablagerungen von Gestein, Pflanzenresten, Pollen und Lebewesen auf dem Grund der Gewässer und Meere. In übereinander geschichteten „Sedimentabfolgen“ kann man mit Hilfe von Mikroskopie, Physik, Chemie und Biologie zeitliche Abfolgen wie in einem Protokoll ablesen und untersuchen. Ebenso wichtig sind die Beweise von Vereisungen, Wüstenbildungen, Meeresspiegeländerungen und Überflutungen. Mit Hilfe von geologischen Indizien und physikalischen Methoden kann man inzwischen aus diesen

indirekten Beweisen das Klima vor Jahrmillionen recht zuverlässig rekonstruieren – nicht aber das Wetter der Vergangenheit.

Wenn wir über das gegenwärtige Klima urteilen wollen, sollten wir Wetteraufzeichnungen über mindestens dreißig Jahre betrachten. Diese Zeitspanne hat sich in der Klimatologie bewährt, wobei die Jahre 1961 – 1990 den Referenzzeitraum für die Diskussion des modernen Klimas bilden. Das Klima bezeichnet damit zunächst das „mittlere Wetter“ im Laufe einer Zeitspanne an einem bestimmten Ort. Die bekanntesten Messgrößen sind dabei die Temperatur und die Niederschlagsmenge. Obwohl sie für alle Diskussionen sehr wichtig sind, bleibt die Aussagekraft von Mittelwerten begrenzt. Das ist leicht zu verstehen, denn es gibt bei uns wolkenverhangene trübe Tage, an denen sich die Mittagstemperatur und die

## DER „GEFÜHLTE“ KLIMAWANDEL

*Nur sehr wenige, naturverbundene Menschen, wie Landwirte oder Förster, können persönlich kompetent auf dreißig Jahre Vegetation und Klima zurück blicken – abgesehen von den berufsmäßig damit befassten Meteorologen und Klimatologen.*

*Alle Anderen nehmen nur das Wetter wahr, insbesondere Urlaubserlebnisse, ungewöhnliche Wetterperioden (warme Winter, kühle Sommer) und die Extremereignisse (Unwetter). Die Bewertung des Klimas und der „gefühlten Klimaentwicklung“ bildet sich vor allem als individuelle oder sogar gesellschaftliche Sekundärreaktion auf die Berichterstattung in den Medien. Diese Berichte haben eine hohe emotionale Wirkung, der man sich kaum entziehen kann. Häufige Unwetter- und Katastrophenberichte mit eindrucksvollen Bildern aus aller Welt drängen den Eindruck eines heftigen Klimawandels auf, auch wenn die Datenlage eine solche Interpretation derzeit noch nicht stützt. Statt dessen sind es oft der Region unangepasste oder völlig unzulässige Bauten in gefährdeten Gebieten (steile Abhänge, tiefe Niederungen, trockene Flussläufe), die bei einem Unwetter zur Katastrophe führen (New Orleans August 2005, Istanbul September 2009).*

Nachttemperaturen kaum unterscheiden – und dann, besonders im Herbst oder Frühjahr, sehr sonnige und warme Tage mit frostkalten Nächten. An den Mittelwerten würde man das nicht mehr erkennen können. Entsprechendes gilt auch für die Beschreibung der extremen Tag-Nacht-Unterschiede in den Wüstenregionen. Offensichtlich benötigen wir auch Informationen über die Schwankungsbreite und die Extremwerte. Noch viel wichtiger wird

das bei Niederschlägen oder beim Wind, weil einmalige Überschwemmungen oder Orkane oft tiefgreifende, bleibende Schäden hinterlassen. Eine ausschließliche Diskussion von Trends und Mittelwerten kann der Bedeutung von extremen Einzelereignissen niemals gerecht werden.

Langzeit-Messdaten an einem Ort ergeben das lokale Klima. Erst in weiteren Schritten

*Abb. 3: Das lokale Klima eng benachbarter Orte kann bereits sehr unterschiedlich sein. An den geschützten Abhängen des Moseltals, besonders an den sonnigen Südlagen, herrscht ein wesentlich mildereres Klima als auf den direkt angrenzenden Ebenen von Eifel und Hunsrück. Ebenso zeigt eine kleine Wanderung aus einer in der Sommerhitze schmorenden Stadt in ein Waldgebiet mit einem beschatteten Flusslauf die Unterschiede zwischen dem Klima einer Stadtlandschaft und dem einer Wald- und Flusslandschaft. Bei derartigen Gebieten spricht man vom „Mesoklima“. Ein kleiner Geländeabschnitt (Mulde, Hang) kann durch ein spezielles „Mikroklima“ gekennzeichnet sein.*







Abb. 4: Zur Ermittlung der Höhenwetterdaten lässt man weltweit an mehr als tausend Orten mindestens zweimal täglich, um 12:00 und 24:00 Uhr, Wetterballons mit Radiosonden aufsteigen.

# DAS KLIMA ALS DIE STATISTIK DES WETTERS

kommt man durch eine räumliche Mittelung zum Klima einer Region, eines Landes, einer Klimazone und letztlich der ganzen Erde.

Für Deutschland kann niemand das Wetter für mehr als zehn Tage vorhersagen. Darüber hinaus helfen auch die größten Computer nicht weiter. Man kann zwar eine erwartete Luftströmung aus den momentanen Anfangswerten sehr zuverlässig berechnen und daraus eine kurzfristige Vorhersage erstellen. Aber je weiter die Vorhersagen in die Zukunft zielen, desto wichtiger werden bereits kleinste Unsicherheiten bei den Startbedingungen. Die Auswirkungen der Fehler in den Startwerten addieren sich, und schon ab einer Vorhersage für sieben Tage werden die Resultate unzuverlässig. Das gilt besonders für uns in Europa, wo sich polare und subtropische Strömungen treffen und chaotisch verwirbeln. Unser Wetter wird überwiegend von westlichen Winden bestimmt. Die Westwinddrift führt große Hoch- und Tiefdruckgebiete mit sich, so dass sich das Wetter in Europa häufig als launisch und wechselhaft erweist. Es zeigt sich, dass die klimarelevanten langfristigen Mittelwerte und Schwankungsbreiten viel stabileren Gesetzmäßigkeiten unterliegen als das Wettergeschehen.

Letztendlich kann man bei der Analyse des Klimas das Problem der Startwerte für die Wetterentwicklung sogar völlig vergessen.

Statt dessen betrachtet man das statistische Wetter und seine langfristigen Trends als Folge von großräumigen Rahmenbedingungen. Dazu zählen als wesentliche Klimafaktoren vor allem die Einstrahlung der Sonne, die Einflüsse von Ozeanen, Eisgebieten, Landmassen, Gebirgen und Vulkanen – und natürlich die komplizierte Rolle unserer Atmosphäre. Ganz bedeutsam sind außerdem die Biosphäre mit Pflanzen und Tieren und inzwischen auch die menschlichen Aktivitäten.

Weil viele dieser Faktoren einander „nicht-linear“, also in komplizierter Weise beeinflussen, verändert sich auch das Klima oft überraschend heftig. Bevor wir uns tiefer in dieses spannende Thema stürzen, machen wir uns sattelfest und betrachten den modernen Klimabegriff von zwei ganz verschiedenen Seiten.

An vielen Orten werden stündlich Messwerte für Temperaturen, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Sonnenstunden, Wolken und andere Beobachtungen erfasst. Aus diesen Wetterdaten erwächst ein umfassendes Bild vom Wetterablauf bis hin zur jahreszeitlichen Witterung.

Doch erst die statistische Erfassung des Wetters über viele Jahrzehnte erlaubt es, das Klima glaubwürdig und zuverlässig zu beschreiben und die Langzeit-Veränderungen („Trends“) zu erkennen.

Statistiken sind uns nicht unvertraut. Fast jeden Sonntag gewinnen einige (wenige) Spieler

im Lotto einen Hauptgewinn, obwohl Millionen Tipps abgegeben werden. Weil die „Lottomaschinen“ so einfach aufgebaut sind, ist die Statistik der Ergebnisse ebenfalls einfach. Die Statistik der Autounfälle ist schon viel schwieriger zu durchleuchten. Im Jahr 2008 gab es bei rund 2,3 Millionen Verkehrsunfällen 4467 Todesopfer. Die Zahl der Todesopfer ist bisher Jahr für Jahr gesunken. Das alles ist statistisch bewiesen und einprägsam, bleibt aber gefühlsmäßig unerklärlich, wenn man die zahlreichen voneinander unabhängigen Einzelereignisse betrachtet: Ist es nicht erstaunlich, dass die Zahl der Todesopfer von Jahr zu Jahr nur relativ gering schwankt, obwohl es doch mehrere Millionen Unfälle gibt?

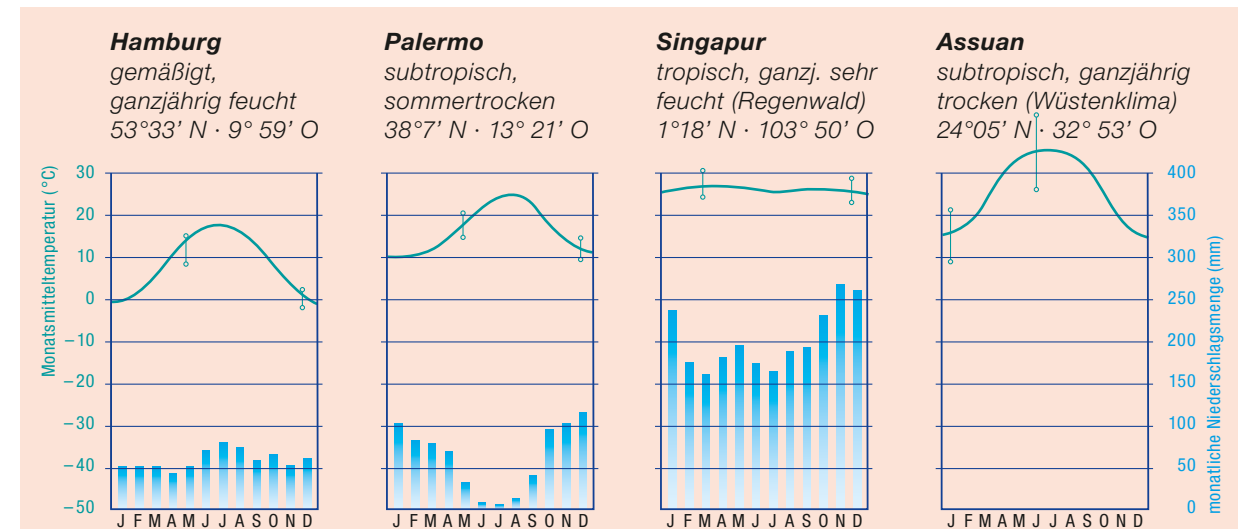


Abb. 5: Typische Klimadiagramme, wobei jeweils die oberen Kurven den Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur und die Säulen den Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen charakterisieren; weiterhin weisen die vertikalen Balken auf die maximale bzw. minimale Temperatur-Tagesamplitude hin (Ref. 1).

Um die zukünftigen Schäden mildern zu können, muss eine statistische Analyse erarbeitet werden. Dazu erforscht man das Zusammenwirken der unterschiedlichen Unfallursachen („Triebkräfte“). Beispielsweise wird die Zahl der Verkehrstoten weiter sinken, wenn die Sicherheit der Fahrzeuge und der Straßen und die Ausbildung der Fahrer verbessert wird. Hinzu kommen die Einflüsse von Wetter und Geschwindigkeit, vielleicht auch Übermüdung, Übermut oder Alkohol. Immer aber werden Ort und Zeit des nächsten Unfalls unvorhersehbar bleiben. Erst eine ausreichend langfristige Statistik kann zeigen, ob neue Maßnahmen auch erfolgreich waren. Ähnliche Vorgehensweisen sind uns auch von der Überprüfung der Wirksamkeit neuer Medikamente oder der Risikoanalyse vertraut: Rauchen verursacht mit gewisser Wahrscheinlichkeit Lungenkrebs. Immer gilt es, in einem komplizierten Wechselspiel den Einfluss einzelner Faktoren nachzuweisen.

Wir können diese Vorgehensweise direkt auf das Wetter und das daraus resultierende Klima übertragen. Eine statistische Analyse von vielen, über lange Jahre gesammelten Daten bietet ein zuverlässiges mathematisches Verfahren, um zufällige Schwankungen von langjährigen Veränderungen zu trennen. Auf diese Weise kommt man zu belastbaren Klimadaten.

Vor allem möchte man auch beim Klima die unterschiedlichen Triebkräfte („Antriebe“) erkennen: Wie groß ist der Einfluss von Sonne, Vulkanen, Treibhausgasen, Staub und Aerosolen auf die Temperatur der Atmosphäre? Wenn man Datensätze für die Temperatur und zuverlässige Messdaten für alle in Frage kommenden Antriebe zur Verfügung hat, kann man die jeweiligen Einflüsse statistisch analysieren. So kommt man zu den statistischen Modellen, die bereits natürliche und anthropogene Klima-Antriebe zu trennen vermögen (Abb. 49, S. 131).

Inzwischen geht die klimatologische Forschung noch einen großen Schritt weiter. Mit Hilfe der umfassenden physikalischen Klimamodelle werden nur noch die Prozesse betrachtet, die zur Entwicklung und Veränderung des Klimas unter dem Einfluss der Antriebe führen (S. 138). Weil diese Modelle die Physik und die Struktur von Erdoberfläche, Ozeanen und Atmosphäre im Detail mathematisch nachbilden (simulieren), sind sie unvergleichlich aufwendiger als eine statistische Analyse. Sie ermöglichen derzeit die besten Einsichten in die Einzelprozesse des Klimageschens. Es wäre völlig falsch, wegen der vielen Zufälle im launischen Wettergeschehen zu vermuten, dass auch jede Klimaentwicklung grundsätzlich unvorhersehbar bleiben muss.

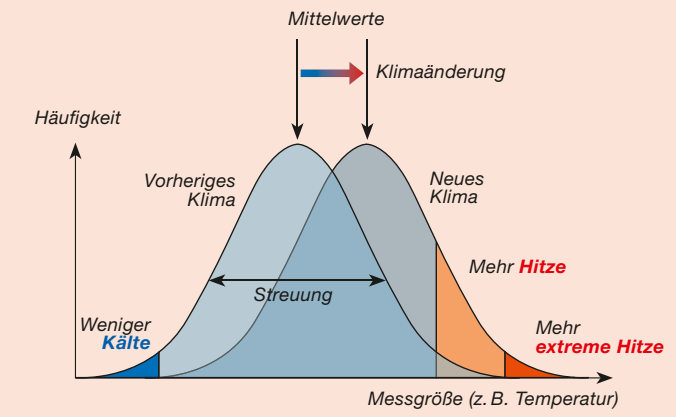
### KLIMA ODER WETTER?

Wenn man das Wechselspiel der vielen Kaltzeiten und Warmzeiten unseres gegenwärtigen Eiszeitalters betrachtet, so findet man nur mittlere Temperaturunterschiede von 4 bis 5 °C.

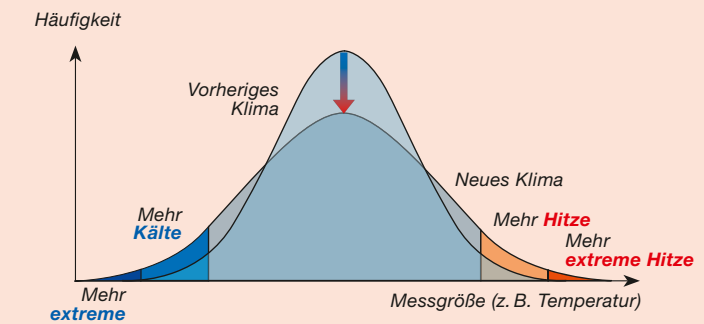
Für das Wetter erscheinen uns 5 °C eher unbedeutend, aber als Klimaunterschied für Jahrtausende bedeutet ein „kleiner Temperatursturz“ um nur 5 °C eine völlig andere Welt: An Stelle unserer vertrauten Umgebung müssten wir erwarten, dass sich Nordeuropa und Nordamerika allmählich wieder mit kilometerdicken Eispansern bedecken und dass die derzeit schwind-süchtigen Alpenglätser wieder mit Macht bis „vor die Tore Münchens“ anwachsen.

## DIE GRAFISCHE DARSTELLUNG DES KLIMAS

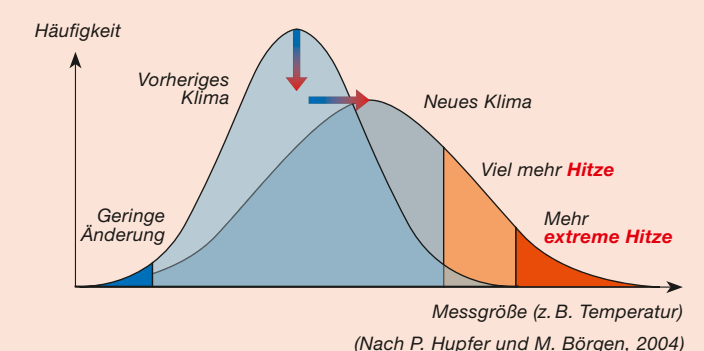
### 6a) Zunahme des Mittelwerts



### 6b) Zunahme der Streuung



### 6c) Zunahme von Mittelwert und Streuung



(Nach P. Hupfer und M. Börgen, 2004)

Abb. 6: Typische Darstellungen zeigen die Häufigkeit von Tagesmitteltemperaturen oder Niederschlagswerten an einer festen Station, beispielsweise während der Sommermonate Juni, Juli, August (JJA). Wenn die gesammelten Wetterdaten einen ausreichend langen Zeitraum umfassen, kann man die einhüllende Kurve als eine anschauliche graphische Darstellung des Klimas auffassen. Dabei können sich die Ausläufer der Kurve als besonders wichtig heraus stellen, denn sie beschreiben die extremen Wetterlagen, beispielsweise besonders heiße oder ungewöhnlich kalte Tage.

Eine wichtige Messgröße ist die bodennahe Lufttemperatur. Eine langfristige Erwärmung würde sich dann in einer Verschiebung der Verteilungskurve zu erkennen geben, wie im Beispiel 6a gezeigt. Einen Klimawandel ohne Erwärmungstrend, aber mit einer deutlichen Tendenz zu größeren Schwankungen, erkennt man im Beispiel 6b. Hier sind mehr extreme Wetterlagen zu beobachten, die Streuung der gemessenen Wetterdaten hat zugenommen. In diesem Fall gibt es mehr sehr kalte, aber auch mehr sehr heiße Tage.

Für Europa vermutet man eine zukünftige Entwicklung, wie sie in Abb. 6c gezeigt ist. Dem Erwärmungstrend überlagert, wird eine Zunahme der Streuung erwartet, eine größere klimatische Variabilität. Dabei wird im Bereich der kalten Tage nur wenig Änderung zu verzeichnen sein, aber bei den warmen und heißen Tagen wird es vermutlich eine deutliche Zunahme geben.

Man kann die monatlichen Daten einer Station für Temperatur, Niederschlag oder Wind zu jahreszeitlichen Daten (Winter, Sommer) oder zum sehr wichtigen Jahresmittelwert zusammen fassen. Im nächsten Schritt kann man aus den Daten mehrerer Stationen regionale Mittelwerte bilden. Letztendlich führen die weltweit erfassten Daten sehr vieler Stationen zu den viel diskutierten und wichtigen globalen Mittelwerten, insbesondere der mittleren globalen Jahrestemperatur.

Wie wir auch auf Seite 128 sehen werden, können sich die Trends des lokalen oder regionalen Klimas drastisch vom globalen Trend unterscheiden.



# DAS KLIMA ALS RESULTAT DER TRIEBKRÄFTE DER ATMOSPÄRE

Wir wissen inzwischen, dass man das Wettergeschehen langfristig statistisch erfassen muss, um das Klima zuverlässig zu beschreiben. Dann aber, in einem wesentlich schwierigeren Schritt, möchte man das Klima erforschen und verstehen:

- Welche Ursachen und Wirkungen hat das Geschehen, das das Klima bestimmt?
- Wie groß ist der Einfluss der dabei wirksamen unterschiedlichen Triebkräfte?

Dabei geht es um die Physik der Atmosphäre und die sich im Tages- und Jahresgang ändernde Einstrahlung von der Sonne sowie die Abstrahlung von der Erde ins All. Dazu kommen die wechselseitigen Beeinflussungen von Luft, Wolken und Niederschlägen, Landmassen und Ozeanen mit ihren Pflanzen und Tieren und schließlich der weiten Eisgebiete. Es gibt auch unvorhersehbare Ereignisse mit großem Einfluss, wie Vulkanexplosionen, und obendrein die ständigen menschlichen Aktivitäten wie Waldrodungen, Landwirtschaft, Städtebau, Wasserbau und vieles mehr.

Schon 1863 berichtete John Tyndall über seine Experimente, die eine herausragende Bedeutung von CO<sub>2</sub> und Wasserdampf für den Treibhauseffekt der Atmosphäre zeigten. Svante Arrhenius hat 1896 abgeschätzt, dass der natürliche Treibhauseffekt der Erde etwa 30 °C ausmacht und so für eine mittlere Temperatur von +15 °C sorgt. Er betrachtete

die damals stark anwachsende Verbrennung der Kohle und kam zu dem Ergebnis, dass eine Verdopplung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre die mittlere Temperatur um 4 °C ansteigen lassen wird. Sein Resultat wird durch die modernen Klimamodelle erstaunlich gut bestätigt. Vor hundert Jahren hätte die Wissenschaft allerdings vor der Aufstellung und Auswertung eines dieser modernen Klimamodelle kapituliert: Viel zu kompliziert! Dabei sind nicht die grundsätzlichen Beziehungen und Gleichungen übermäßig kompliziert. Vielmehr erfordert die Vielzahl der benötigten Daten und der zahlreichen Wechselwirkungen so viel Rechenaufwand, dass an eine Bewältigung mit den damaligen Möglichkeiten nicht zu denken war. Dennoch sind den Wissenschaftlern schon seit etwa hundert Jahren viele Einzelheiten der Vorgänge bei der Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche sehr gut bekannt.

Unvorhersehbar war damals allerdings die rasante weitere Entwicklung der Menschheit, ihrer Mobilität zu Lande und in der Luft und ihres Energiebedarfs: Um 1800 hatte die Weltbevölkerung die erste Milliarde erreicht. Hundert Jahre später, um 1900, lebten etwa 1,9 Milliarden Menschen auf der Erde. Das war in etwa eine Verdopplung. Heute sind es fast sieben Milliarden – mehr als dreimal so viel innerhalb eines Jahrhunderts. Die hohen Emissionen aus der Verbrennung der fossilen

Energieträger haben die Strahlungsbilanz der Atmosphäre seitdem bereits deutlich messbar verändert – und zwar noch viel mehr als damals erwartet, denn zur unerwartet heftig ansteigenden Kohleverbrennung addieren sich inzwischen auch noch sehr große Beiträge vom Erdöl und geringere vom Erdgas.

Heute kommen die Fortschritte in der Computertechnik und in den Klimawissenschaften gerade zur rechten Zeit, um das drängende Problem dieser Emissionen und ihren Einfluss auf das Weltklima mit Hilfe statistischer Analysen und der globalen physikalischen Klimamodelle (S. 141) anzugehen.

Die Physik der Atmosphäre bildet die Basis für die großen Klimamodelle, mit deren Hilfe die Entwicklung des Erdklimas in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft studiert werden kann.

In ihren Grundzügen ist die Atmosphärenphysik nicht schwer zu verstehen. Weil sie uns unmittelbar im Wettergeschehen oder bei der Wetterkarte im Fernsehen begegnet, bietet sie nebenbei auch zahlreiche für den Alltag nützliche Erkenntnisse. Deshalb widmen wir die nächsten beiden Kapitel diesem wichtigen und stets aktuellen Thema.

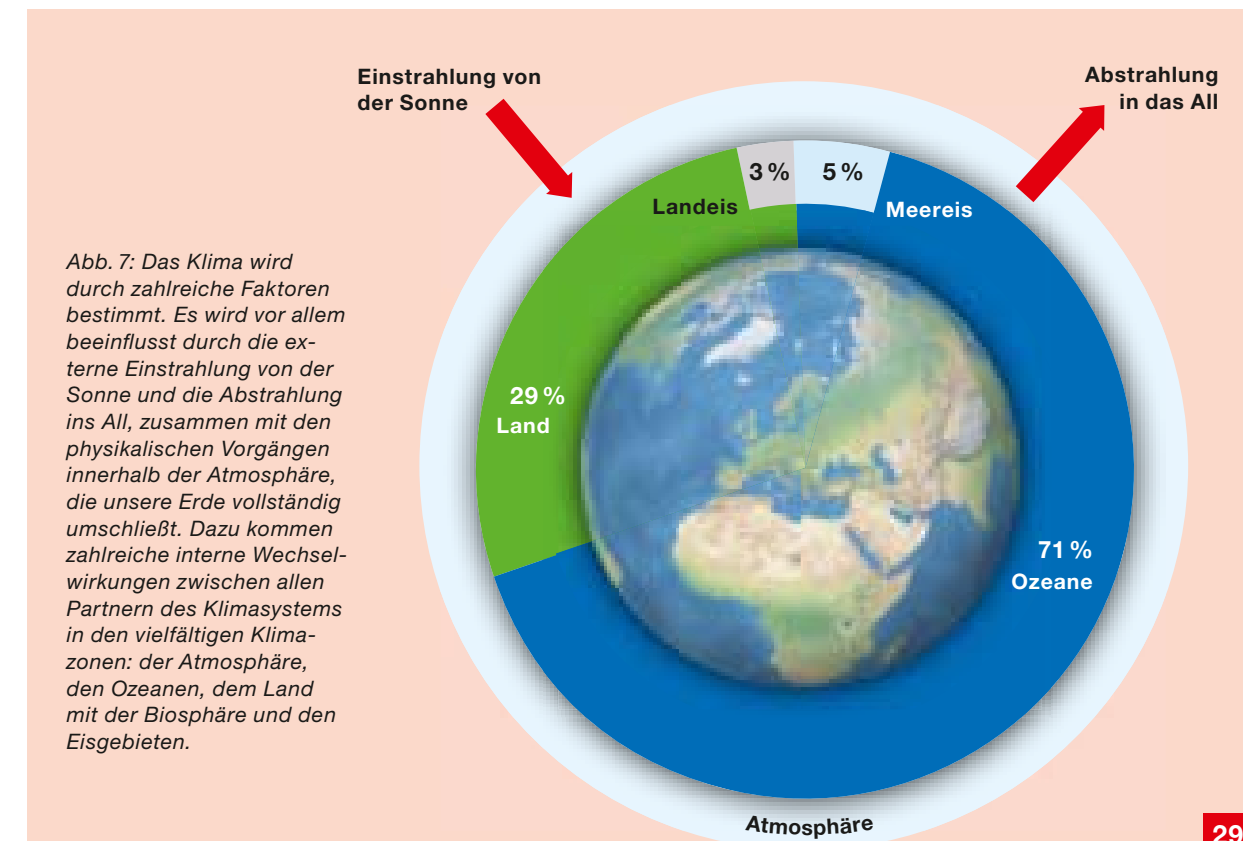


Abb. 7: Das Klima wird durch zahlreiche Faktoren bestimmt. Es wird vor allem beeinflusst durch die externe Einstrahlung von der Sonne und die Abstrahlung ins All, zusammen mit den physikalischen Vorgängen innerhalb der Atmosphäre, die unsere Erde vollständig umschließt. Dazu kommen zahlreiche interne Wechselwirkungen zwischen allen Partnern des Klimasystems in den vielfältigen Klimazonen: der Atmosphäre, den Ozeanen, dem Land mit der Biosphäre und den Eisgebieten.

# DIE PHYSIK DER ATMOSPHÄRE



2.1 WÄRME SETZT ALLES IN BEWEGUNG .....	32
2.2 DER PLANET DER MEERE .....	34
2.3 UNSERE HÖCHST ERSTAUNLICHE ATMOSPHÄRE .....	40
WARMER ERDBODEN, KALTE LUFT, LABILITÄT .....	42
MIT ZUNEHMENDER HÖHE SINKT DER LUFTDRUCK .....	42
NUR GASE LASSEN SICH LEICHT KOMPRIMIEREN .....	44
IN DER HÖHE WIRD DIE LUFT IM ALLGEMEINEN KÄLTER .....	44
WASSER IST WAHRHAFT WANDLUNGSFÄHIG .....	49
WASSERDAMPF – DER UNSICHTBARE ENERGIESPEICHER .....	50
NUR AM ÄQUATOR WEHT DER WIND ORDENTLICH GERADEAUS .....	52
CORIOLIS – DER WIND FÄHRT KARUSSELL .....	55
TODBRINGENDE WIRBEL .....	57
NIEDERSCHLÄGE .....	61
UNSER WECHSELHAFTES WEST-WIND-WETTER .....	62
2.4 WIR GEWINNEN DEN ÜBERBLICK: DIE KLIMAZONEN DER ERDE .....	64

# WÄRME SETZT ALLES IN BEWEGUNG

Um unser Verständnis des Klimas als Ergebnis des langfristigen Wettergeschehens auf eine breite Basis zu stellen, betrachten wir zuerst die wichtigsten Antriebskräfte des „Wettermotors“ und seine erstaunliche Funktionsweise. Eines sollte uns vorab „sonnenklar“ sein: Die treibende Kraft des Wetters ist die Sonne, die mit ihrer Einstrahlung das Land, die Ozeane und die Atmosphäre erwärmt. Aber wie entsteht aus der ziemlich konstanten Abstrahlung der Sonne das komplexe Muster von Wind, Wolken und Regen, von Wetter

und Klima? Wie verwandelt sich zum Beispiel die Wärmeenergie der Sonnenstrahlung in mechanische Windenergie?

Wenn der Wettergott freundlich gesonnen ist und keine dichte Wolkendecke stört, kann der überwiegende Anteil der Strahlung von der Sonne direkt die Oberfläche von Land und Meeren erreichen. Dabei trifft die Sonne in den polaren Gebieten nur unter einem flachem Winkel auf die Erdoberfläche, und die Einstrahlung pro Quadratmeter ist dort viel

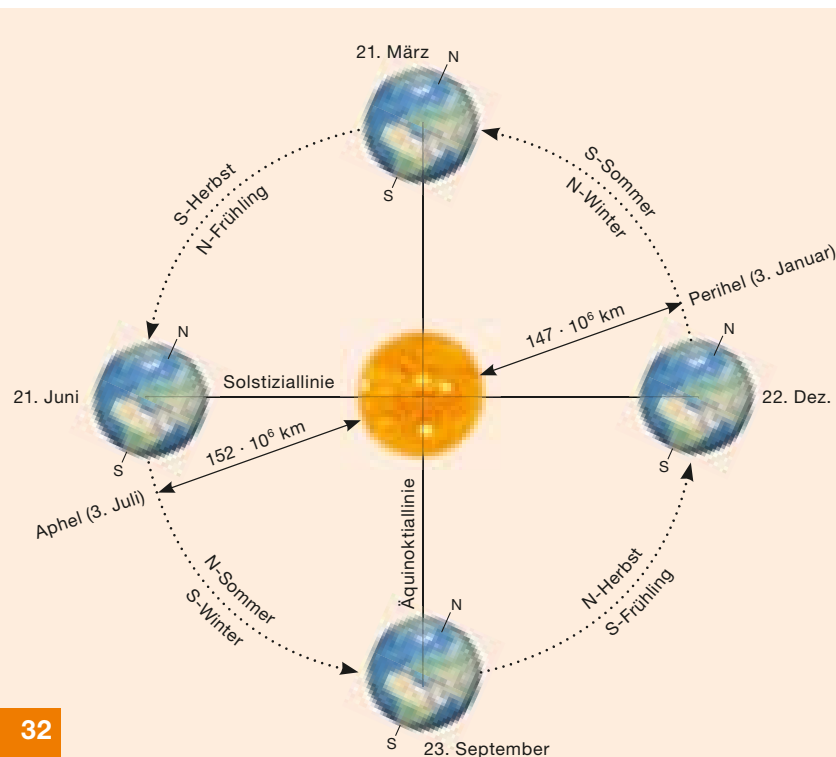
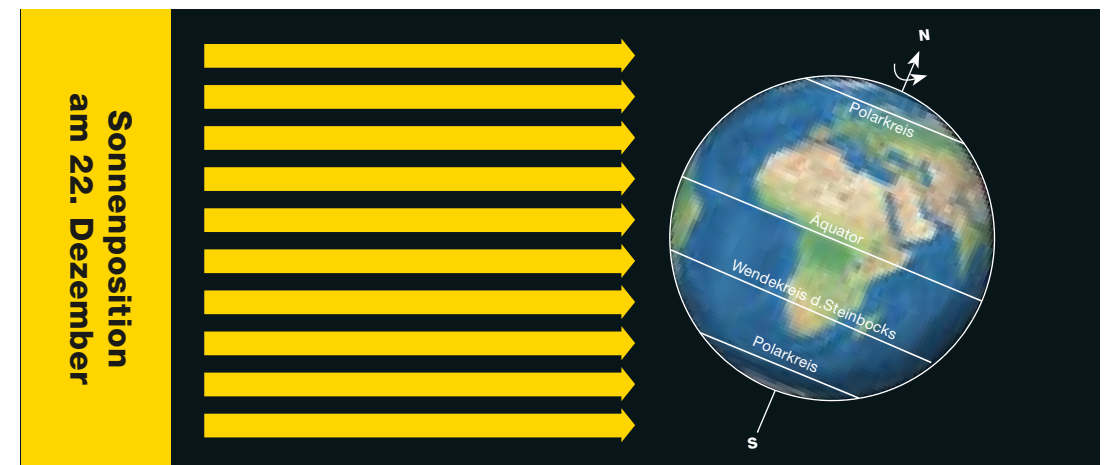


Abb. 8: Der Umlauf der Erde um die Sonne auf ihrer elliptischen, nahezu kreisförmigen Bahn. Der Erdbstand ändert sich im Laufe eines Jahres um maximal 3,3%. Das ist der Unterschied zwischen Perihel- und Aphel-Position. Entsprechend variiert die Leistung der Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche im Jahreslauf nur um 6,7% (nach Ref. 1).



Sonnenposition am 21. Juni



Sonnenposition am 22. Dezember

Abb. 9: Die Neigung der Erdachse ist für den Klimawechsel zwischen Sommer und Winter verantwortlich. Größere Kippwinkel ergeben ausgeprägtere Jahreszeiten, also kältere Winter und wärmere Sommer. Der Kippwinkel beträgt derzeit 23,44°. Im Lauf von 41000 Jahren schwankt er zwischen 22° und 24,3° (Bezugsachse ist die Senkrechte auf der Umlaufebene um die Sonne).

geringer als im Äquatorgebiet, wo die Sonne nahezu senkrecht am Himmel steht. Das führt zu den großen Temperaturunterschieden zwischen den kalten Polarregionen und dem heißen Äquatorialgebiet. Diese Temperaturunterschiede treiben die globalen Luft- und Meeresströmungen an. Die großräumigen Strömungen („Zirkulationen“) der Ozeane und der Atmosphäre transportieren auf diese Weise viel Wärmeenergie von den warmen Tropen in kältere Zonen, bis hin zu den beiden „Kühlkörpern“ Südpol und Nordpol.

Weil die Meeresströmungen schon über Jahrhunderte relativ stabil sind und das Wasser mit seiner hohen Wärmekapazität gegenüber allen Temperaturschwankungen sehr ausgleichend wirkt, ist das Verhalten der Meere durch eine viel größere Stetigkeit gekennzeichnet als die oft sehr turbulente und wechselhafte Atmosphäre. Deshalb betrachten wir zuerst die ruhigeren Ozeane.

# DER PLANET DER MEERE

Wenn wir die Chance hätten, in einer Super-Tauchkapsel in die Tiefe der Meere abzutau- chen, so würden wir nach einigen Metern bereits die einsetzende Dunkelheit, dazu einen ständigen Druckanstieg und eine sin- kende Temperatur bemerken. Während es ab- wärts geht, steigt der Wasserdruck alle 10 m ziemlich genau um 1 bar an. Wasser lässt sich praktisch nicht zusammendrücken, ist inkompressibel. Deshalb wiegt ein Liter Was- ser konstant ungefähr 1 kg. Der Druckanstieg wird sich deshalb stetig bis in die Tiefsee fortsetzen. Die tiefstmögliche Stelle wäre im Marianengraben mit 10900 m erreicht. Das ist tiefer als die höchsten Gebirge aufragen. Dort verbiegt sich der Ozeanboden des Pazifik be- sonders weit nach unten, weil er von gewal- tigen Kräften aus dem Erdinneren allmählich unter die riesige Eurasische Festlandsplatte geschoben wird (Abb. 11). Dieser Prozess wird von häufigen Erd- und Seebeben beglei- tet und ist tatsächlich sogar für das Klima der Erde von großer Bedeutung (S. 92).

Auf der Erde gibt es so viel Wasser, dass die Meere 71 % der Oberfläche bedecken und im Durchschnitt mit 3800 m auch deutlich tiefer sind als die mittlere Höhe des Festlandes (Mittelwert: 685 m über dem Meeresspiegel). Der Ozeanboden ist im allgemeinen nur für unbemannte Roboter erreichbar, denn die maximale Tauchtiefe von großen U-Booten beträgt nur etwa 400 m. Wenn wir die Technik mit der Natur vergleichen, dann scheint es un- glaublich, dass in diesen kalten und dunklen Tiefen Luft atmende Säugetiere bei der Jagd

auf Riesenkraken unterwegs sind. Pottwale tauchen bis zu 3000 m tief. Der Druck dort unten ist 300 mal höher als an der Meeres- oberfläche, die sie erst nach Ablauf einer Stunde wieder aufsuchen müssen, um frische Atemluft zu schöpfen. Trotz aller Technik scheinen wir Menschen vom Boden der Oze- ane immer noch fast so weit getrennt zu sein wie von der Oberfläche des Mondes.

Bei unseren Tauchgängen würden wir fest- stellen, dass maximal die oberen 200 m der Ozeane durch Wind und Wellen durchmischt werden. Nur diese Wasserschicht ist mit der Atmosphäre in regem Luft- und Wärmeaus- tausch. Die mittlere Wassertemperatur an der sonnenbeschienenen Oberfläche in Äquat- ornähe beträgt 30 °C. Unterhalb der schmalen Durchmischungszone werden auch die tropischen Meere rapide kälter. Das tiefe Wasser der Ozeane ist sogar sehr kalt, mehr als 80 % der Wassermassen sind kälter als 5 °C. Mit zunehmender Tauchtiefe kann die Temperatur sogar noch weiter fallen. Dies Verhalten ist anders als das von Süßwasser, das bei 4 °C ein Dichtemaximum hat. Statt dessen nimmt die Dichte des Meerwassers weiter zu, wenn die Temperatur unter 4 °C fällt. Das Dichtema- ximum wird erst am Gefrierpunkt erreicht, der bei Meerwasser wegen des Salzgehaltes etwa bei -2 °C liegt.

Die Wärmeausdehnung des Wassers ist gering und macht nur wenige Prozent aus, führt aber zu einer relativ stabilen Schichtung, wenn wärmeres Wasser über dichterem und

## EIN GRÖSSENVERGLEICH

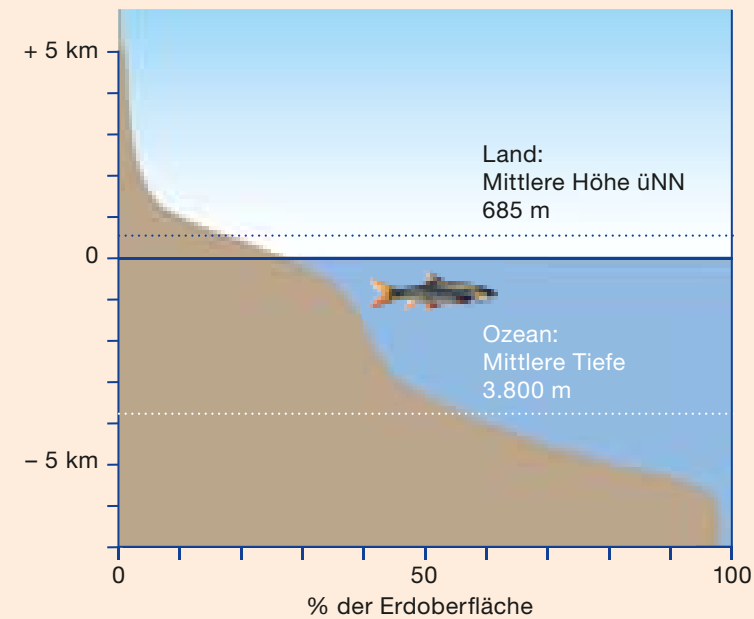


Abbildung 10 zeigt einen quantita- tiven schematischen Querschnitt durch Land und Meere der Gegen- wart. Etwa 71 % der Erdoberfläche sind mit Ozeanen bedeckt, deren Tiefe im Durchschnitt 3800 m beträgt. Die Landflächen liegen im Mittel 685 m über dem Mee- resspiegel, wobei die höchsten Berge wesentlich weniger in die Höhe ragen als die Meere an ihren tiefsten Stellen erreichen. Die Ver- teilung von Land und Wasser hat sich im Laufe der Erdgeschichte immer wieder deutlich verändert. Beispielsweise war die Kreidezeit durch viele zusätzliche warme Flachmeere gekennzeichnet (vgl. S. 98, nach Ref. 10).

kälterem Wasser liegt. Deshalb bleibt die ther- mische Schichtung eines Ozeans in weiten Bereichen stabil, während die Temperatur mit zunehmender Tiefe immer weiter sinkt. Rein theoretisch könnte ein flaches Meer sogar von oben bis zum Grund durchfrieren. Davon kann wegen der Sonneneinstrahlung, der Wärme- kapazität des Wassers und der Meeresströ- mungen selbst im Nordpolarmeer keine Rede sein. Die winterliche Eisdecke im Nordpolar- meer wird nur einige Meter dick, während das Wasser darunter bis zu 4000 m tief ist.

Wenn Meerwasser überfriert, bilden sich Eisschollen, die übrigens wegen des Salzes wesentlich brüchiger sind als entsprechendes Süßwassereis. Weil das Eis die Oberfläche des Meeres thermisch isoliert, verlangsamt eine Eisdecke die weitere Abkühlung. Bei der

Eisbildung wird das gelöste Meersalz nicht vollständig, sondern nur zu 30 % in Salzlau- gentaschen zwischen den Eiskristallen einge- baut. Die überwiegende Salzmenge verbleibt in der flüssigen Phase. Deshalb ist Meereis relativ salzarm, und das unterliegende Wasser wird mit Salz angereichert. Interessanter- weise befindet sich das Oberflächenwasser unter dem Meereis nahe dem Gefrierpunkt von etwa -2 °C, während die Temperatur mit der Tiefe leicht zunimmt. In diesen Regionen stabilisiert der nach unten zunehmende Salz- gehalt die Dichteschichtung. Die Eisbildung im Nordpolarmeer spielt eine gewisse Rolle bei der Salzanreicherung im Nordatlantik. Viel bedeutender jedoch ist der Beitrag der Verdunstung über warmem Wasser. Weil nur das Wasser verdunstet, nicht aber das Salz, steigt die Konzentration des gelösten Salzes.



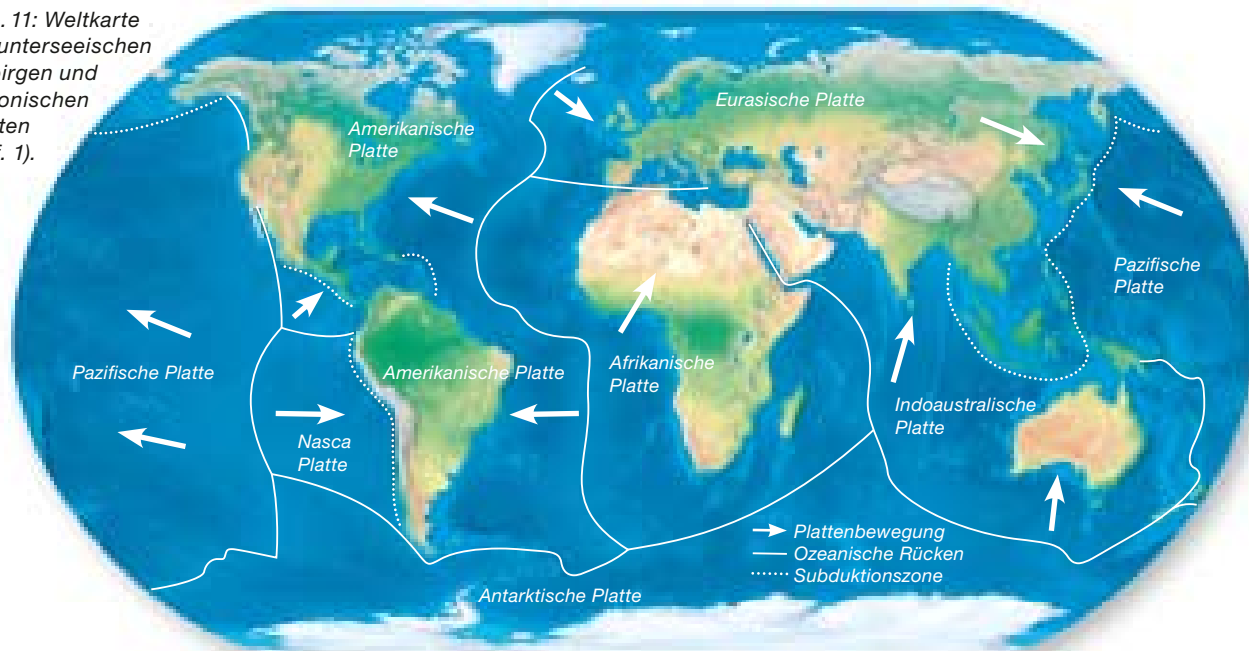
Der Einfluss des Salzgehaltes auf die Dichte von Meerwasser ist oft größer als der der Wassertemperatur. Wenn sich salzreiches Wasser nicht ausreichend schnell mit den umgebenden Wassermassen durchmischen kann, sinken die salzreichen Wassermassen unter die salzärmeren ab. Ein erstaunliches Beispiele findet sich in der Straße von Gibraltar. Durch die hohe Verdunstung im Mittelmeerraum strömen etwa 1 Million m<sup>3</sup> pro Sekunde sehr salzhaltiges Wasser als Tiefenstrom durch die Meerenge von Gibraltar in den Atlantik, während darüber in umgekehrter Richtung kühleres Oberflächenwasser aus dem Atlantik ins Mittelmeer eindringt.

Besonders wichtig für das Klima in Europa ist der Nordatlantikstrom. Der aus der Karibik kommende warme nordatlantische Zweig des Golfstroms, der Nordatlantikstrom, wird auf seiner Reise zunehmend salzhaltiger, weil

ständig Wasser von der Oberfläche verdunstet. Wenn er dann durch polare Kaltluft zusätzlich abgekühlt wird, erreicht das Wasser eine Dichte von bis zu 1028 kg/m<sup>3</sup>. Das kalte, salzhaltige Wasser sinkt in einem riesigen „Wasserfall“ innerhalb des Nordatlantik hinunter in die Tiefsee. Die Tiefenwasserbildung trägt entscheidend zum Antrieb des Nordatlantikstroms bei. Man vermutet, dass sie vor ca. 13 000 Jahren unterbrochen wurde, weil gewaltige Schmelzwassermengen plötzlich aus Kanada einströmten und den Salzgehalt verringerten. Das könnte zum Aussetzen des Nordatlantikstroms und zu einem Kälteschock für Nordeuropa geführt haben.

Zur Veranschaulichung der Tatsache, dass eine geringe Dichteänderung des Wassers in diesem Fall enorme Konsequenzen hat, schätzen wir in einer einfachen Modellvorstellung die gewaltigen Kräfte ab, die zum

Abb. 11: Weltkarte mit unterseeischen Gebirgen und tektonischen Platten (Ref. 1).



### SALZREICHES WASSER IST SCHWERER

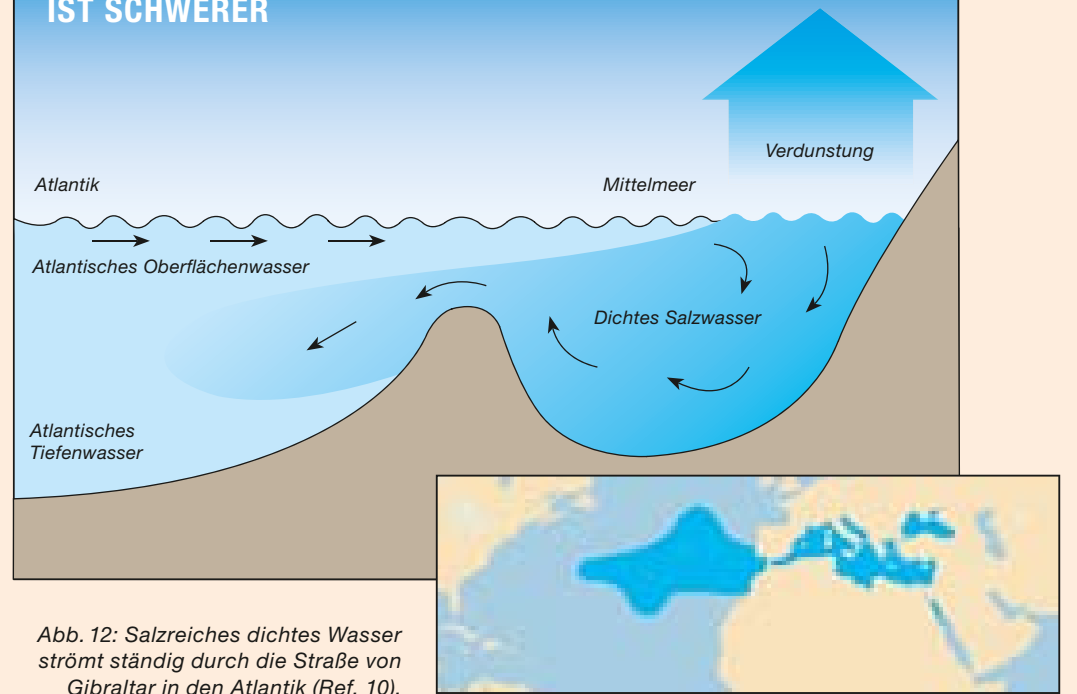


Abb. 12: Salzreiches dichtes Wasser strömt ständig durch die Straße von Gibraltar in den Atlantik (Ref. 10).

Absinken des dichteren Wassers führen. Die durchschnittliche Dichte von Seewasser an der Oberfläche beträgt 1025 kg/m<sup>3</sup> bei einem Salzgehalt von 35 ‰ („35 Promille“, d.h. 35 Gramm Salz sind in 1kg Wasser gelöst). Der Dichteunterschied zu 1028 kg/m<sup>3</sup> beträgt damit nur 3 kg/m<sup>3</sup>. Das dichtere Wasser sinkt bis in eine Tiefe von mindestens 2000 m, wo es sich in einer tiefen Strömung wieder nach Süden bewegt. Im Absinkbereich befindet sich also eine ausgedehnte „Wassersäule“ mit einem Querschnitt von Hunderten von Quadratkilometern, deren Wasser pro Kubikmeter um bis zu 3 kg schwerer ist als die umgebende Wassermasse und das deshalb nach unten strömt. Dieser Effekt bildet ein physikalisches Spiegelbild zur Auftriebskraft heißer Luft, die bei Ballons ausgenutzt wird.

Nach unserem „Tauchgang in die Tiefsee“ fassen wir zusammen:

Sinkende Temperatur erhöht die Dichte des Salzwassers. Das gilt bis zum Gefrierpunkt bei -2 °C. Die Verdunstung erhöht den Salzgehalt, was die Dichte oft entscheidend erhöht. Dagegen senkt die Einleitung von Süßwasser aus Flüssen und Gletschern die Dichte. Diese so genannten thermohalinen Triebkräfte, Wärme, Salz und resultierende Wasserdichte, sind wesentlich für den Antrieb der Meeresströmungen in den überwiegend stabil geschichteten Ozeanen. Nur an den Rändern der großräumigen Strömungsfelder bilden sich weitreichende Verwirbelungen, die auch für das allmähliche Anwärmen tieferer Wasserschichten verantwortlich sein können.

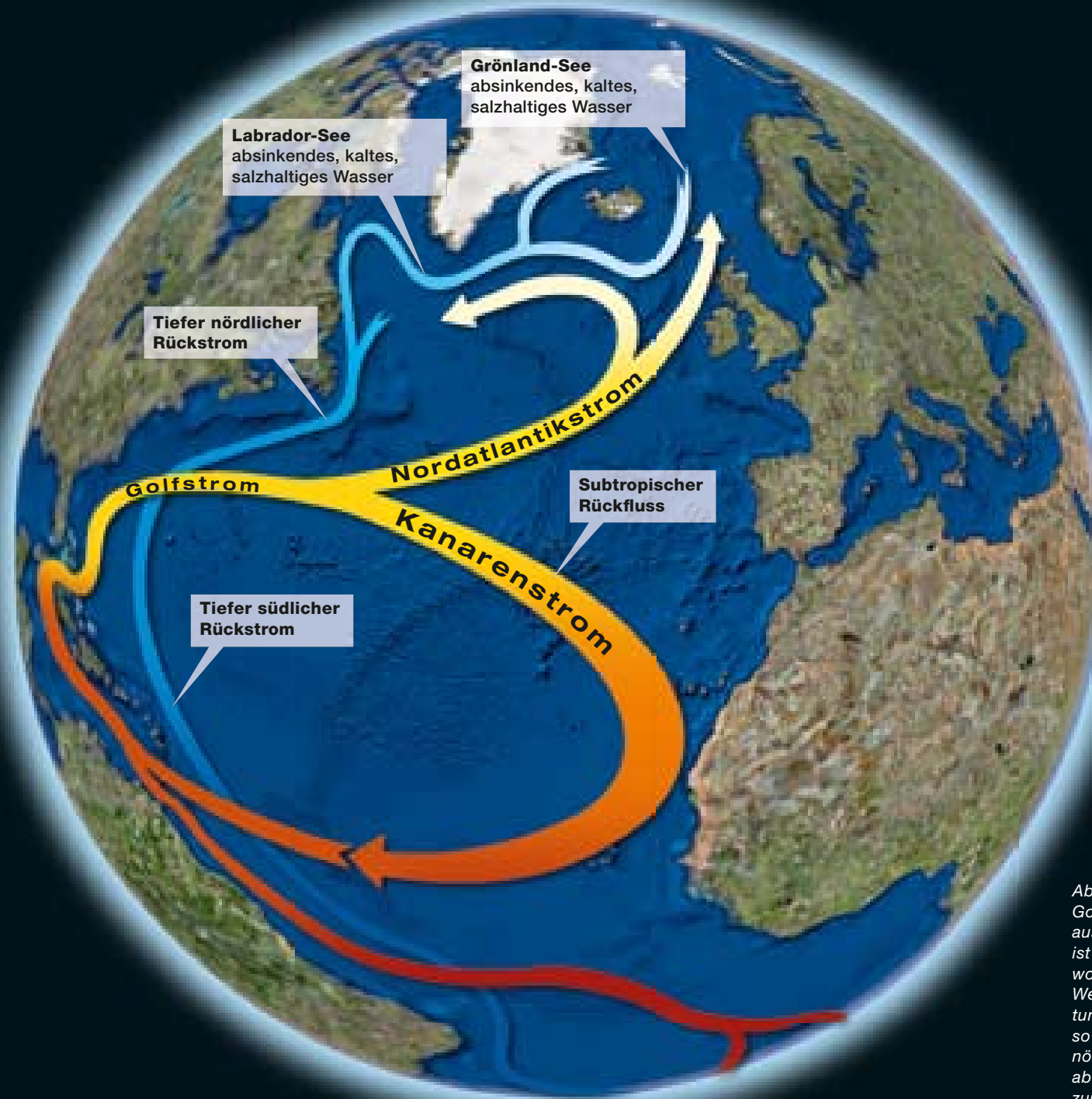


Abb. 13: Der nördliche Zweig des Golfstroms bringt warmes Wasser aus der Karibik nach Europa und ist für unser mildes Klima verantwortlich. Das Wasser wird auf dem Weg nach Norden durch Verdunstung stetig salzhaltiger und kühler, so dass seine Dichte zunimmt. In nördlichen Breiten sinkt es deshalb ab und strömt in der Tiefe zurück zur Südhalbkugel.

Zusätzlich wirken die Winde auf die oberflächennahen Strömungen ein. Ein interessantes Beispiel wird auf Seite 132 erläutert. Wie gewaltig die Windeffekte sein können, zeigen die Sturmfluten, die an den Küsten ein Ansteigen des Meeresspiegels um viele Meter bewirken.

Bravo – das war nicht einfach, aber nun haben wir eine der riesigen Wärmekraftmaschinen unseres Klimas verstanden: Wärme treibt das Wasser an, denn sie erzeugt über Temperatur und Salzgehalt geringe Dichteunterschiede, die über resultierende Druckunterschiede dann zu sehr großräumigen und kraftvollen Meeresströmungen führen.

Die Meeresströmungen transportieren Wärme zwar nur im Fußgängertempo, aber dennoch genauso wirksam wie die viel schnelleren Luftströmungen, denn Wasser hat eine sehr hohe Wärmekapazität. Der Wärmetransport des Golfstroms entspricht einer Heizleistung von über  $10^{15}$  W (Ref. 2). Wenn man die Wärmekapazitäten von Wasser und trockener Luft vergleicht, so weist eine Wasserschicht von 2,4 m Dicke genau dieselbe Wärmekapazität auf wie die gesamte Atmosphäre darüber.

Der „Klimamotor“ des Ozeans läuft recht gleichmäßig und stetig durch alle Jahreszeiten. Der überwiegende Teil der gewaltigen Masse des Meerwassers wird nicht beeinflusst vom Wetter, ja nicht einmal von den Jahreszeiten. Nur an der Oberfläche sind uns die Meere vertraut, dort aber viel unruhiger, denn sie werden von Stürmen aufgewühlt. Die Wellen können dabei höher als 10 m werden. Und dafür ist allein unsere Atmosphäre mit ihrem oft höchst erstaunlichen Verhalten verantwortlich.

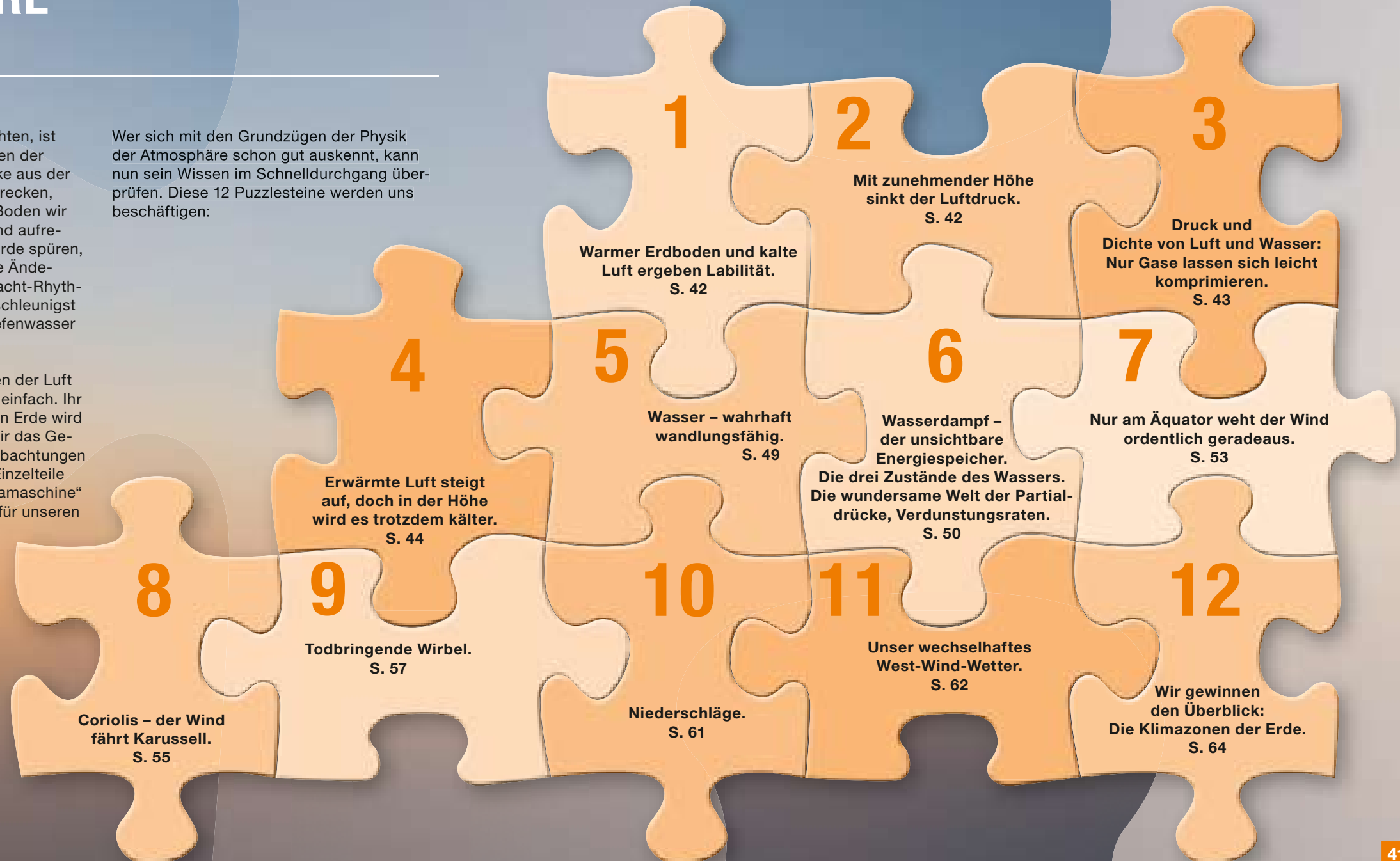


# UNSERE HÖCHST ERSTAUNLICHE ATMOSPÄRE

Nahezu alles, was wir nun beobachten, ist dramatisch anders als das Verhalten der Meere. Käme eine intelligente Krake aus der Tiefsee herauf, so würde sie erschrecken, denn der „Luftozean“, an dessen Boden wir leben, ist ungleich komplizierter und aufregender als ihr Reich. Die Krake würde spüren, wie schnell die Atmosphäre auf die Änderungen der Einstrahlung im Tag-Nacht-Rhythmus reagiert und sich vermutlich schleunigst in ihr gleichmäßig temperiertes Tiefenwasser zurückziehen.

Die Naturgesetze, die das Verhalten der Luft beschreiben, sind eigentlich recht einfach. Ihr Zusammenspiel auf der rotierenden Erde wird aber etwas verzwickter, so dass wir das Geschehen zuerst in 12 einfache Beobachtungen zerlegen. Danach können wir die Einzelteile des Puzzles zur „Wetter- und Klimamaschine“ zusammensetzen. Zur Belohnung für unseren Fleiß gibt es dabei erstaunliche Einsichten in die Triebkräfte des Wettergeschehens. Letztendlich können wir erkennen, wie sich unser Wetter aus einem Chaos von verschiedenen Strömungen und Wirbeln entwickelt.

Wer sich mit den Grundzügen der Physik der Atmosphäre schon gut auskennt, kann nun sein Wissen im Schnelldurchgang überprüfen. Diese 12 Puzzlesteine werden uns beschäftigen:



## 1 WARMER ERDBODEN, KALTE LUFT, LABILITÄT



Ein großer Anteil der Sonnenstrahlung durchquert die gesamte Atmosphäre bis hinunter zum Erdboden. Dabei wird der Boden viel effektiver erwärmt als die Luft.

Eine typische Situation ist ein wolkenloser, klarer Wintertag, bei dem sich Skifahrer zum Bräunen ohne Pullover in die Sonne legen können. Die Sonnenstrahlen erwärmen schneefreie dunkle Flächen, die Kleidung oder die Haut besonders kräftig. In einem geparkten Auto kann es sogar unangenehm heiß werden, wenn die Sonne durch die geschlossenen Scheiben strahlt. Im Schatten dagegen fühlt man, dass die Außenluft noch recht kalt ist. Wie eine klare Glasscheibe ist die Erdatmosphäre für das Strahlungsspektrum der Sonne in weitem Bereich transparent (durchlässig). Dagegen wird die Sonnenstrahlung von den meisten Stoffen, wie etwa Erdboden, Holz oder auch Wasser, stark absorbiert.

Generell gilt deshalb, dass die Sonne nicht die Luft, sondern vor allem die Erdoberfläche effektiv erwärmt, die ihrerseits dann die Wärme an die Luft abgibt. Die dabei entstehende Temperaturverteilung ähnelt der von Wasser im Topf auf einer Herdplatte, wo auch die höchste Temperatur am Boden vorhanden ist. Sie führt nicht nur im Kochtopf, sondern auch in der Luft zu Labilität und damit zu aufsteigenden warmen Strömungen und Turbulenzen. Die erwärmte Luft am Boden ist nämlich leichter als die kalte Luft darüber und will aufsteigen, wie die Blasen im Wasser. Bei einer stabilen Schichtung dagegen ruht

die wärmere und leichtere Luft auf der kalten, schwereren Luft, wie beispielsweise in einer Kühltruhe. Dann findet kaum eine Durchmischung statt.

Die Situation der Ozeane ist in weiten Bereichen durch Stabilität gekennzeichnet. Weil die Einstrahlung der Sonne bereits in den obersten Wasserschichten absorbiert wird, bleibt ein Ozean mit kaltem Tiefenwasser auch bei voller Sonneneinstrahlung stabil geschichtet.

## 2 MIT ZUNEHMENDER HÖHE SINKT DER LUFTDRUCK



Das ist natürlich nicht anders zu erwarten, denn der Luftdruck ergibt sich aus dem Gewicht der Luft über uns. Über jedem Quadratmeter Fläche auf Meeresniveau ist eine Säule von 1 kg Luftmasse geschichtet und erzeugt einen Druck von 1 bar. Je höher wir steigen, desto weniger Luft lastet über uns, und der Druck nimmt ab.

Wir machen jetzt ein pfiffiges Gedankenexperiment und betrachten eine Atmosphäre, die sich ausnahmsweise wie ein Ozean benehmen soll. In dieser „Gedankenatmosphäre“ behält die Luft immer dieselbe konstante Dichte wie auf Meeresniveau bei 0 °C. Weil diese Dichte ca. 1,3 kg/m<sup>3</sup> beträgt, muss eine Luftsäule (konstanter Dichte!) etwa 8 km hoch sein, um den Druck erzeugen zu können. Unser theoretischer „Luftozean konstanter Luftdichte“ würde bis zu einer Höhe von 8 km reichen und darüber würde sofort der leere Weltraum beginnen. Man nennt dieses sehr nützliche Konstrukt „Homogene Atmosphäre“

## EINIGE FAKTEN ZU DRUCK UND DICHTEN VON LUFT UND WASSER

Unter Druck  $p$  versteht man die Stärke einer Kraft  $K$  pro Fläche  $F$ :

$$p = \frac{K}{F}$$

Eine vertraute Einheit ist 1 bar, der Luftdruck auf Meeresniveau.

Man kann sich veranschaulichen, dass bei diesem Druck auf jedem Quadratzentimeter die Masse von einem Kilogramm lastet.

Der Druck von 1 bar wird durch eine Wassersäule von nur 10 m Höhe erzeugt – oder aber durch eine Luftsäule, die allerdings die gewaltige Höhe der gesamten Atmosphäre benötigt. So unterschiedlich wirkt sich die druckabhängige und geringe Dichte von Gasen im Vergleich zu dichter Materie aus.

Als „Standardatmosphärendruck“ gilt 1,013 bar = 1013 hPa. (Umrechnung: 1 bar = 1000 mbar = 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup> = 10<sup>5</sup> Pascal = 1000 hPa (Hektopascal), 760 Torr bedeuten 760 mm Quecksilbersäule und entsprechen 1013 hPa)

Die Dichte  $\rho$  („rho“) bezeichnet die Masse  $m$  pro Volumen  $V$ :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Wasser hat eine ziemlich konstante Dichte von ca. 1 g/cm<sup>3</sup> = 1 kg/Liter = 1 t/m<sup>3</sup>. Wasser ist nahezu inkompressibel.

Die Dichteänderungen durch Druck, Temperatur und Salzgehalt sind nur gering, aber dennoch für die Schichtung im Ozean wichtig, weil Wasser höherer Dichte absinkt.

Gase dagegen sind kompressibel. Ihre Dichte ändert sich kräftig mit Druck und Temperatur. Luft von 0 °C und 1013 hPa (Meeresniveau) hat eine Dichte von ca. 1,3 kg/m<sup>3</sup>.

Für die Gasdynamik muss man mit der absoluten Temperatur in Kelvin rechnen, 0 °C = 273 K. Bei 300 K (= +27 °C) ist die Temperatur um 10 % höher als 273 K.

Die Luftdichte sinkt bei 10 % Temperaturerhöhung um 10 % ab und beträgt dann nur noch 1,17 kg/m<sup>3</sup>. Erhöht man die Temperatur weiter auf 355 K (= +82 °C), was 30 % wärmer ist als 273 K, so sinkt die Luftdichte entsprechend um 30 % auf 0,9 kg/m<sup>3</sup>.

Eine heißere und damit leichtere Luftmasse will in der Atmosphäre aufsteigen.

Es entsteht eine Auftriebskraft, die proportional zum Dichteunterschied zur umgebenden Luft ist.

Wenn eine warme Luftmasse aufsteigt, wird sie sich ausdehnen, weil der Umgebungsdruck der Atmosphäre mit zunehmender Höhe sinkt. Dabei kühlt sie sich ab, kann aber nach wie vor deutlich wärmer bleiben als die umgebende Atmosphäre und deshalb immer weiter aufsteigen.

Nur wenn sich Luftmassen durchmischen, gleichen sich ihre Temperaturen an. Das kann bei großen Luftmassen sehr lange dauern. Wenn Millionen von Kubikkilometern kalter Luft aus dem Norden zu uns einströmen, können sie die Kälte bis weit in den Mittelmeerraum transportieren.

Die thermodynamischen Eigenschaften von trockener Luft folgen bereits aus dem allgemeinen Gasgesetz, wie es in allen Physikbüchern erläutert wird:  $pV = nRT$  (Vielleicht ist jetzt ein Blick ins Buch zur Auffrischung hilfreich). Das Gasgesetz gilt auch dann noch, wenn Wasserdampf in der Luft vorhanden ist – aber nur, solange sich aus dem unsichtbaren Dampf keine Tröpfchen oder Wolken bilden. Dann bewirkt das Wasser wegen der Verdunstungs- und Kondensationswärme kompliziertere Effekte.

und kann damit viele Berechnungen schnell und einfach durchführen.

Beispielsweise ergibt sich die Masse  $M$  der gesamten Atmosphäre blitzschnell, denn Erdoberfläche mal Höhe ergeben das Luftvolumen  $V$ . Man erhält  $V = 4,08 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$ . Weil die Dichte konstant  $1,3 \text{ kg/m}^3$  beträgt, folgt als Gesamtmasse  $M = 5,3 \cdot 10^{18} \text{ kg}$ . Der  $\text{CO}_2$ -Anteil der Luft beträgt zur Zeit 387 ppm (ppm: parts per million, 1 ppm ist ein Volumenverhältnis von 1:1 Million). Damit ergeben sich  $1,58 \cdot 10^{15} \text{ m}^3 \text{ CO}_2$  unter Normaldruck.

Weil 22,4 Liter  $\text{CO}_2$  einem Mol entsprechen und 44 Gramm wiegen, erhält man für die Erdatmosphäre mit derzeit 387 ppm  $\text{CO}_2$ : 3100 Gt  $\text{CO}_2$ , entsprechend 846 Gt C.

Die „Homogene Atmosphäre“ entspricht dem Verhalten der Meere, deren Dichte praktisch konstant ist. Der Luftozean aber besteht aus kompressiblen Gasen. Das führt zu den nächsten Beobachtungen.

### 3 GASE LASSEN SICH LEICHT KOMPRIMIEREN



Weil sich Gase leicht zusammen drücken lassen, ist in einem Kubikmeter Luft in Bodennähe viel mehr Masse zusammen gepfercht als in einem Kubikmeter Luft in großer Höhe. Die Dichte der Luft nimmt mit zunehmender Höhe ständig ab. Beispielsweise herrscht

während eines Fluges in 11 km Höhe ein Außendruck von etwa 1/4 des Bodendrucks, also etwa 250 mbar. Wenn wir mit dem Flugzeug dann in den Sinkflug übergehen, steigt der Außendruck. Dieser Druckanstieg ist nicht gleichmäßig „linear“ mit der Höhenabnahme, sondern wird zum Boden hin immer schneller. In 5500 m Höhe hat er sich bereits auf ca. 500 mbar verdoppelt. Dort herrscht also der halbe Bodendruck. Er wird sich noch einmal verdoppeln, wenn wir wiederum 5500 m bis zur Landung auf Meeresebene gesunken sind. Die Ursache ist leicht verständlich: Jedesmal, wenn wir beispielsweise um 1000 m gesunken sind, steht eine um 1000 m höhere Gassäule über uns. Allerdings wird die zusätzliche Luftmenge, die nach 1000 m Sinkflug hinzugekommen ist, von oben jeweils zunehmend stärker zusammen gedrückt. Diese Luft ist entsprechend dichter, und der Druckanstieg wird bei konstanter Sinkrate immer schneller. Dieses charakteristische Verhalten wird durch eine Exponentialfunktion, kurz „e-Funktion“, beschrieben. Eine grafische Darstellung findet sich in Abb. 14. Eine e-Funktion beschreibt alle Vorgänge, bei denen die Änderung eines Wertes proportional zum Wert ist. Dafür gibt es in Natur und Technik zahllose Beispiele.

### 4 IN DER HÖHE WIRD DIE LUFT IM ALLGEMEINEN KÄLTER



Warme Luft steigt auf, die kühlere Luft sinkt ab. Deshalb ist es in einem hohen Raum oben unter der Decke oft viel wärmer als am Fußboden. Auch im Freien steigt warme Luft nach oben. Wenn man auf einen hohen Berg klettert,

## DIE EXPONENTIALFUNKTION („e-FUNKTION“)

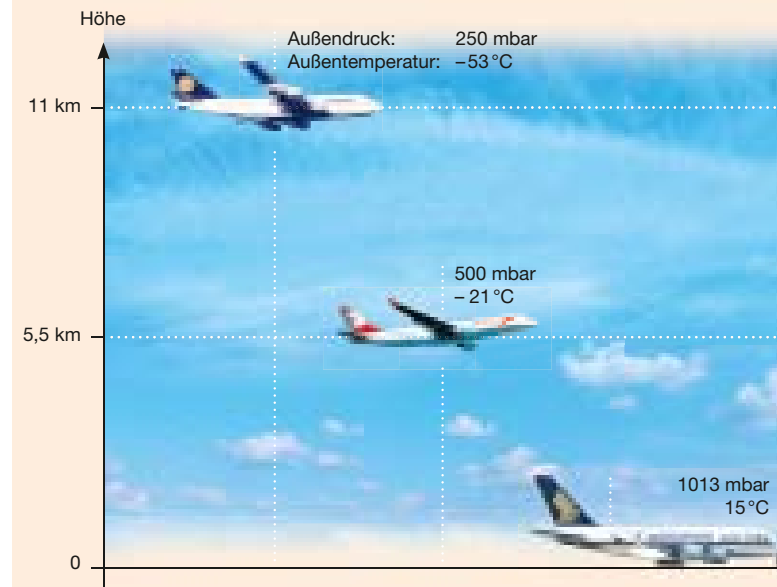
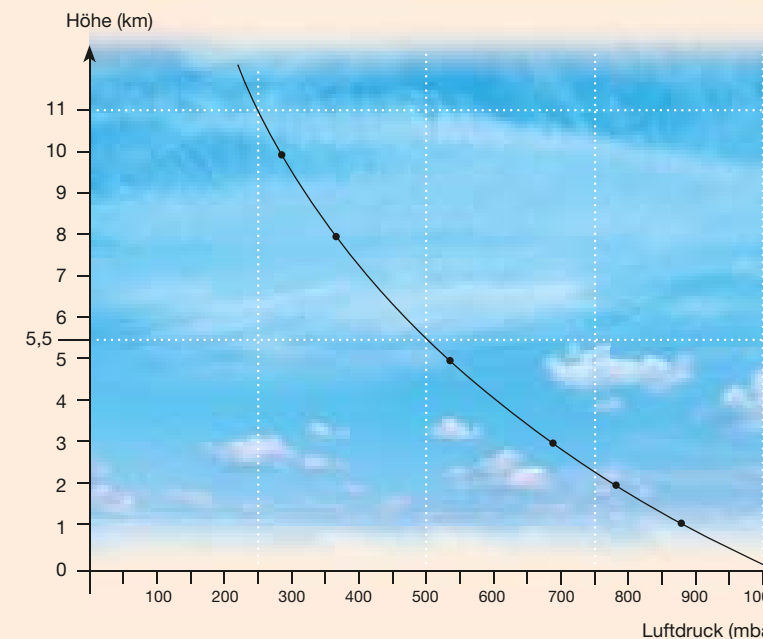


Abb. 14: Wenn bei einer Funktion die Zunahme („Steigung“) proportional zum Wert ist, liegt eine Exponentialfunktion vor. Bekannte Beispiele aus der Biologie sind die Vermehrung von Bakterien oder der Erdbevölkerung, falls sich eine Anzahl immer wieder um einen gleichmäßigen Faktor vergrößert. (Bakterien können ihre Anzahl unter günstigen Bedingungen in 30 min verdoppeln; die Menschheit hat dafür zuletzt etwa 40 Jahre gebraucht). In Naturwissenschaft und Technik ist die e-Funktion allgegenwärtig.



Die barometrische Höhenformel für den Luftdruck  $p$  als Funktion der Höhe  $h$  (in km) lautet in guter Näherung:

$$p(h) = p_{(h=0)} \cdot e^{-\frac{h}{8 \text{ km}}}$$

Alle 5500 m sinkt der Druck auf den halben Wert, alle 8000 m sinkt er auf  $1/e = 0,368$ .

Weil die Formel die Abnahme des Luftdrucks mit zunehmender Höhe beschreibt, ergibt sich das Minuszeichen im Exponenten.

kommt man selbst vielleicht ins Schwitzen, doch beobachtet man nicht, dass die Luft immer wärmer wird – statt dessen ist die Atmosphäre in der Höhe regelmäßig kälter. Warum?

Die Erklärung ist ein wenig trickreich. Wir betrachten eine große „Luftblase“, ein Luftpaket, das in höhere Regionen aufsteigt. Dabei sinkt der Umgebungsdruck und die Luft dehnt sich aus. Dabei ändert sich auch ihre Temperatur, denn wenn sich Gase ausdehnen, kühlen sie sich ab (Genauer: Die Luft dehnt sich beim Aufstieg unter Arbeitsleistung aus, aber ohne Wärmeübergang an die Umgebung. Physikalisch formuliert: reversible, adiabatische Expansion). In einem beheizten Raum macht sich dieser Ausdehnungseffekt noch nicht bemerkbar.

Das Gedankengebilde eines großen Luftvolumens ohne Hülle führt uns direkt zum wichtigen Begriff der „Luftmasse“. Darunter müssen wir uns große Luftmengen ähnlicher Herkunft und Eigenschaften vorstellen, wie etwa „polare Kaltluft“ oder „subtropische Warmluft“. Solche Luftmassen bewegen sich gleichartig – wie eine Meeresströmung – und werden nur an ihren Rändern mit anderen

Luftmassen vermischt. Deshalb behalten sie oft tagelang ihre charakteristischen Eigenschaften. Wo immer Luftmassen aufsteigen, kühlen sie sich ab, während absinkende Luftmassen sich erwärmen. Diese Beobachtung hat für das Wettergeschehen enorme Konsequenzen und gilt auch auf kleinerer Skala, etwa bei aufsteigenden Luftmassen innerhalb von Gewitterwolken. Außerdem gilt dieses Gesetz auch völlig unabhängig davon, ob die Sonne scheint oder nicht. Das vertikale Temperaturprofil der unteren Atmosphäre (Troposphäre) ergibt sich vor allem aus der Thermodynamik, die die Kompression und Expansion der Luft beschreibt. Außerdem wissen wir, dass die Sonnenwärme die Atmosphäre besonders von der Erdoberfläche her erwärmt. Das ist ein weniger bedeutsamer Effekt, denn entscheidend ist das Gasgesetz:

Wenn Luftmassen in der unteren Atmosphäre (Troposphäre) aufsteigen, kühlen sie sich immer ab.

Erst oberhalb der Tropopause werden andere Vorgänge wirksam.

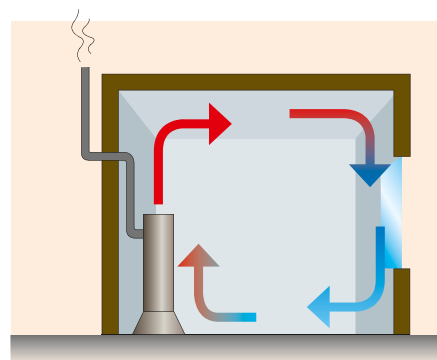


Abb. 15: Zirkulation in einem Raum mit warmem Ofen und kaltem Fenster. Dies ist ein einfaches Modell für eine atmosphärische Zirkulationszelle: aufsteigende Warmluft am Äquator, absinkende Luft in den kühleren Subtropen (Abb. 26, Seite 65).

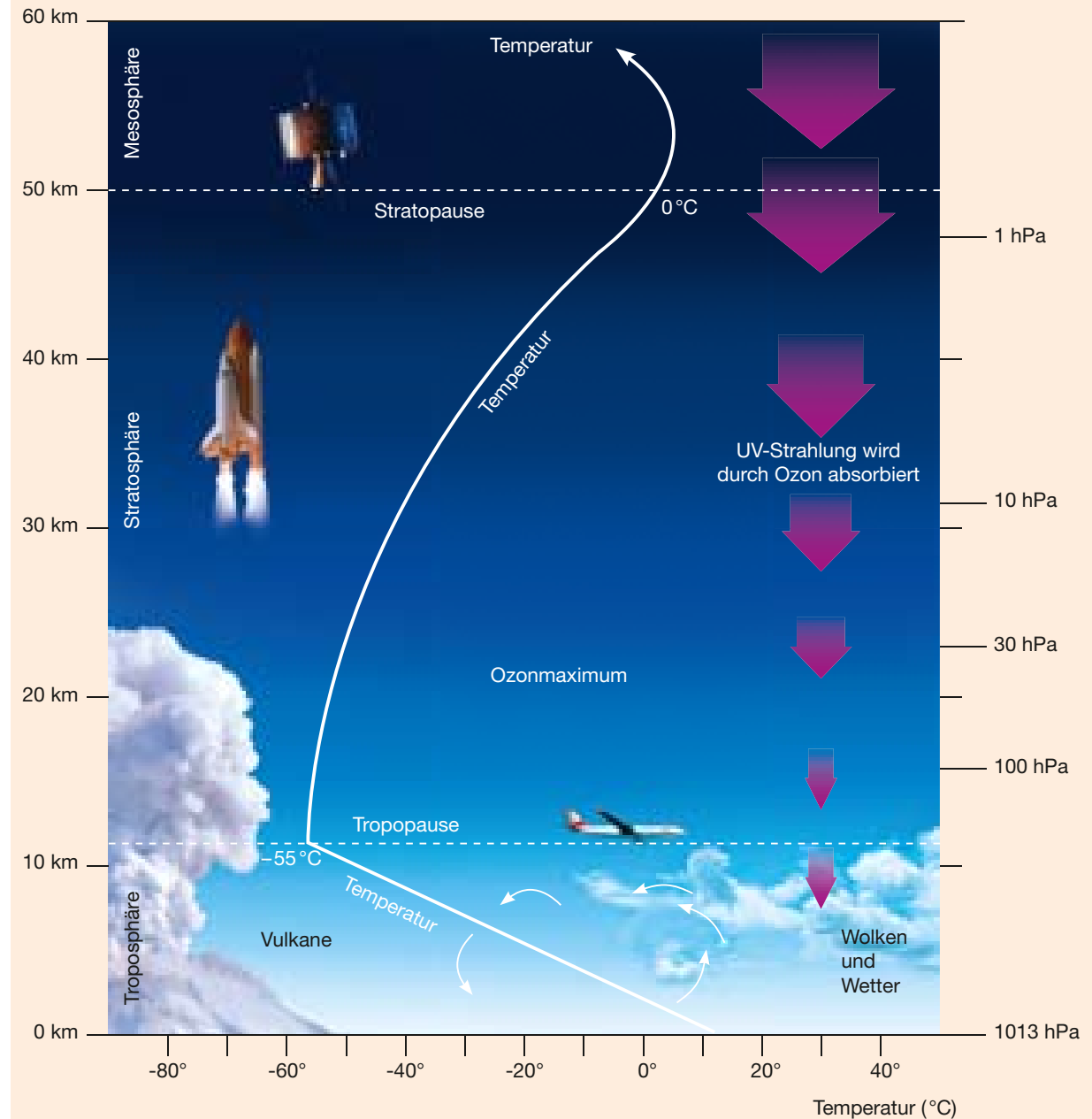


Abb. 16: Die vertikale Gliederung der Atmosphäre

Erst im Bereich der Tropopause (6–17 km Höhe) bleibt die dann schon sehr niedrige Temperatur konstant. Darüber, in der Stratosphäre, steigt sie erstaunlicherweise wieder an. Die Ursache für den ausgeprägten Temperaturanstieg liegt in der dort wirksamen Erwärmung durch die Absorption kurzwelliger Sonnenstrahlung (UV). Verantwortlich dafür ist vor allem das Ozon ( $O_3$ ), das in der Höhe entsteht und dort einen UV-Schutzschirm für das Leben auf der Erde bildet (nach Ref. 5).



## TEMPERATUR, DRUCK UND OZON IN DER ATMOSPHERE

Die Tabelle gibt den Luftdruck und die Temperatur einer für unsere Breiten typischen Atmosphäre an. Sie wird sehr häufig in der Luftfahrt benutzt und als „ICAO Standard Atmosphäre“ bezeichnet (ICAO: International Civil Aviation Organization). Die typische Flughöhe von Reisejets beträgt ca. 12 000 m. In dieser Höhe ist man in unseren Breiten bereits über dem Wettergeschehen. Am Äquator allerdings ist die Sonneneinstrahlung besonders intensiv und die Wetterküche entsprechend energiereich, so dass die Troposphäre (Wettersphäre) dort bis zu 17 km hoch reicht. Dagegen wird die sehr kalte Tropopause in den Polarregionen bereits nach 6 bis 8 km erreicht. Etwas unterhalb der Tropopause findet man sehr heftige Starkwinde, die „Jetstreams“. Diese stabilen, mäanderförmig in West-Ost-Richtung verlaufenden Windbänder mit Geschwindigkeiten bis zu 500 km/h entstehen durch die großräumigen Strömungen, die Corioliskraft (S. 55) sowie die Hoch- und Tiefdruckgebiete (vgl. S. 63, Einfluss der Kugelgestalt der Erde).

Die „ICAO-Standardtemperatur“ auf dem Mont Blanc (4807 m) beträgt  $-16,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Deshalb können sich in hohen Bergregionen Gletscher bilden. Auf dem Mount Everest (8848 m) beträgt diese Temperatur  $-42,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  und der Luftdruck ist auf 1/3 gesunken. Es ist fast unvorstellbar, dass einige Bergsteiger in dieser Kälte und ohne Sauerstoffmaske körperliche Höchstleistungen vollbracht haben!

### OZON

Im Bereich der Stratosphäre entsteht aus Sauerstoffgas ( $\text{O}_2$ ) unter dem Einfluss der UV-Strahlung ständig Ozon ( $\text{O}_3$ ). Die Ozonmoleküle absorbieren weitere UV-Strahlung und bilden so einen Schutzschild für das Leben auf der Erde. Wegen der ständig absorbierten UV-Energie steigt die Temperatur in der Stratosphäre mit zunehmender Höhe wieder an, wobei wegen der dort herrschenden geringen Gasdichte dazu natürlich nur sehr wenig Energie benötigt wird. Freie Chloratome können die Ozonmoleküle effektiv zerlegen und damit die Ozonschicht zerstören. Chlor entsteht in der Stratosphäre aus zerfallenden FCKW-Molekülen (Fluorchlor-kohlenwasserstoffe). Die FCKW-Gase wurden für Klimaanlage eingesetzt und sind im Bereich der Atemluft völlig ungiftig, inert und stabil. Erst in der Höhe werden sie durch UV-Einwirkung zerlegt und setzen dabei Chlor frei. Die internationale Montreal-Konvention von 1987 zum Schutz der Ozonschicht hat sich inzwischen als höchst erfolgreich herausgestellt. Das Abkommen erwies sich als durchsetzbar, weil die Forschung inzwischen Ersatzstoffe für den FCKW-Einsatz in Klimaanlage entwickelt hatte.

Das Ozon in Bodennähe ist ganz unterschiedlich zu bewerten. Es ist ein starkes Oxidationsmittel und dient zur Entkeimung, etwa von Trinkwasser. In der Atemluft kann es deshalb sogar gefährlich werden. Es tritt bei Smog und bei bestimmten sommerlichen Wetterlagen auf: „Ozonalarm!“.

Höhe (m)	Druck (hPa)	Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )
0	1013	15,0
100	1001	14,4
500	955	11,8
1000	899	8,5
2000	795	2,0
4000	616	$-11,0$
6000	472	$-24,0$
8000	356	$-37,0$
10 000	264	$-50,0$
12 000	193	$-56,5$
20 000	55	$-56,5$
32 000	8,7	$-44,5$
50 000	0,7	$-2,5$

Tab. 1: ICAO Standard Atmosphäre, ICAO ist die International Civil Aviation Organization



## 5 WASSER IST WAHRHAFT WANDLUNGSFÄHIG

Wasser kann verdampfen, kondensieren und gefrieren. So einfach diese Beobachtung klingen mag, so gewaltig sind die Konsequenzen. Wasser ist nicht nur für jede Lebensform, sondern auch für unsere Atmosphäre von höchster Bedeutung. Wir leben auf dem einzigen Planeten im Sonnensystem, in dem alle drei Aggregatzustände des Wassers gleichzeitig am Wettergeschehen beteiligt sind. Das Wasser in den Meeren ist uns inzwischen vertraut, das Wasser in der Luft dagegen hält noch viele verblüffende Zaubertricks parat. Meistens ist es als Dampf völlig unsichtbar, dann aber bildet es plötzlich Nebel oder Wolken, schließlich Regen oder bei Kälte Schnee, Hagel und Eis. Unsere Umgebungsluft enthält immer gasförmiges Wasser in Form von völlig unsichtbarem Wasserdampf. Warme Luft kann sehr viel mehr Wasserdampf aufnehmen als kalte Luft. Entscheidend ist der Dampfdruck, wie auf Seite 53 erläutert.

Das Wasser zirkuliert als Dampf durch die Atmosphäre. Aus den Weltmeeren verdunstet eine jährliche Wassermenge, die einer Wasserhöhe von 1,18 m entspricht. Auch die mittlere Verdunstung von den Landflächen beläuft sich auf beachtliche 0,48 m (480 mm). Dennoch ergibt sich daraus nur ein eher mickriger Anteil an der Gesamtverdunstung. Wie ist das möglich? Ganz einfach, weil die Meere 71 % der Erdoberfläche bedecken, tragen sie mit 86 % zur Gesamtbilanz der Verdunstung bei. Insgesamt verdunsten unvorstellbare 496 000 km<sup>3</sup> Wasser pro Jahr (= 100 %). Dennoch macht diese riesige Regenmenge

nur 0,037 % des Wasservorrats der Ozeane aus. Der atmosphärische Wasserdampf wird immer relativ schnell wieder als Niederschlag abgegeben. Seine mittlere Verweilzeit in der Atmosphäre beträgt nur 10 Tage, denn der Dampf steht im Gleichgewicht mit der flüssigen Phase, jeweils dem temperaturabhängigen Dampfdruck entsprechend. Wasser verdunstet leicht von warmen Oberflächen, aber es verschwindet auch wieder schnell aus der Luft. Diese wichtige Erkenntnis müssen wir unbedingt berücksichtigen, wenn wir den Einfluss des Wassers als Treibhausgas bewerten wollen.  $\text{CO}_2$  dagegen ist ein stabiles Molekül und kann für Jahrhunderte als Gas in der Atmosphäre verbleiben. Das  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre beeinflusst die Temperatur und damit über den Dampfdruck auch den Wasserdampfanteil in der Atmosphäre: Das  $\text{CO}_2$  dominiert das Langzeitverhalten, der Wasserdampf dagegen folgt dem  $\text{CO}_2$  und verstärkt dessen Treibhauseffekt.

Um Wasser zu verdunsten, muss sehr viel Energie aufgebracht werden. Für einen Liter Wasser benötigt man  $2,26 \cdot 10^6\text{ J}$  (bei  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Andererseits wird diese gesamte Energie wieder frei, wenn der unsichtbare Wasserdampf zu Tröpfchen kondensiert. Wer sich schon einmal an heißem Dampf verbrüht hat, weiß, wie effektiv die kondensierenden Tröpfchen Brandblasen erzeugen. Dagegen ist die trockene heiße Luft aus dem Haarföhn nicht so gefährlich, weil beim Föhnen kein Dampf kondensiert, sondern statt dessen sogar Wasser verdunstet und dabei kühlt.

Wolken und Nebel bestehen aus winzigen Tröpfchen, die wie allerfeinste leichte Staubteilchen von geringsten Luftbewegungen am Absinken gehindert werden. Erst wenn sich größere Regentropfen bilden, reicht deren

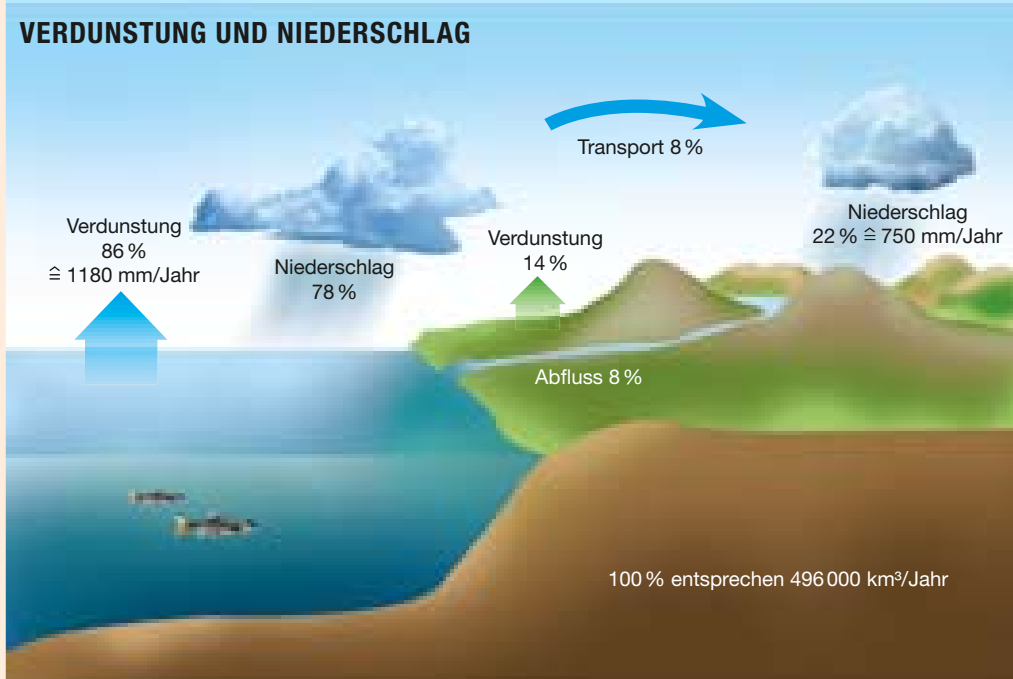


Abb. 17: Aus den Ozeanen verdunstet ständig eine große Menge Wasser, die insgesamt 86% der globalen Verdunstung von 496 000 km<sup>3</sup> pro Jahr ausmacht. Die Oberflächentemperatur der Ozeane ist die dafür entscheidende Größe. Etwa 9/10 der ozeanischen Verdunstung regnet wieder über den Meeren ab, und nur etwa 1/10 erreicht das Land und führt dort zu Niederschlag. Im globalen Mittel ergibt sich der Niederschlag auf dem Land aber nur zu 1/3 aus ozeanischer Verdunstung und zu 2/3 aus der Verdunstung direkt von den Landflächen und Seen. Im Durchschnitt verbleibt das Wasser etwa 10 Tage in der Atmosphäre, bevor es als Niederschlag wieder abgegeben wird.



Gewicht aus, um sie zur Erde fallen zu lassen. In großer Höhe und kalter Luft entsteht statt flüssigem Wasser Eis in Form von (Schnee-) Kristallen.

Weil Energieströme für das Verständnis des Klimas entscheidend sind, ist der Energieinhalt der feuchten Luft von zentraler Bedeutung. Die Begriffe Kondensationsenergie, latente Wärme und fühlbare Wärme sollte man möglichst kennen und verstehen.

## 6 WASSERDAMPF – DER UNSICHTBARE ENERGIESPEICHER

Unsere Luft enthält zwei Formen von Wärmeenergie:

1. Die **fühlbare Wärme**, die ein Thermometer anzeigt.
2. Die **nicht fühlbare, „verborgene“ latente Wärme**, gespeichert im Wasserdampf in der Luft.

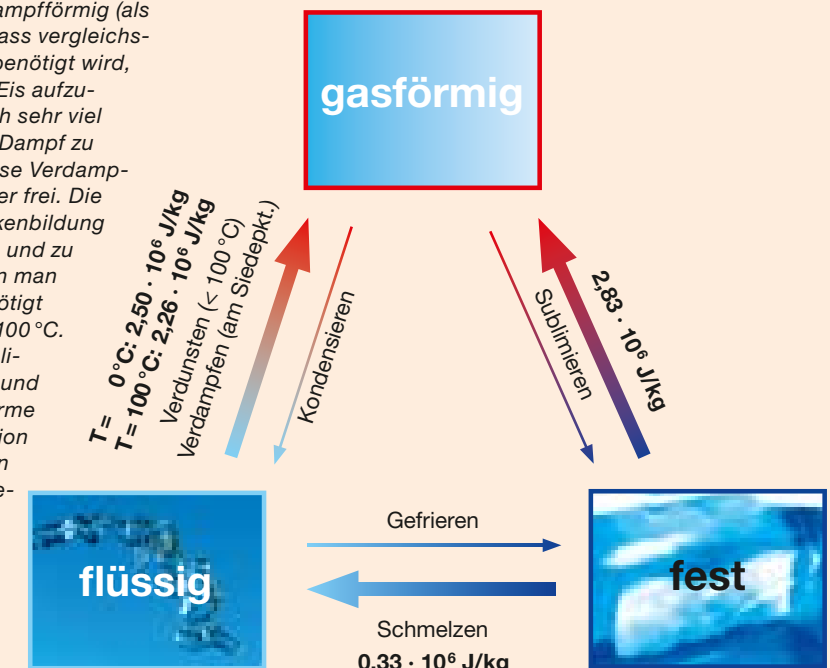
Der im sichtbaren Wellenlängenbereich völlig durchsichtige Wasserdampf wirkt in der Luft als Energiespeicher, als eine „Batterie für Wärme“. Sobald der Dampf wieder zu Tröpfchen kondensiert, weil zum Beispiel die Lufttemperatur sinkt, wird die zuvor für das Verdunsten benötigte Wärme als Kondensationsenergie wieder frei. Es ist vor allem diese Kondensationsenergie, die zu den dramatischen Starkwetterereignissen führt. Beispielsweise entstehen die Hurrikane über dem

warmen Wasser der tropischen Meere, weil dort viel Wasser verdunstet und dann in der höheren Atmosphäre wieder zu Regenwolken auskondensiert. Dadurch wird sehr viel Wärmeenergie in zuvor kalte Luftschichten eingebracht, was zu Starkwinden und extremen Turbulenzen führt.

Die maximal mögliche Menge des Wasserdampfes in der Luft wird durch den temperaturabhängigen Partialdruck bestimmt, S. 53.

## DIE PHASEN DES WASSERS

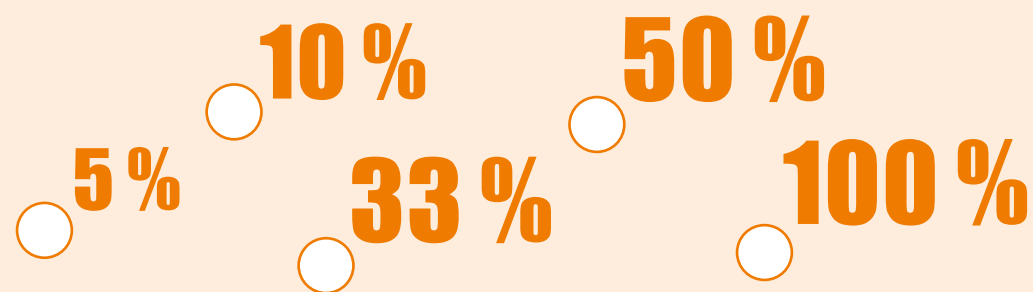
Abb. 18: Auf der Erde existiert Wasser in allen drei Phasen: fest (Eis), flüssig und dampfförmig (als unsichtbares Gas). Man sieht, dass vergleichsweise wesentlich mehr Wärme benötigt wird, um Dampf zu erzeugen, als um Eis aufzuschmelzen. Im Dampf ist nämlich sehr viel Energie gespeichert. Wenn der Dampf zu Tröpfchen kondensiert, wird diese Verdampfungswärme („Enthalpie“) wieder frei. Die Kondensation kann bei der Wolkenbildung große Wärmemengen freisetzen und zu starken Aufwinden führen. Wenn man Wasser bei 0 °C verdampft, benötigt man 10% mehr Energie als bei 100 °C. Wenn Eis bei 0 °C zu Dampf sublimiert, muss die Schmelzwärme und zusätzlich die Verdampfungswärme zugeführt werden. Die Sublimation einer dünnen Schneedecke kann an einem sonnigen Wintertag beobachtet werden.





## Ein kleines Quiz zu sehr realen Konsequenzen:

Um wie viel wird sich, grob geschätzt, die globale Niederschlagsmenge erhöhen, wenn die Oberflächentemperatur der Meere um 5 °C ansteigt?



Für eine Abschätzung reicht diese Aussage:

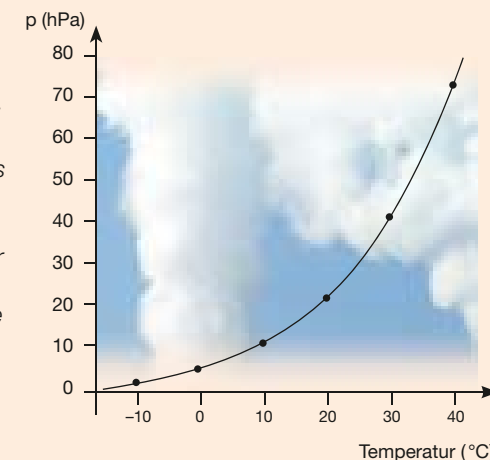
Wenn man in den Dampfdrucktabellen oder -kurven nachschaut, wird man für 5 °C etwa 33 % Zunahme des Partialdruckes und damit auch der Verdunstungsrate finden. 33 % ist also der richtige Schätzwert (Ca. 11 °C bewirken bereits eine Verdopplung des Partialdruckes). Eine höhere Wassertemperatur ist sehr effektiv, um den Wasserdampfgehalt der Luft zu erhöhen. Ein Anstieg der Oberflächentemperatur der Meere um 5 °C kann zur Zeit glücklicherweise noch als ein extremes Szenario betrachtet werden, denn das wäre ein sehr klimawirksamer Effekt.

Im Vorgriff auf die Ergebnisse der physikalischen Klimamodelle (S. 141) geben wir an dieser Stelle einige der erwarteten Folgen bei einer Erwärmung um 5 °C wieder:

- Im globalen Trend wird die Stärke der Niederschläge und der Stürme vermutlich zunehmen. Bei den tropischen Wirbelstürmen vermutet man, dass deren Zahl nicht zunehmen wird, wohl aber deren Stärke.
- Mit Sicherheit wird sich eine solche Temperaturerhöhung um 5 °C regional sehr unterschiedlich auswirken, keinesfalls wird es überall mehr regnen.
- Manche Regionen werden bei stabiler Zirkulation und bei besonders beständigem „schönen“ Hochdruckwetter sogar unter größerer Trockenheit leiden.
- Für Mitteleuropa erwartet man mehr Niederschlag im Winter und weniger im Sommer.
- Die Zugstraßen unserer Tiefdruckgebiete und der schweren Stürme könnten sich nordwärts verschieben, so dass manche Regionen in Deutschland zukünftig sogar weniger von Sturmschäden betroffen wären.

## DIE WUNDERSAME WELT DER PARTIALDRÜCKE

Abb. 19: Über einer Wasseroberfläche bildet sich Wasserdampf, dessen Druck und Menge sehr stark temperaturabhängig ist. Der Wasserdampf trägt mit seinem Dampfdruck anteilig zum Gesamtdruck bei. Als Faustregel kann man abschätzen, dass eine Wassertemperaturerhöhung um 11 °C den Druck des Dampfes verdoppelt und damit auch die Masse von Wasser in einem Kubikmeter Luft. Gesättigte Luft bei +30 °C und einem Gesamtdruck von 1013 hPa enthält 34 g Wasser pro m<sup>3</sup>. Der Wasserdampf trägt nun mit 42 hPa zum Gesamtdruck bei, die restlichen 971 hPa teilen sich die Gase N<sub>2</sub> (78,1 Vol- %), O<sub>2</sub> (21 Vol- %) und Ar (0,9 Vol- %) entsprechend ihrem Anteil, also N<sub>2</sub>: 758 hPa, O<sub>2</sub>: 204 hPa und Ar: 9 hPa. Diese Drücke heißen Partialdrücke. Die Summe aller Partialdrücke ergibt den Gesamtdruck. Bei trockener Luft dagegen wäre der Partialdruck des Wasserdampfs Null und die anderen Partialdrücke betrügen 791 hPa; 213 hPa bzw. 9,1 hPa bei einem Gesamtdruck von 1013 hPa. Wenn trockene Luft Wasser aufnimmt, beansprucht der Wasserdampf seinen Platz im Gasgemisch und verdrängt die anderen Gase entsprechend. Die Luftdichte sinkt dabei, die Luft wird leichter, denn Wasserdampf hat eine geringere Molmasse (18 g/Mol) als O<sub>2</sub> (32 g/Mol) und N<sub>2</sub> (28 g/Mol). Die Spurengase, zu denen auch das CO<sub>2</sub> mit 0,039 Volumen-% gehört, kann man bei solchen Berechnungen vernachlässigen.



## 7 NUR AM ÄQUATOR WEHT DER WIND ORDENTLICH GERADEAUS

Das Verhalten des Windes auf der rotierenden Erde ist ziemlich erstaunlich. Deshalb begehen wir uns zuerst in ein schmales Band von +/- 5 Breitengraden um den Äquator. Dort ist die Corioliskraft nämlich praktisch nicht spürbar (Die geheimnisvolle Corioliskraft wird im nächsten Kapitel entzaubert). Nun lassen wir die Sonne kräftig auf eine Tropenwaldfläche scheinen. Die erwärmte feuchte Luft steigt auf, und der Bodenluftdruck sinkt in diesem Gebiet: ein **thermisches Tiefdruckgebiet** („Tief“) ist entstanden. Kühlere Luft aus einem Bereich mit höherem Luftdruck („Hoch“) strömt darauf horizontal in das Gebiet ein und gleicht den Bodenluftdruck aus. In der Höhe

ergibt sich eine Gegenströmung, so dass sich ein aufrecht stehendes „Zirkulationsrad“ bildet. Dabei wird Sonnenwärme großräumig in Windenergie verwandelt.

Diese einfache Wettersituation zeigt einige generell gültige Fakten. Für jedes Tief gilt:

- Die Luft im Tief steigt auf („Hebung“).
- Bei einer Hebung kühlt sich die Luft immer ab und meistens setzt Kondensation ein: Wolken entstehen, Niederschlag ist möglich.
- Am Boden strömt Luft in das Tief hinein.

Dagegen gilt für ein Hoch:

- Im Hoch sinken die Luftmassen ab.
- Bei Sinkvorgängen erwärmt sich die Luft.
- Wolken lösen sich im Hoch auf, es ist oft sonnig und warm.
- Am Boden strömt die Luft aus dem Hoch heraus.

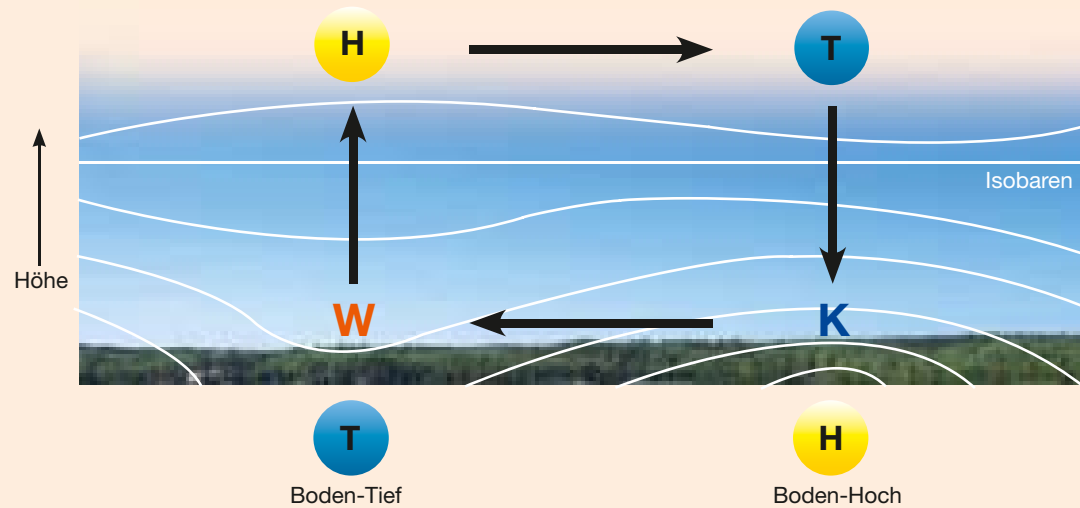


Abb. 20: Im „thermischen Tief“ steigt warme Luft auf, der Bodenwind weht in das „Tief“ hinein. Warme Luft ist leicht, deshalb liegen die Linien gleichen Drucks weiter voneinander getrennt als bei einer Luftsäule mit kalter Luft. Die kalte Luft sinkt ab und es bildet sich am Boden ein „Hoch“. Ein „Tief“ ist immer mit aufsteigenden Luftmassen verbunden. Allerdings können in einem „dynamischen Tief“ auch kalte Luftmassen zu Aufsteigen gezwungen werden (Ref. 1).

In der besonders intensiv von der Sonne erwärmten Äquatorregion bildet sich der äquatoriale Tiefdruckgürtel. Dort steigt die Luft auf, oft in Form von nachmittäglichen heftigen Gewittern, die bis in die Stratosphäre vorstoßen können. Entfernt man sich vom Äquator, folgen in den Subtropen die Zonen beständiger Hochdruckgebiete, die „Rossbreiten“, in denen die Luft wieder absinkt und überwiegend „schönes“ Wetter und Trockenheit herrschen. Die Bodenwinde, die die nördlichen und südlichen Hochdruckgebiete mit der äquatorialen Tiefdruckrinne verbinden, sind die zum Äquator hin gerichteten gleichmäßigen Passatwinde. Deren Luftmassen konvergieren im Äquatorgebiet (ITCZ oder ITK, „innertropische Konvergenzzone“ genannt). Ihre nach Westen gedrehte Richtung wird wesentlich von der Corioliskraft bestimmt.

Die warmen und feuchten Luftmassen des Äquatorialgebietes sind riesige Energiespeicher für die atmosphärische Zirkulation. Wenn die Wassertemperatur 26,5 °C übersteigt und ein ausreichend starker Wind weht, können sich in der aufsteigenden Luft unter dem Einfluss der Corioliskraft ausgedehnte riesige Wirbel bilden – die tropischen Wirbelstürme. Nur die Äquatorregion selbst bleibt davon verschont, weil die Corioliskraft am Äquator keine horizontale Komponente hat und deshalb unwirksam ist.

In Deutschland haben wir es seltener mit thermischen Warmluft-Tiefs zu tun, sondern fast immer mit „dynamischen Tiefs“, die durch relativ kalte Luft gekennzeichnet sind. Sie entstehen in großer Höhe direkt aus großräumigen Verwirbelungen. Mehr darüber unter Punkt 11.



## 8 CORIOLIS – DER WIND FÄHRT KARUSSELL

Obwohl im Alltag kaum spürbar, ist die Corioliskraft eine sehr wirkungsvolle Kraft, die sich aus der Rotation der Erde ergibt. Sie ist in der physikalischen Beschreibung der Fliehkraft eng verwandt, aber gänzlich anders gerichtet. Wie die Fliehkraft steht auch sie senkrecht auf der momentanen Bewegungsrichtung.

Fliehkraft und Corioliskraft sind zwangsläufige Konsequenzen der Bewegung auf einer rotierenden Bezugsfläche, wie etwa der Erdkugel. Das klingt geheimnisvoll, ist aber in einfachen Fällen leicht und anschaulich zu erläutern. Nun dreht sich die Erde nur sehr gemächlich, nämlich gerade mal mit einer einzigen Umdrehung pro Tag. Deshalb bewirkt die Corioliskraft anfangs auch nur sehr kleine Effekte, die sich erst bei großräumigen Bewegungen zu mächtigen Ablenkungen addieren. Die Corioliskraft ist nämlich proportional zur (Wind-) Geschwindigkeit, multipliziert mit dem

## CORIOLISKRAFT

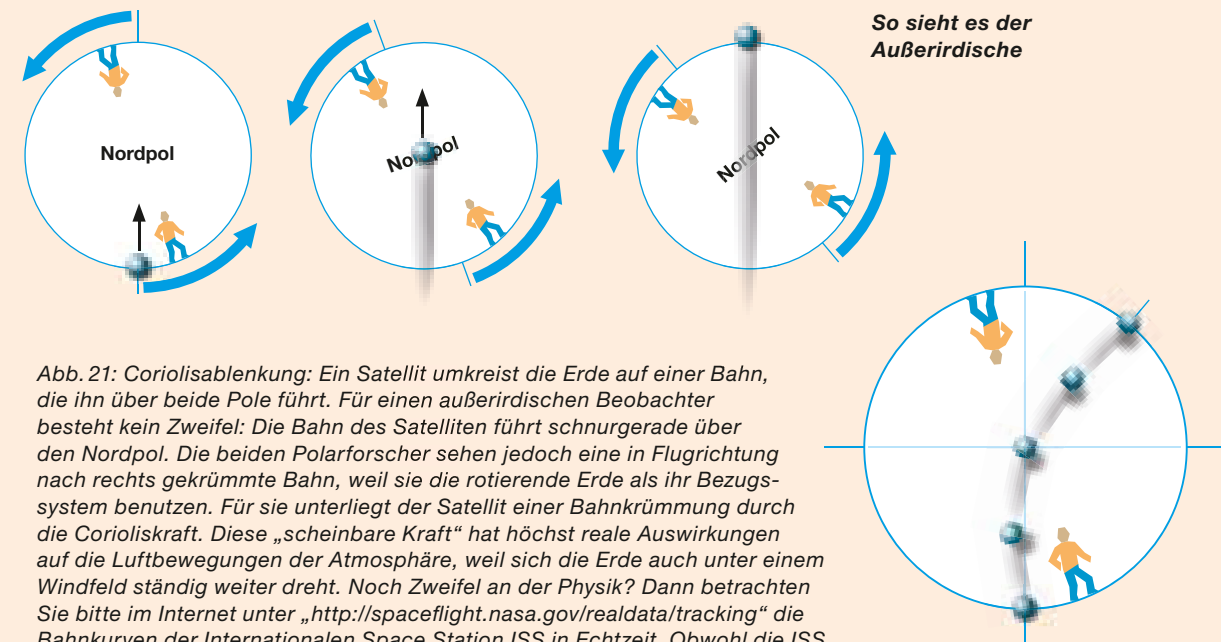


Abb. 21: Coriolisablenkung: Ein Satellit umkreist die Erde auf einer Bahn, die ihn über beide Pole führt. Für einen außerirdischen Beobachter besteht kein Zweifel: Die Bahn des Satelliten führt schnurgerade über den Nordpol. Die beiden Polarforscher sehen jedoch eine in Flugrichtung nach rechts gekrümmte Bahn, weil sie die rotierende Erde als ihr Bezugssystem benutzen. Für sie unterliegt der Satellit einer Bahnkrümmung durch die Corioliskraft. Diese „scheinbare Kraft“ hat höchst reale Auswirkungen auf die Luftbewegungen der Atmosphäre, weil sich die Erde auch unter einem Windfeld ständig weiter dreht. Noch Zweifel an der Physik? Dann betrachten Sie bitte im Internet unter „<http://spaceflight.nasa.gov/realdata/tracking>“ die Bahnkurven der Internationalen Space Station ISS in Echtzeit. Obwohl die ISS reibungsfrei auf Kreisbahnen die Erde umkreist, ergeben sich für uns Erdbewohner charakteristische Slalombahnen längs des Äquators, die auf der Nordhalbkugel nach rechts und auf der Südhalbkugel nach links gekrümmt sind – wiederum erscheint die Corioliskraft als höchst real und wirksam.

**Corioliskraft:**  
Diese Bahn sieht der Beobachter auf der Erde

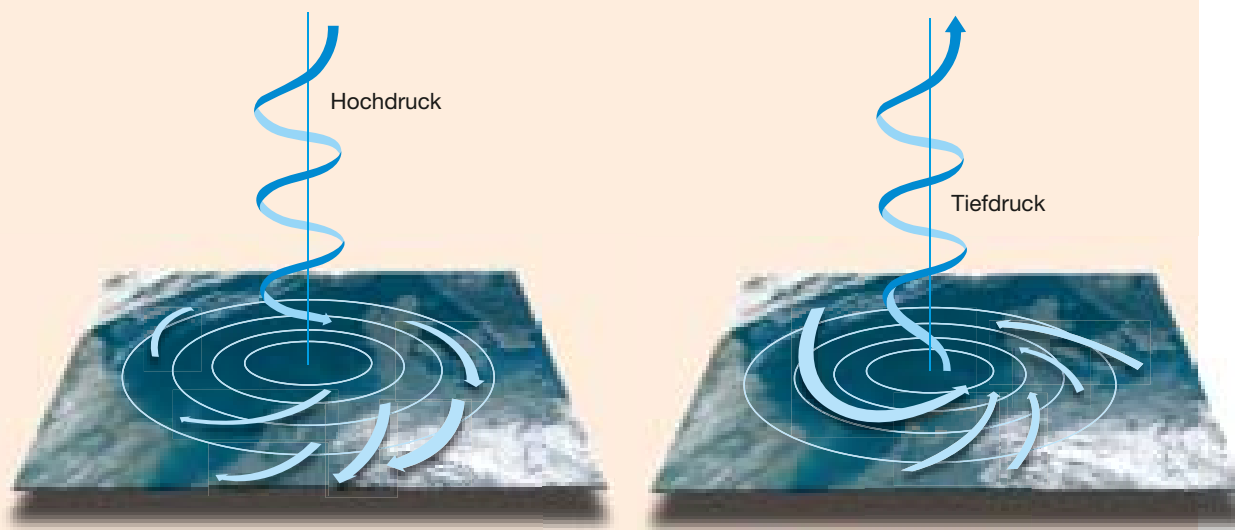


Abb. 22: In einem Hochdruckgebiet sinkt Luft ab und strömt als bodennaher Wind zu einem Gebiet tieferen Luftdrucks. Die Luft strömt aus dem Hoch heraus und wird von der Corioliskraft nach rechts abgelenkt: die Windpfeile sind nach rechts gekrümmt. Der Wind umkreist ein Hoch längs der Isobaren im Uhrzeigersinn. Wenn wir nun das Tief betrachten, so stellen wir verblüfft fest, dass die Windpfeile nach links gekrümmt sind. Das Karussell dreht sich nun im Gegenuhrzeigersinn.

**Wie ist das möglich? Die Corioliskraft wirkt doch gleichartig rechtsablenkend – oder etwa nicht?** Die Antwort erfordert einiges Nachdenken. Die Winde wollen in das Tief hineinströmen und werden dabei wiederum von Coriolis nach rechts abgelenkt. Daraus folgt der Drehsinn (Gegenuhrzeigersinn) des Tiefs. Die Linkskrümmung der Windpfeile hat nichts mehr mit Coriolis zu tun, sondern nur mit dem Einfluss der Bodenreibung. Letztendlich ist es diese Bodenreibung, die das Karussell etwas abbremst und damit einen Lufttransport vom Hoch ins Tief ermöglicht (nach Ref. 8).

„wirksamen Anteil der Erdrotation“ (\*). An den Polen ist sie am stärksten, am Äquator gar nicht wirksam. Auf der Nordhalbkugel wird jede (Wind-) Bewegung nach rechts abgelenkt (in Richtung der Bewegung gesehen), auf der Südhalbkugel lenkt sie alle Bewegungen nach links ab. Eine Veranschaulichung für einen Flug über den Nordpol zeigt die Abb. 21.

Schade, es ist leider gar nicht einfach zu veranschaulichen, dass die Corioliskraft mit unverminderter Stärke auch bei reinen Ost-West-Bewegungen wirksam ist. Das folgt aber sowohl aus den Bewegungsgleichungen, die

man im Physikbuch findet, wie auch direkt aus der Beobachtung der Windströmungen auf der Erde.

Die Winde entstehen, weil Luftmassen primär von den atmosphärischen Druckunterschieden (Druckkräften) beschleunigt werden. Die Winde sollten deshalb direkt von hohem Druck in ein Gebiet niedrigen Druckes strömen. Das können sie aber nicht, wenn weite Distanzen, etwa viele Hunderte von Kilometern, zu überwinden sind. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit wird nämlich die Corioliskraft immer stärker und

lenkt nun die Luftströmung solange immer weiter nach rechts ab, bis die Corioliskraft der antreibenden Druckkraft vollständig entgegengesetzt ist. Die Druckkraft ist nun völlig „kompensiert“ (aufgehoben). Dieser so genannte „geostrophische“ Wind hat dann zwar keine Antriebskraft mehr, aber er nutzt seinen Schwung, um „eine Runde Karussell“ zu fahren. Präzise formuliert bewegt er sich senkrecht zum beschleunigenden Druckunterschied („dem Druckgradient“) und parallel zu den „Isobaren“ (Linien gleichen Druckes). Die Höhenwinde sind besonders reibungsarm und zeigen genau dieses Verhalten. Nur die Reibungskräfte an der Erdoberfläche, die in einer Höhe unterhalb etwa 2000 m durch Turbulenzbildung immer wirksamer werden, dämpfen die Karussellfahrt und lenken den Wind schließlich ins Tief hinein („Geotripterischer Wind“). Deshalb kann eine große Luftmasse unter dem Einfluss der Corioliskraft niemals direkt vom Hoch ins Tief strömen, sondern wird auf einen langen spiralförmigen Umweg gezwungen, bis sie schließlich das Zentrum des Tiefs erreicht. Auf der Nordhalbkugel strömen die Bodenwinde im Gegenuhrzeigersinn („linksdrehend“) in ein Tief hinein. Ein Tief wird auch Zyklone genannt. Die Abb. 22 erläutert den Drehsinn von Zyklone und Antizyklone (Hoch) und fordert unseren kriminalistischen Scharfsinn heraus.

## DIE TRIEBKRÄFTE DES WETTERS

### Physikalischer Standpunkt:

Wärmestrahlung, Temperaturdifferenzen und Dichteunterschiede erzeugen Druckdifferenzen und treiben so die Zirkulation von Wind und Wasser an.

### Meteorologischer Standpunkt:

Das Wettergeschehen versteht man am leichtesten, wenn man direkt die Luftdruckunterschiede und danach die Temperatur- und Windfelder betrachtet.



## 9 TODBRINGENDE WIRBEL

Ob Hurrikan, Taifun oder Zyklon, alle tropischen Wirbelstürme ziehen ihre gewaltige Energie aus dem warmen tropischen Wasser. Diesen Zusammenhang wollen wir genauer untersuchen. Wir wissen inzwischen, dass sehr viel Energie aufgebracht werden muss, um Wasser zu verdampfen: ca. 2,4 kJ werden benötigt, um 1 Gramm Wasser bei 30 °C in Dampf zu verwandeln. Umgekehrt erhält man die vollen 2,4 kJ zurück, wenn aus einem Gramm Dampf ein Gramm Wasser kondensiert.

Stellen wir uns nun einen herrlichen Spätsommertag in der Karibik vor. Ein warmer Wind streicht über das 30 °C warme Meer. Bei dieser Wärme könnte die Luft bis zu 34 g Wasserdampf pro m<sup>3</sup> aufnehmen, die Luft wird dann feucht und schwül. Die 34 g H<sub>2</sub>O entsprechen einem Dampfvolument von 42 Litern (gasförmig!). Weil sie entsprechend 42 Liter trockene Luft (N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>) im Gewicht von 53 g verdrängen, hat feucht-schwüle Luft eine geringere Dichte als entsprechende trockene Luft. Sie ist also leichter und steigt auf. Am Horizont sieht man hohe Wolken aufquellen. Ein mächtiger Gewitterturm entwickelt sich.

Im Geist verfolgen wir nun ein warmes, Feuchte-gesättigtes Luftpaket beim Aufsteigen. Sein Volumen von ursprünglich 1 m<sup>3</sup> nimmt ständig zu, weil ja der Umgebungsdruck beim Aufsteigen fortwährend sinkt. Dabei entdecken wir eine wahrhaft atemberaubende Energiebilanz:

Die 34 g Wasserdampf enthalten eine gespeicherte Kondensationsenergie von ca. 80 kJ. Die spezifische Wärme von trockener Luft

\*) Wenn man die für die horizontale Corioliskraft lokal wirksame Komponente der Erdrotation bestimmen will, muss man den Vektor der Erdrotation zerlegen: Eine Komponente muss senkrecht zur Erdoberfläche stehen und eine zweite parallel zur Erdoberfläche. Entscheidend ist die senkrechte Komponente der Erdrotation, weil sie die horizontale Komponente der Corioliskraft bewirkt. Deshalb ist die Corioliskraft an den Polen für Luftbewegungen maximal wirksam. Am Äquator ist die Corioliskraft ausschließlich senkrecht zur Erdoberfläche gerichtet und bewirkt deshalb keine horizontale Ablenkung.



Abb. 23: Satellitenaufnahme eines voll ausgebildeten Tiefdruckgebiets über Island. Der charakteristische Drehsinn (Gegenuhrzeigersinn) eines Tiefs auf der Nordhalbkugel wird durch die Corioliskraft bestimmt und ist gut zu erkennen: Die Luft will in das Zentrum hinein strömen, wird aber fast vollständig nach rechts abgelenkt. Erst die geringe Linkskrümmung des Strömungsfeldes zu einer Spirale ermöglicht einen Weg in das Zentrum hinein. Sie wird durch die Bodenreibung bewirkt.



( $N_2$  plus  $O_2$ ) ist dagegen relativ gering – sie beträgt nur etwa 1,17 kJ pro  $m^3$  und Grad. Bei diesen beiden Zahlen muss man ganz genau hinschauen, um die darin lauernde Gefahr zu erkennen!

Wenn solche Luftmassen aufsteigen, setzt ein selbstverstärkender Prozess ein, und sehr schnell gibt es kein Halten mehr. Beim Aufsteigen sinkt die Temperatur, und der Wasserdampf kondensiert zu Regentropfen. Dabei gibt er seine Kondensationswärme frei. Die Luft wird zusätzlich erwärmt, was das weitere Aufsteigen beschleunigt. Die Temperatur sinkt nun wieder, eine neuerlich einsetzende Kondensation verstärkt das Aufsteigen ... das Luftpaket fährt wie im rasenden Fahrstuhl nach oben. Das Feuchte-beladene Luftpaket bleibt dabei ständig wesentlich wärmer und leichter als die umgebende Atmosphäre. Beim maximal möglichen, vollständigen Auskondensieren des Dampfes reicht die latente Energie aus für eine Erwärmung um mehr als  $60^\circ C$ ! Das kann zu stürmischen und für die Luftfahrt extrem gefährlichen vertikalen Aufwinden und Turbulenzen führen. Besonders die energiereichen tropischen Gewittertürme können dabei bis in die Stratosphäre vorstoßen. Sie stellen damit neben Vulkanausbrüchen den effektivsten Mechanismus zum Transport von Gasen in die hohe Atmosphäre dar.

Am Äquator entwickeln sich täglich sehr heftige Gewitter. Allerdings verwandeln sie sich nicht in Wirbelstürme, weil die Corioliskraft dort nicht wirksam ist. Die Karibik dagegen ist bereits weit genug vom Äquator entfernt. Hier kann die Corioliskraft einen stetigen Wind zu einem einzigen gewaltigen Wirbel von bis zu 1000 km Durchmesser verdrehen. Er wird durch die vorgeheizte „Wasserdampfmaschi-

ne“ beständig angetrieben. Diese „Dampfmaschine“ nutzt den großen Temperaturunterschied zwischen der ausgedehnten warmen Wasserfläche des tropischen Meeres und der unvermeidlichen Kälte in großer Höhe. Die mit Macht aufsteigenden Luftmassen verwandeln sich in einen gewaltigen Sturm, der Bodenwindgeschwindigkeiten von über 200 km/h erreichen kann (Hoffentlich zieht er weit an unserer Ferieninsel vorbei, denn die dadurch erzeugten Flutwellen von über 5 m Höhe richten zusammen mit den sintflutartigen Regenfällen gewaltige Zerstörungen an).

In dem sehr großräumig rotierenden Sturm bildet sich ein erstaunlich friedliches Zentrum, in dem die Luft wieder absinkt. In der absinkenden Luft lösen sich die Wolken auf und so existiert mitten im Unwetter eine Zone schönen Wetters: Das Auge des Hurrikans. Das friedliche Auge kann bis zu 30 km Durchmesser haben. Die abgesunkene und dabei erwärmte Luft im Auge wird sofort wieder frischen Wasserdampf aus dem Meer aufnehmen und eine neue Runde auf dem Karussell der Corioliskraft drehen – ein verheerender Zyklus, der erst endet, wenn das gesamte Wettersystem des Wirbelsturms über kälteres Wasser oder über das Festland gerät.

Die alljährliche Saison der Hurrikane (Sommer und Herbst) im Süden der USA ist uns aus den Nachrichten bestens vertraut. Wenn man einen Blick in die Zukunft wagt, dann scheint es wahrscheinlich, dass eine Erwärmung der Meere zu einer Verstärkung dieser tropischen Wirbelstürme und zu einer möglichen Erweiterung ihrer Zugstraßen in höhere Breiten (im Atlantik weiter in Richtung Nordamerika) führen wird.



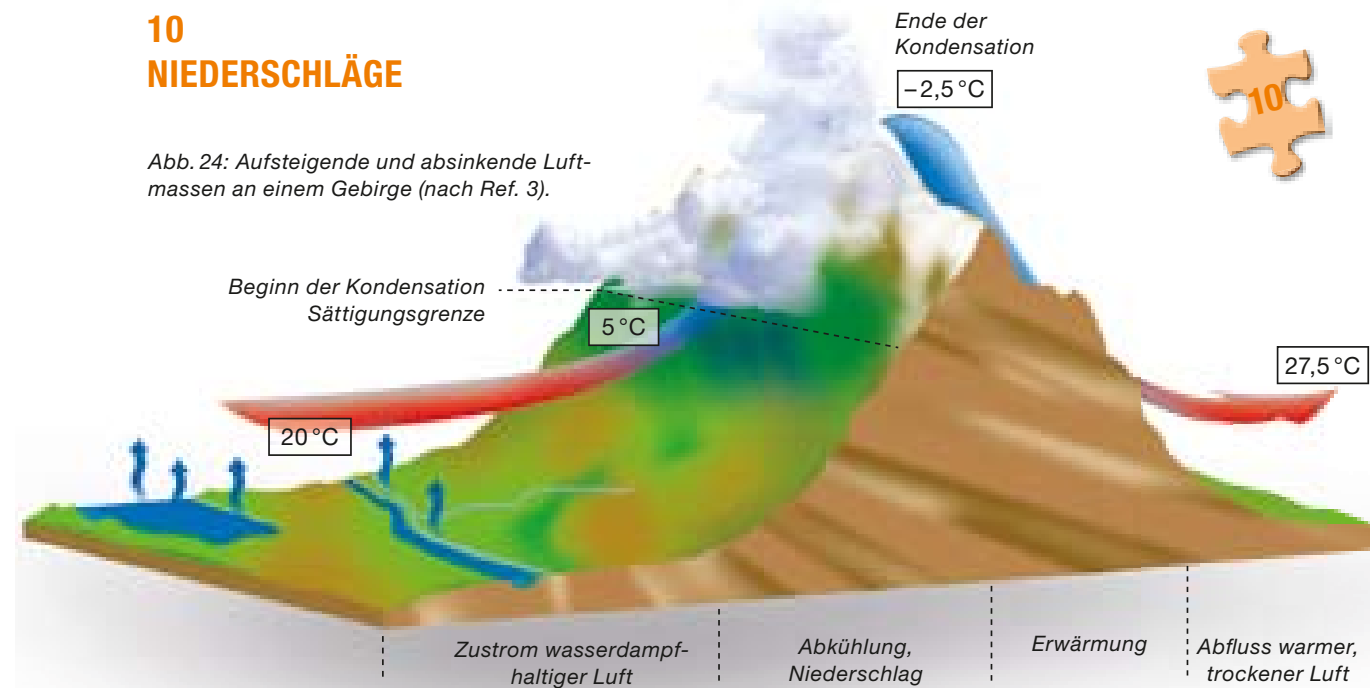


Ein relativ kleinräumiger, aber höchst gefährlicher und spektakulärer Wirbelsturm ist der Tornado. Tornados wachsen als schlauchartiger, rotierender „Staubsauger-Rüssel“ aus einer Gewitterwolke (Cumulonimbus, Cb) nach unten heraus. Sie sind in Europa relativ selten, aber in den Sommermonaten im Mittleren Westen der USA besonders häufig. Eine fast 2000 km breite Region längs des Mississippi wird deshalb „Tornado Alley“ genannt. Die Gesamtzahl der Tornados in den USA beträgt mehr als 1000 pro Jahr. Tornados entstehen zusammen mit schweren Gewittern, wenn kalte Luftmassen nach Süden vorstoßen und dabei auf warme und sehr feuchte Luft treffen. Der Rüssel eines Tornados hat einen Durchmesser von höchstens 50 m. Wegen des geringen Durchmessers ist sein Drehsinn nicht durch die Corioliskraft, sondern durch zufällige Verwirbelung bestimmt, so dass beliebige Drehrichtungen vorkommen. Im Rüssel herrscht ein sehr niedriger Luftdruck, weil die Luft in der extrem labilen Schichtung der Gewitterwolke rasant nach oben gesaugt wird.

Dabei wird durch die Hebung der feuchtwarmen Luft sehr viel Kondensationsenergie freigesetzt. Wenn der Rüssel den Boden erreicht, kann er eine scharf begrenzte Schneise schwerster Verwüstungen hinterlassen. Dabei entstehen die meisten Schäden durch die extremen Windgeschwindigkeiten, die im schlimmsten Fall bis zu 500 km/h erreichen können. Tornados halten damit bei weitem die Rekorde für bodennahe Windgeschwindigkeiten. Die Triebkraft dafür sind die hohen Luftdruckunterschiede auf engstem Raum. Im Gegensatz zu den großräumigen Hurrikannen, die bis zu zwei Wochen lang als stabile Wettergebilde überleben können, fallen Tornados schnell wieder in sich zusammen. Sie entstehen innerhalb von Minuten und leben meistens auch nur wenige Minuten bis (sehr selten) eine Stunde lang. Dennoch sind sie sehr gefürchtet, denn im Zentrum eines Tornados bietet nur ein unterirdischer Raum mit einer festen Decke einigermaßen Schutz vor den geschossartig herumfliegenden Trümmern.

## 10 NIEDERSCHLÄGE

Abb. 24: Aufsteigende und absinkende Luftmassen an einem Gebirge (nach Ref. 3).



Fast immer fallen die Niederschläge aus feuchten Luftmassen, die zum Aufsteigen gezwungen werden, sich dabei abkühlen und Wolken bilden. Glücklicherweise sind damit nicht generell Unwetter oder gar Wirbelstürme verbunden.

Auch Gebirge können Luftmassen zum Aufsteigen zwingen. Die Abbildung zeigt typische Temperaturen für eine Föhnwetterlage in den Alpen. Die Luft kühlt sich zuerst auf dem Weg in die Höhe mit  $1\text{ °C}$  pro 100 m ab. Das ist charakteristisch für „trockene“ Luft und gilt so lange, wie der Wasserdampf gasförmig bleibt. Sobald aber bei sinkender Temperatur der Wasserdampf in der Luft zu Tröpfchen auskondensiert, gibt er Wärme frei, und die Abkühlung beträgt dann typischerweise nur noch ca.  $0,5\text{ °C}/100\text{ m}$ . Die aufsteigende Luft wird dabei durch das Abkühlen und Ausregnen „getrocknet“.

Auf der windabgewandten Seite (Lee) sinkt die Luft ins Tal, erwärmt sich sofort mit  $1\text{ °C}$  pro 100 m.

Die Temperatur dieser sehr trockenen Luft ist sogar höher als die Starttemperatur der feuchten Luft. Küstennahe hohe Gebirge fangen so die feuchte Luft vom Ozean ab und bewirken, dass sich hinter ihnen oft große Trockengebiete bilden.

Andererseits führen die Starkregen auf der windzugewandten Seite (Luv) der Berge oft zu großen Überschwemmungen. Den globalen Regenrekord hält Cherrapunji am Himalaya in Ostindien, wo sich sehr feuchte, warme Monsunwinde abregnen und jährlich fast 11 m Niederschlag fallen. Der historische Rekordwert wurde vor 150 Jahren gemessen und betrug 26 m innerhalb von 12 Monaten durch den Südwest-Monsun 1860 und 1861. Zum Vergleich: das ist 45-mal mehr als der Jahresniederschlag von Berlin mit 0.58 m (580 mm). Die regelmäßigen, sehr weiträumigen Überschwemmungen in Indien und Bangladesch sind vor allem eine Folge der dadurch bewirkten Flusshochwasser, nicht jedoch durch einen Anstieg des Meeresspiegels bedingt.

## 11 WECHSELHAFTES WEST-WIND-WETTER



Die gemäßigte Zone Mitteleuropas liegt im Einflussgebiet kalter Polarluft und warmer südlicher Luftmassen. Ständige Luftdruckgegensätze und Temperaturunterschiede treiben eine Strömung an, die in wellenförmigem Muster den Globus von West nach Ost umkreist (Abb. 26). Diese „Westwinddrift“ mit den eingelagerten Tief- und Hochdruckgebieten ist für unser Wetter bestimmend:

Luftdruckunterschiede sind dabei die eigentlichen „Wettermacher“.

Das detaillierte Wettergeschehen ist allerdings so verwirbelt und verwickelt, dass wir es nur stichwortartig erklären wollen:

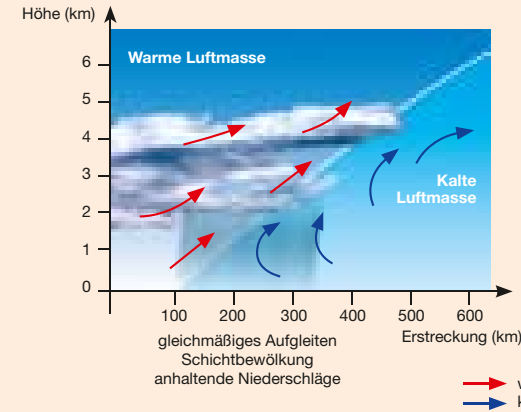
Denken wir zuerst an eine Wasserströmung, die ein Hindernis umfließt – etwa ein schneller Bach mit einem Stein darin. Hinter dem Stein bilden sich Verwirbelungen. Besonders stabile Wirbel können eine ganze Weile überleben und werden von der Strömung weit fortgetragen. Entsprechend entstehen auch in den sehr kräftigen Strömungen der hohen Atmosphäre ständig Wirbel, die mit der Drift von West nach Ost wandern. Große linksdrehende Wirbel (Zyklone) können sich dabei zu wetterwirksamen Tiefs entwickeln. Sie entstehen nur durch die großräumige Dynamik der Verwirbelung und sind keinesfalls durch Warmluft gekennzeichnet wie die thermischen Tiefs (S. 54). Allerdings steigen auch in diesen „dynamischen Tiefs“ die Luftmassen auf, so dass Wolkenbildung und Niederschlag auftritt. Nun kann es durch die Temperaturunterschiede

zwischen kalter Polarluft und aufsteigender feuchter Luft zu Rückkopplungen (Verstärkungen) kommen, die dazu führen, dass diese Wirbel eine hohe Eigendynamik entwickeln. Wenn sie ständig an Kraft zunehmen, kann die am Boden in das Tief einströmende Luft Sturmstärke erreichen: ein Sturmtief hat sich entwickelt.

Dagegen zeigen die Hochs (Antizyklone) auch in der Westwindzone ein viel ruhigeres Temperament. Sie entstehen zuerst ebenso durch Verwirbelungen in der hohen Atmosphäre, allerdings mit umgekehrtem Drehsinn. In der Höhe wird dabei Luft in sie hineingepumpt, die absinkt und am Boden ausströmt. Weil sich die Wolken dabei auflösen, ist tendenziell schönes Wetter zu erwarten. Durch das Zusammenwirken der Drift und der Wirbel können sich bisweilen tagelang stabile, ruhige Wetterverhältnisse („Hochdrucklage“) einstellen – im Gegensatz zu der heftigen Dynamik der Tiefdruckgebiete, die sich generell viel schneller entwickeln und weiter ziehen.

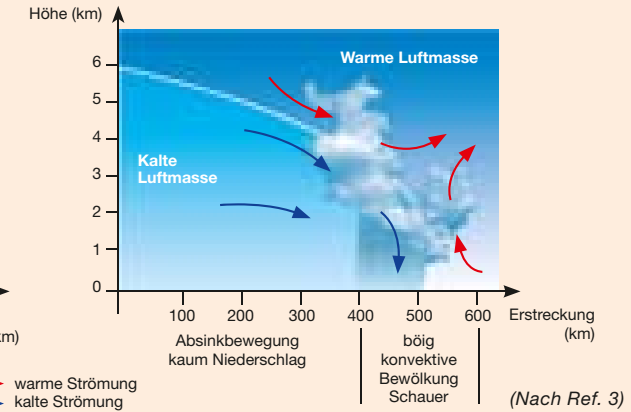
Wir halten fest, dass die Wettersituation in Deutschland entscheidend von drei Hauptakteuren in der hohen Atmosphäre bestimmt wird: Die wellenförmige Westwind-Driftströmung und die Wirbelbildungen mit unterschiedlichem Drehsinn, die sich zu Tiefs oder Hochs entwickeln können. Dazu kommt der Einfluss von Starkwinden (Jetstreams, S. 63). Das komplizierte Zusammenspiel der unterschiedlichen Luftströmungen wird durch Gleichungen beschrieben, deren Lösungen besonders empfindlich auf kleine Störungen der Anfangsbedingungen reagieren: Im mathematischen Sinne liegt ein „chaotisches System“ vor. Physikalisch handelt es sich dabei um die Dynamik der Verwirbelung bei dem sehr großräumigen Zusammentreffen von

### WARMFRONT



**Abb. 25a: Warmfront** mit „Landregen“. Eine warme Luftmasse wird allmählich auf eine kalte Luftmasse aufgeschoben. Die kalte Luft ist dichter, also schwerer und träger. Deshalb wird die leichtere warm-feuchte Luft angehoben und es regnet weiträumig, während es am Boden allmählich wärmer wird. Typische Situation: „Mairegen bringt Segen.“

### KALTFRONT



**Abb. 25b: Kaltfront.** Eine dichte, kalte Luftmasse fährt wie ein „Schneepflug“ unter eine leichtere warme Luftmasse und drückt sie sehr schnell in die Höhe. Es bilden sich hoch reichende (Gewitter-) Wolken, starke Turbulenzen und heftige Niederschläge, die zum Teil durch die kalte Luft hindurch fallen und dabei gefrieren. Die Temperatur am Boden sinkt schnell. Wintergewitter beruhen auf solchen Kaltfronten. Die zugehörige Wetterregel lautet: „Donner't's überm kahlen Wald, wird es ganz gewiss noch kalt.“ Vor allem aber können kräftige Kaltluftvorstöße in sommerliche, feucht-heiße Luftmassen zu schwersten Gewittern, Unwettern und Tornados führen.

kalter Polarluft und relativ warmer Subtropikluft an der „Polarfront“ im Übergangsbereich von der subpolaren zu der gemäßigten Zone.

Der generell notwendige Temperaturengleich zwischen der Äquatorregion und den Polen muss primär durch Nord-Süd- oder Süd-Nord-Strömungen bewirkt werden. Wenn man einen Globus betrachtet, sieht man sofort, dass bereits die Geometrie der Erdkugel für alle großräumigen und weit reichenden Strömungen in Nord- oder Südrichtung automatisch Ablenkungen von einer gleichmäßigen Strömung erzwingt, denn am Äquator ist der

Erdumfang maximal, in Richtung der Pole nimmt er ständig ab. Deshalb müssten alle großräumig polwärts strömenden Luftmassen zusammen gedrückt werden. Das geschieht natürlich nicht. Statt dessen weichen sie aus: in die Höhe oder in Richtung Erdoberfläche oder aber in West-Ost-Richtung. Großräumige Süd-Nord-Strömungen (oder in Gegenrichtung N-S) sind auch deshalb immer drehend und verwirbelnd. Der Effekt der Kugelform der Erde ist zusätzlich zur Corioliskraft wirksam. Die Jetstreams sind eine eindrucksvolle Konsequenz dieser komplizierten Strömungsdynamik. Sie entstehen in der hohen

## 12 DIE KLIMAZONEN DER ERDE

Troposphäre an den Grenzen zwischen sehr kalten und wärmeren Luftmassen, wobei die großen Temperaturunterschiede zu sehr hohen Luftdruckänderungen und damit zu Starkwinden führen. Deren Geschwindigkeit kann im Zentrum bis zu 500 km/h erreichen, so dass sie für die Luftfahrt durch Wirbelbildung gefährlich werden können. Die stark variierenden, mäanderförmigen Jetstreams beeinflussen auch unser Wetter und unser Klima (vgl. Wikipedia: Jetstream).

Derzeit können die Klimatologen nicht mit Sicherheit vorhersagen, in wie weit ein möglicher Klimawandel die Entwicklung und die Zugbahnen der für uns wetterbestimmenden Tiefs mit ihrer feuchten Atlantikluft und den Niederschlägen beeinflussen wird. Das ist bei einem chaotisch reagierenden System prinzipiell fast unmöglich.

Es gibt allerdings die Vermutung, dass sich alle Klimazonen etwas weiter polwärts ausdehnen könnten. Daraus könnte man folgern, dass sich bei uns in einem wärmeren Klima die Zugstraßen der Tiefs und damit auch der schweren Stürme etwas weiter nach Norden verlagern werden.

### Äquatoriale Regenzone (5°S – 10°N)

Ganzjährig regenreich, feucht, warm, viele Gewitter.

Beispiel: Tropische Regenwälder

### Tropische Sommerregenzone (10°N – 20°N, 5°S – 20°S)

Im jeweiligen Sommer feucht und regenreich  
Im jeweiligen Winter Hochdruckeinfluss, sonnig und trocken.

Beispiel: Südliches Indien, Karibik, Simbabwe

### Subtropische Trockenzone (20°N – 32°N, 20°S – 30°S)

Ständiger Hochdruckeinfluss, heiß und trocken.  
Beispiel: Sahara. Hier sinkt die Höhenluft vom Äquator kommend wieder ab. Über den Ozeanen bilden sich die Passatwinde als Gegenströmung.

### Subtropische Winterregenzone (32°N – 40°N, 30°S – 35°S)

Im Sommer Hochdruck, heiter, warm und trocken.  
Im Winter häufig ergiebige Niederschläge durch Westwinde.

Beispiel: Mittelmeer

### Gemäßigte Zone (40°N – 60°N, 35°S – 55°S)

Ganzjährig im Einfluss der Westwinde mit Hoch- und Tiefdruckgebieten, wechselnd bewölkt, häufige Niederschläge.

Beispiel: Mitteleuropa, einschließlich Deutschland

### Subpolare Zone (60°N – 80°N, 55°S – 70°S)

Ganzjährig im Bereich von Tiefdruckgebieten, kühl und niederschlagsreich, oft stürmisch.

Beispiele: Island, Tundren

### Polarzone (80°N – 90°N, 70°S – 90°S)

Ganzjährig im Bereich der absinkenden kalten Luftmassen der polaren Hochdruckgebiete, „ewiges Eis“, niederschlagsarm.

Beispiele: Arktis und Antarktis

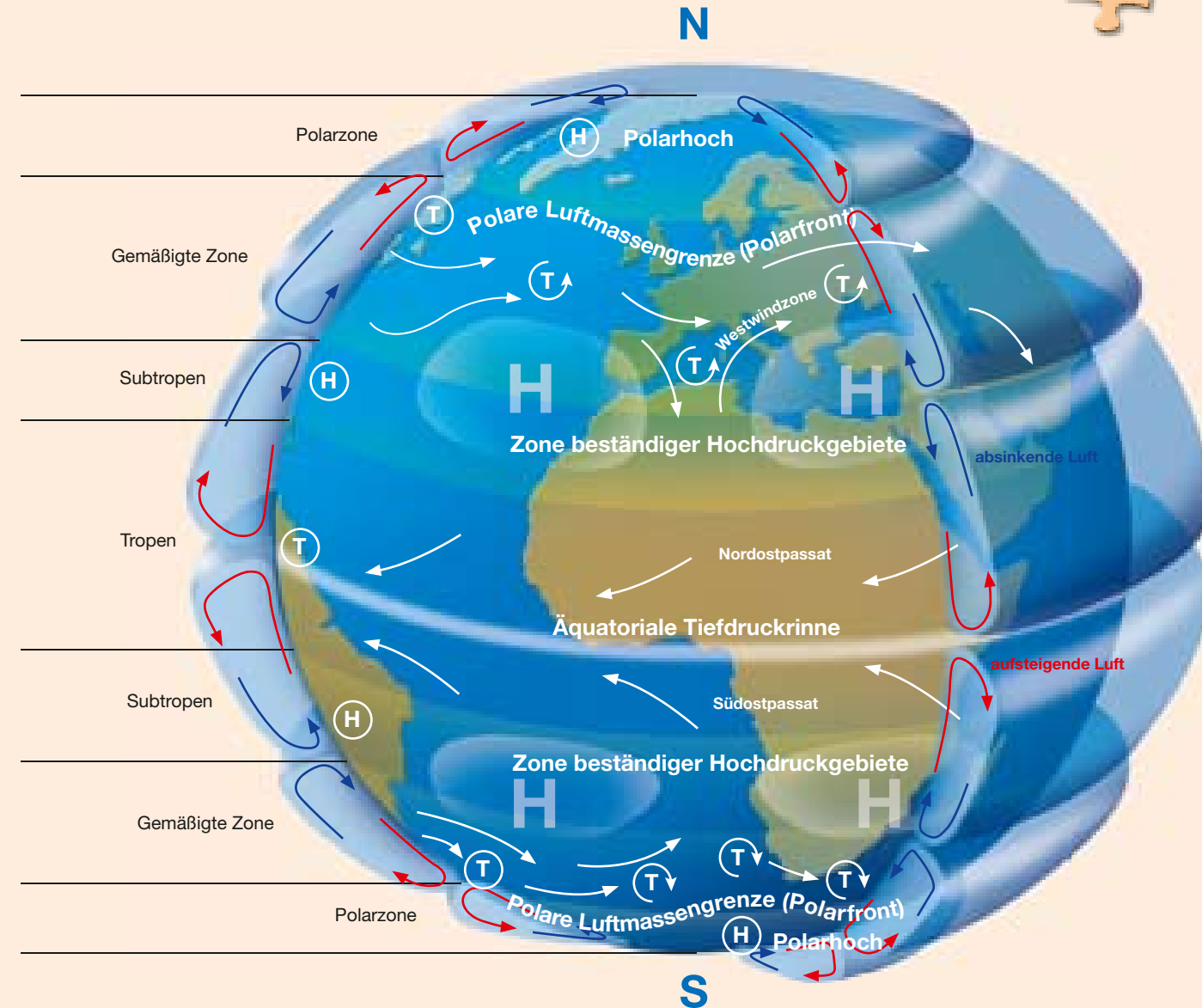


Abb. 26: Aufgrund der intensiven Sonneneinstrahlung im Äquatorgebiet und der globalen Zirkulation der Atmosphäre haben sich auf der Erde großräumige Klimazonen gebildet. Die Zellen (Zirkulationsräder) der vertikalen Luftströmungen sind vereinfacht dargestellt. Besonders im Bereich der gemäßigten Zonen und der dort herrschenden Westwinddrift existieren sie nicht in dieser einfachen Form, sondern sind aufgelöst in zahlreiche Tiefs und Hochs mit oft chaotischer Verwirbelung (nach Ref. 1, 3).

# 3

## DIE ENERGIEBILANZ IN DER ATMOSPHÄRE – DER TREIBHAUSEFFEKT

3.1 TEMPERATURAUSGLEICH. ....	68
3.2 EINE NACKTE FELSEN-ERDE IM WELTRAUM .....	70
3.3 DIE GENIALE WÄRMESCHUTZDECKE .....	72
3.4 DIE ATMOSPHÄRISCHE ENERGIEBILANZ – GENAUE WERTE .....	76
DIE BEITRÄGE DER SPURENGASE ZUM TREIBHAUSEFFEKT .....	78
DIE CO <sub>2</sub> -KONZENTRATION DER ATMOSPHÄRE .....	79



# TEMPERATURAUSGLEICH

Die vorhergehenden Seiten haben gezeigt, in wie überaus vielfältiger Weise unsere Atmosphäre auf Wärmezufuhr reagiert und wie dabei Wärmeenergie transportiert wird. Selbst die verzwickte Westwinddrift mit den Verwirbelungen von Warm- und Kaltluft bewirkt letztendlich einen Energiestrom vom warmen Süden zur kalten Polregion. Dabei ist anzumerken, dass jeder Kaltluftstrom nach Süden genauso effektiv für einen Ausgleich der Temperaturen sorgt wie ein Warmluftstrom in Gegenrichtung.

Dass Temperaturgegensätze sich ausgleichen wollen, ist ein physikalisches Grundgesetz.

Der dazu notwendige Energietransport kann durch ganz unterschiedliche Prozesse erfolgen:

- In einem festen Körper durch Wärmeleitung. Das feste Gestein der Erde leitet

Wärme aus dem Erdinneren zur Oberfläche, wie die Wand eines Kachelofens. Die beste Wärmeleitung findet man allerdings bei den Metallen.

- In Flüssigkeiten und Gasen außerdem durch Strömungen. Dazu zählen die Meeresströmungen und alle Winde mit ihren horizontalen und vertikalen Luftbewegungen. Außerdem gibt es starke temperaturbedingte „Konvektionsströmungen“ im flüssigen Inneren der Erde.
- Wenn die Strömungen zusätzlich Verdunstung und Kondensation bewirken, spielt der Transport von latenter Wärme eine wichtige Rolle.
- Wenn sich keine gerichtete Strömung ausbilden kann, ergibt sich oft eine ungeordnete Diffusion, die einen Temperatureausgleich bewirkt. Diffusion und Wärmeleitung sind physikalisch weitgehend gleichartig.

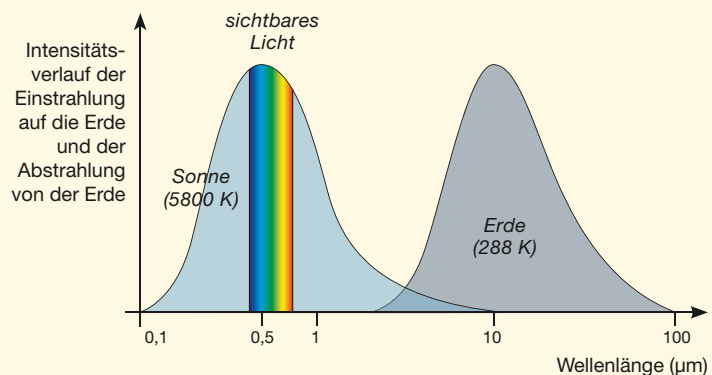
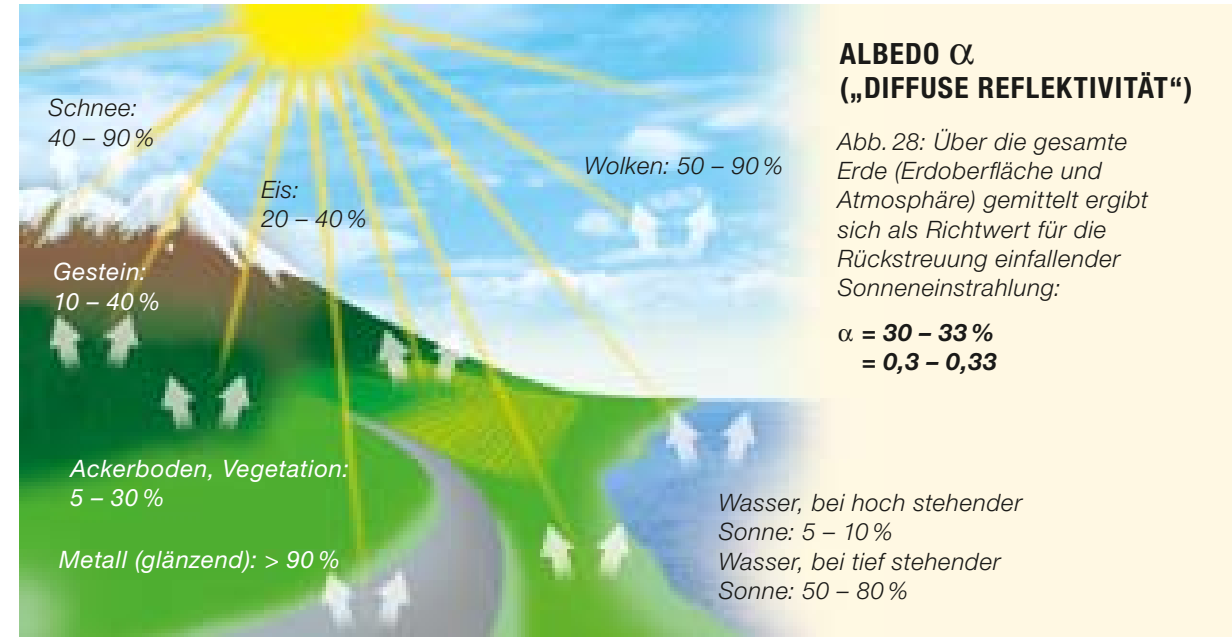


Abb. 27: Die 5800 K heiße Oberfläche der Sonne strahlt Licht über einen Wellenlängenbereich ab, der vom ultravioletten (UV) bis zu infraroten (IR) Teil des Spektrum reicht. Das Strahlungsmaximum liegt bei  $0,5 \mu\text{m}$  (sichtbares Grün-Blau).

Die Erde ist 288 K warm und strahlt ausschließlich infrarote Wärmestrahlung ab. Das Strahlungsmaximum liegt bei  $10 \mu\text{m}$ . Auf diese Weise strahlt die Erde die von der Sonne empfangene Energie wieder vollständig ins All ab. Selbstverständlich ist die Erde ein vergleichsweise schwacher Strahler, denn die Strahlungsleistung ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) der heißen Sonnenoberfläche ist nach dem  $T^4$ -Gesetz 164 000-mal höher.



## ALBEDO $\alpha$ („DIFFUSE REFLEKTIVITÄT“)

Abb. 28: Über die gesamte Erde (Erdoberfläche und Atmosphäre) gemittelt ergibt sich als Richtwert für die Rückstreuung einfallender Sonneneinstrahlung:

$$\alpha = 30 - 33 \% \\ = 0,3 - 0,33$$

Einen sehr leistungsfähigen Prozess haben wir allerdings bisher noch gar nicht betrachtet:

- Energie- und Wärmetransport ganz ohne stoffliche Beteiligung – die Strahlung.

Ob langwellige Radiowellen, Wärmestrahlung, Licht, Laserstrahlen oder kurzwellige Röntgenstrahlung – immer handelt es sich dabei um elektromagnetische Strahlung, die sich auch im Vakuum ausbreitet. Auch Wärmestrahlung ist von derselben physikalischen Natur. Es sind elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen im Mikrometerbereich, die wir als Wärmestrahlung wahrnehmen.

Alle Objekte senden ständig Wärmestrahlung aus. Dabei hängt die Abstrahlung („Emission“) sehr charakteristisch von der Temperatur ab.

Die Erde ist etwa 288 K (15 °C) warm und strahlt „nur“ infrarote Strahlung, also Wärme ab. Die emittierte (ausgesandte) Strahlungsleistung  $I$  steigt mit höherer Temperatur  $T$  zur

vierten Potenz an:  $I \sim T^4$ . Dabei verschiebt sich auch das emittierte Spektrum deutlich zu höheren Energien, wie die Abbildung 27 zeigt. Die sichtbare Sonnenoberfläche, die Photosphäre, hat eine Strahlungstemperatur von 5800 K und strahlt entsprechend weiß leuchtendes Licht ab.

Die Tatsache, dass wir den Mond und die Planeten am Nachthimmel leuchten sehen, liegt natürlich nicht daran, dass diese heiß sind. Sie werden von der Sonne beleuchtet und streuen das Sonnenlicht zum Teil zurück. Die dafür verantwortliche diffuse Reflektivität von Oberflächen spielt bei jeder Strahlungsbilanz eine wichtige Rolle und wird Albedo  $\alpha$  genannt. Bei Bestrahlung mit der Leistung  $I$  wird der Anteil  $\alpha \cdot I$  zurück gestreut und nur der Bruchteil  $(1 - \alpha) \cdot I$  kann absorbiert werden. Auch die Space Station ISS strahlt am Nachthimmel, weil sie zum Schutz gegen die Erwärmung durch die intensive Sonnenbestrahlung eine sehr helle Oberfläche ( $\alpha > 90 \%$ ) besitzt.

# EINE NACKTE FELSEN-ERDE IM WELTRAUM

Wir wollen jetzt einfache Modellvorstellungen betrachten, die für das Verständnis des Treibhauseffektes unerlässlich sind. Es lohnt sich, Schritt für Schritt mitzudenken.

Um den Einfluss unserer Atmosphäre auf Einstrahlung und Abstrahlung zu verstehen, betrachten wir zuerst einen Himmelskörper ganz ohne Lufthülle. In unserer Nachbarschaft bietet sich dafür der Mond an. Wie sieht die Energie- und Strahlungsbilanz auf dem Mond aus?

Die Sonne scheint auf seiner Tagseite genau so intensiv wie auf der Erde, während seine Nachtseite im Dunkeln liegt und durch Wärmeabstrahlung mächtig auskühlt. Die langen Mondnächte dauern ja 354 Stunden, und die ungeschützte Gesteinsoberfläche kühlt sich extrem schnell ab (vermutlich sogar unter  $-150\text{ }^\circ\text{C}$ ). **Insgesamt aber, im Langzeitmittel, muss die Wärmeabstrahlung ins All exakt der aufgenommenen Sonnenenergie entsprechen, denn der Mond wird nicht ständig wärmer.**

Die Einstrahlung von der Sonne beträgt bei uns  $1,368\text{ kW/m}^2$ . Die beleuchtete Halbkugel wird aber in Richtung der Pole zunehmend flacher bestrahlt, so dass pro  $\text{m}^2$  Oberfläche immer weniger Energie auftrifft. Die andere Halbkugel liegt derweil völlig im Dunkeln. Wie viel Energie erreicht die Mond- oder Erdoberfläche im zeitlichen und räumlichen Mittel? Eine kleine Überlegung zeigt, dass man die aufgenommene Gesamtenergie am

einfachsten aus der Querschnittsfläche  $Q$  bestimmt. Die Fläche des Erdschattens ist natürlich gleich groß:  $Q = \pi \cdot r^2$ . Das Verhältnis von  $Q$  zur Erdoberfläche ( $4 \cdot \pi \cdot r^2$ ) ist genau  $\frac{1}{4}$ , und man erhält deshalb für die mittlere Sonneneinstrahlung  $S_0$ :

$$S_0 = 1,368/4\text{ W/m}^2 = 342\text{ W/m}^2$$

Diese solare Einstrahlung muss vollständig wieder als langwellige Wärmestrahlung in den Weltraum abgestrahlt werden. Man kann aus der Strahlungsbilanz ganz leicht eine mittlere Temperatur des Mondes berechnen. Für die Bestimmung der aufgenommenen Leistung wird die Albedo von Fels mit  $\alpha = 0,3$  angesetzt. Das entspricht auch der Albedo der Erde.

Als Abstrahlungsgesetz gilt das einfache  $T^4$ -Gesetz des schwarzen Strahlers, das Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$I = \varepsilon \sigma T^4$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W/(m}^2\text{ K}^4)$  wird Strahlungskonstante genannt; die Emissivität  $\varepsilon$  kann für eine Abschätzung mit  $\varepsilon = 1$  angesetzt werden.

Die mittlere Einstrahlung  $I_s$  beträgt

$$I_s = (1 - \alpha) \cdot 342\text{ W/m}^2 = 239\text{ W/m}^2$$

Die mittlere Abstrahlung  $I_{out}$  ist gleich groß:

$$I_s = I_{out} = \varepsilon \sigma T^4$$

Diese Gleichung wird nach  $T$  aufgelöst und  $\varepsilon = 1$  gesetzt:

$$\begin{aligned} T &= \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha) \cdot I_s}{\varepsilon \sigma}} \\ &= \sqrt[4]{\frac{239}{5,7 \cdot 10^{-8}}}\text{ K} \\ &= 255\text{ K} \end{aligned}$$

Das war eine ziemlich einfache Rechnung mit sehr erstaunlichen Erkenntnissen:

- Unser Mond sollte demnach eine mittlere Temperatur von  $255\text{ K} = -18\text{ }^\circ\text{C}$  haben. Bei dieser Temperatur entspricht die Abstrahlung der Einstrahlung. Man könnte diese Temperatur vielleicht messen, wenn man ein tiefes Loch in den längst erkalteten Mond bohrt, denn viele Meter unter der Oberfläche müssen die großen Tag-Nacht-Schwankungen abklingen.
- Würde die Sonneneinstrahlung  $I_s$  aus irgendeinem Grund zunehmen, so müsste sich der Mond stärker erwärmen. Die Erwärmung kommt aber zum Stillstand, wenn die gestiegene Abstrahlung  $I_{out}$  das Gleichgewicht wieder hergestellt hat. Die  $T^4$ -Abhängigkeit der Abstrahlung bewirkt den Bilanzausgleich der Energieströme und die Einstellung einer Gleichgewichtstemperatur  $T$ .

- Weil genau dieselben Zahlenwerte für Einstrahlung und Albedo auch für die Erde gelten, wäre unser blauer Planet ohne seine wärmende Atmosphäre mit Sicherheit eine weiße Eiskugel.
- Die mittlere Albedo der Erde mit ihrer Lufthülle ist durch Satellitenmessungen zuverlässig bekannt und beträgt  $\alpha = 0,3$ . Damit würde sich auch für die Erde mit Lufthülle immer noch ein Zustand der totalen Vereisung ergeben.

Offensichtlich fehlt uns ein wichtiger Beitrag in unserer Energiebilanz.

In diesem Sinne wird das nächste Kapitel für uns alle „überlebenswichtig“.



# DIE GENIALE WÄRMESCHUTZDECKE – EIN EINFACHES MODELL

Wir haben für die „nackte Erde“ eine Oberflächentemperatur von  $255\text{ K} = -18\text{ °C}$  berechnet. Dabei spielt es keine Rolle, ob eine Atmosphäre vorhanden ist oder nicht, solange diese Atmosphäre „durchsichtig“ ist und keinerlei Strahlung absorbiert. Auch eine Atmosphäre nur aus Stickstoff und Sauerstoff und ganz ohne Spurengase würde diese Eigenschaft besitzen. Wir erweitern unsere Überlegungen und fügen hoch über der Erdoberfläche eine Spezialglas-Scheibe ein. Diese Glasscheibe soll das Sonnenlicht vollständig hindurch lassen, so dass die solare Einstrahlung die Erdoberfläche nach wie vor unverändert erreicht. Zusätzlich aber soll das Glas die langwellige, infrarote Wärmeabstrahlung von der Erdoberfläche nicht passieren lassen, sondern vollständig absorbieren. In begrenztem Umfang haben die Fensterscheiben zuhause tatsächlich diese Eigenschaft.

- Die atomaren Bindungen in einer Glasscheibe sind in ihrer Wirkung nämlich ähnlich den Molekülen von  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , Methan und anderen. Infrarote Wärmestrahlung wird absorbiert und in atomare Schwingungen verwandelt. Diese angeregten „heißen“ Schwingungszustände können die Wärmestrahlung auch wieder emittieren. Die Glasscheibe soll modellmäßig eine sehr hohe Konzentration von  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  und anderen Spurengasen darstellen.

Was ist die Konsequenz? Dazu müssen wir uns Abb. 29 genauer anschauen.

- Die Glasscheibe wird zwar nicht vom Sonnenlicht  $I_s$ , wohl aber von der Erdbstrahlung  $I_E$  zunehmend erwärmt. Ihre Temperatur steigt, und die Scheibe beginnt ihrerseits, Wärme abzustrahlen. Diese Abstrahlung erfolgt nun aber nach beiden Seiten:  $I_{GE}$  zeigt zurück zur Erdoberfläche und  $I_{GW}$  führt hinaus in den kalten Weltraum.

Damit bekommt die Erdoberfläche einen Teil ihrer Abstrahlung  $I_E$  zurück geliefert. Ohne jede Berechnungen erkennt man, dass nun auch die Erdoberfläche zusätzlich erwärmt wird.

Wir gehen schrittweise vor und können die gefundenen Zahlenwerte in die Abbildung 29 eintragen.

- Die einfallende solare Strahlung  $S_0$  ist bekannt:  
 $S_0 = 342\text{ W/m}^2$ .  
Das ergibt den Startwert von 100 %.
- Direkt diffus reflektiert wird der Anteil  $\alpha$ . Auch diese Strahlung wird nicht vom Glas absorbiert und wird wieder in den Weltraum abgestrahlt:  
 $I_R = 103\text{ W/m}^2$ , entsprechend 30 %.
- Die Erdoberfläche absorbiert den Anteil  $(1 - \alpha)$ :  $I_{\text{abs}} = 239\text{ W/m}^2$ , also 70 %.

Um uns die weiteren Überlegungen wesentlich zu erleichtern, betrachten wir nun direkt den End- oder Gleichgewichtszustand. In unserem Modell wird das Gleichgewicht erst dann erreicht, wenn die Glasscheibe so heiß geworden ist, dass die gesamte Abstrahlungsbilanz in den Weltraum der gesamten Einstrahlung  $S_0$  von der Sonne entspricht.

- Damit kennen wir  $I_{GW}$ :  
 $I_{GW} = 239\text{ W/m}^2$ . (Das sind 70 % von  $S_0$ .)
- Allerdings strahlt die Glasscheibe ungerichtet **nach beiden Seiten gleich stark** ab. Ihre Abstrahlung beträgt

$$I_{GW} + I_{GE} = 2 \cdot I_{GW} = 478\text{ W/m}^2$$

Also muss sich nach einiger Zeit einstellen:

$$S_0 = I_R + I_{GW}$$

## ZUM MIT-DENKEN: DIE ABSTRAHLUNGSBILANZ IM MODELL

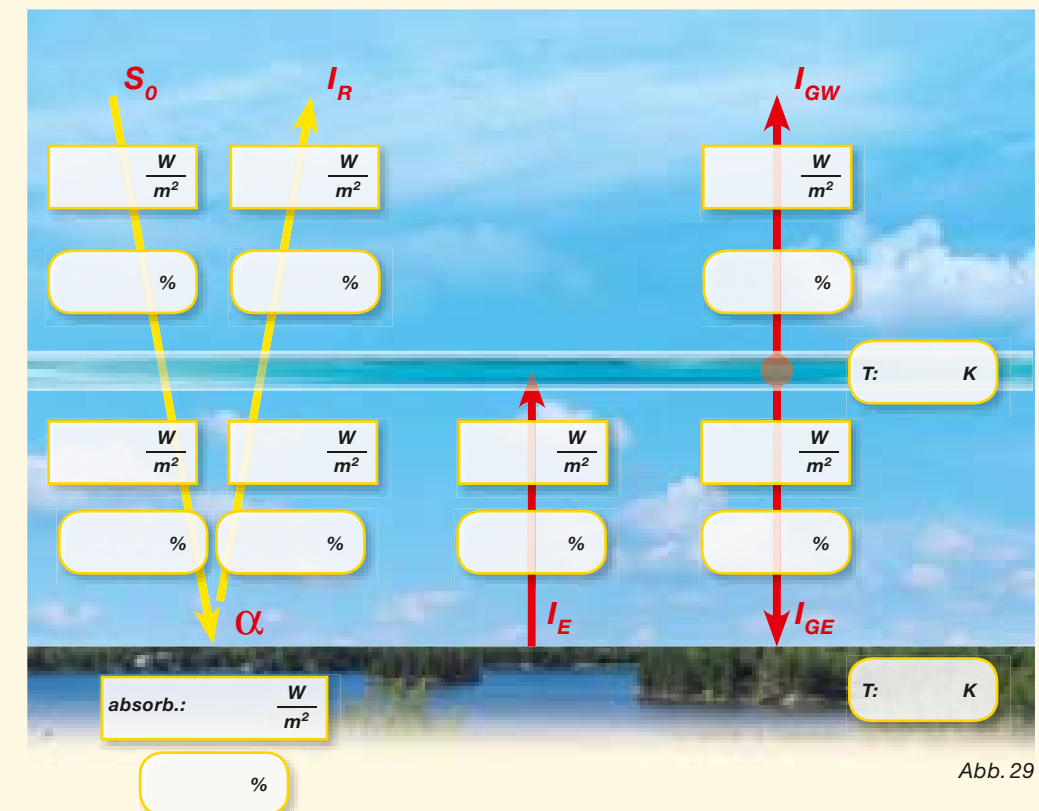


Abb. 29

6. Um die Bilanz auszugleichen, muss die Abstrahlung  $I_E$  von der erwärmten Erdoberfläche diese Abstrahlung ausgleichen und die dafür benötigte Leistung beträgt demnach:  
 $I_E = 478 \text{ W/m}^2$

Das ist wirklich ganz erstaunlich, denn dieser Wert ist doppelt so groß wie die von der Oberfläche direkt absorbierte Sonneneinstrahlung  $(1 - \alpha) S_0 = 239 \text{ W/m}^2$ !

Tatsächlich ist die Bilanz der Energieströme jetzt widerspruchsfrei und ausgeglichen. Allerdings erscheint das Ergebnis nicht besonders plausibel, denn wir staunen über die hohe Wärmeabstrahlung der Erdoberfläche in Richtung Glasscheibe.

Erst nach einer Verschnaufpause kann man begreifen, dass der „Sonnenmotor“ einen mächtigen umlaufenden Energiestrom zwischen Erde und Glasscheibe antreibt. Tatsächlich ergibt sich in diesem Modell ein Energiestrom hin und her durch die Atmosphäre, der offensichtlich viel kräftiger ausfällt als die gesamte absorbierte Einstrahlung von  $239 \text{ W/m}^2$ .

Ist das Zauberei und eine Verletzung der Energieerhaltung? Keineswegs. Der einzig wirksame Verlustmechanismus ist ja die Abstrahlung in den Weltraum und das Verschieben von Energie ist vergleichbar mit dem Anschieben von Güterwagen auf einem kreisförmigen Gleis: Solange die Reibungsverluste unsere Antriebsleistung nicht aufzehren, werden die Wagen immer schneller und ihre kinetische Energie nimmt ständig zu. Diese „Strahlungszirkulation“ muss sich wie ein atmosphärisches vertikales Zirkulationsrad aufschaukeln, weil wir die direkte Wärmeabstrahlung von der Erdoberfläche ins All voll-

ständig unterbunden haben. Ausschließlich die Glasscheibe stellt die wirksame Abstrahlungsschicht dar. Sie besitzt eine charakteristische Temperatur  $T_s$ . Die Glasscheibe hat allerdings zwei Oberflächen, von denen nur die eine ins All abstrahlen kann, während die andere zur Erde gerichtet ist. Beide Flächen strahlen nach dem  $T^4$ -Gesetz ab.

7. Weil die Abstrahlung ins All  $I_{GW} = 239 \text{ W/m}^2$  dem  $T^4$ -Gesetz folgt, erhalten wir sofort die Temperatur der Scheibe:

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{239}{5,7 \cdot 10^{-8}}} \text{ K}$$

$$= 255 \text{ K}$$

Die Temperatur der Glasscheibe von 255 K ( $-18^\circ\text{C}$ ) entspricht also der des „nackten“ Felsenmondes.

8. Für die Temperatur der Erdoberfläche sieht es jetzt günstiger aus: Die Abstrahlung von  $478 \text{ W/m}^2$  bedingt eine Temperatur, die um  $\sqrt[4]{2} = 1,189$  höher ist. Wir erhalten nun  $T_E = 303 \text{ K}$  ( $30^\circ\text{C}$ ). Die Glasplatte bewirkt eine so kräftige Rückstrahlung, so dass die Oberflächentemperatur der Modellerde um  $48^\circ\text{C}$  ansteigt. Unser Modell ergibt damit einen etwas zu kräftigen Treibhauseffekt. In unserer Bilanz wird die Wärmeabgabe der Erdoberfläche ja vollständig von der Atmosphäre (Glasscheibe) absorbiert und danach zur Hälfte von dort wieder zurück gestrahlt. Nur die Atmosphäre strahlt direkt in den Weltraum ab.

Abb. 30: Dieses wundervolle Foto wurde aus dem Shuttle Discovery aufgenommen (1999). Es zeigt in eindrucksvoller Weise, welche dünne Schicht die sichtbare Atmosphäre bildet. Sichtbar ist nur die Troposphäre mit ihrer ausreichenden Partikelkonzentration. Die sehr hohe Atmosphäre bleibt unsichtbar. Die Assoziation an eine wärmende hauchdünne Schutzschicht um die im kalten Weltraum schwebende Erdkugel ist naheliegend und sehr zutreffend.



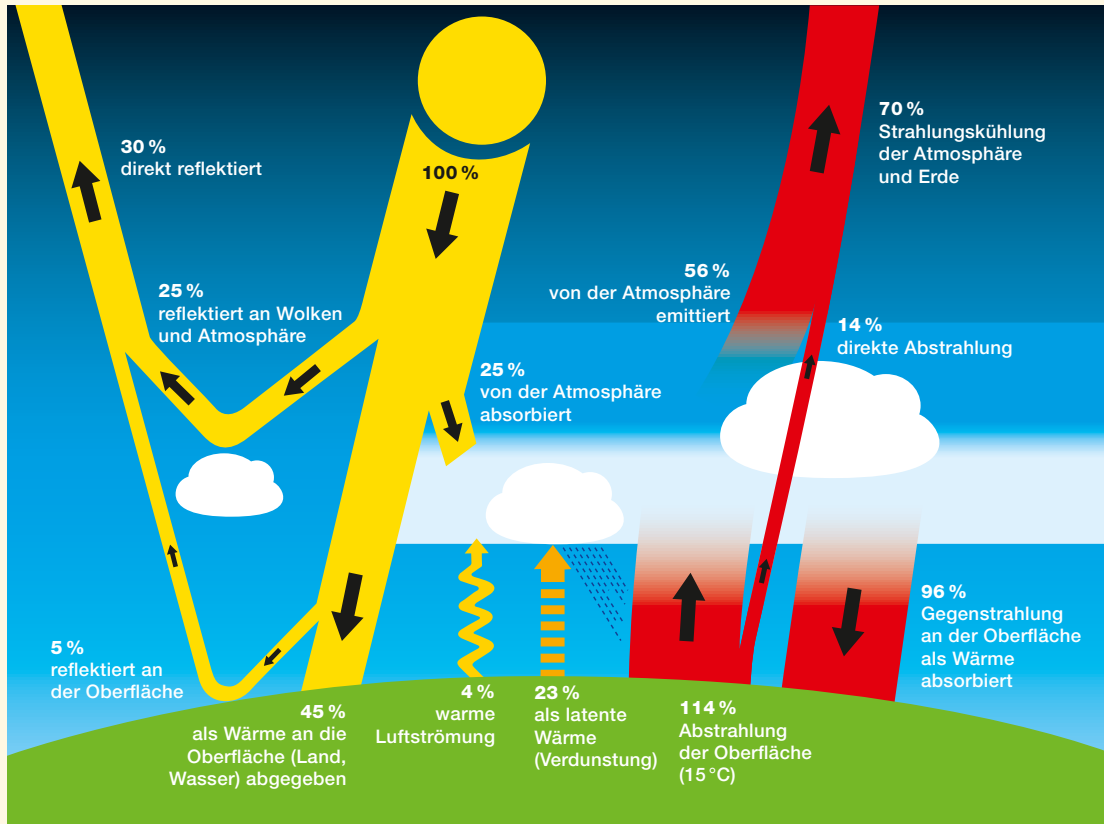
Fairerweise legen wir an dieser Stelle den Bleistift zur Seite und beenden unsere Modellrechnung. Wenn man nämlich die Literatur studiert, findet man immer wieder „einfache Rechnungen“, die sogar richtige Ergebnisse liefern, weil sie im Hinblick auf das Endergebnis frisiert wurden. Wenn wir wollten, könnten auch wir im nächsten Schritt unsere Resultate anpassen, indem wir die Glasscheibe etwas durchlässiger für Wärmeabstrahlung und damit etwas weniger wirksam machen. Das wäre durchaus realistisch, denn die Spurengase in der Atmosphäre sind natürlich nicht 100 % strahlungsundurchlässig. Oder wir könnten mehrere Scheiben hintereinander anordnen, um ein Temperaturprofil der Atmosphäre zu simulieren. Auch das ist nicht dumm. Außerdem könnten wir die Scheiben ein wenig von der einfallenden Sonneneinstrahlung erwärmen lassen. Stimmt genau, so ist das ja auch mit dem Ozon in der hohen Atmosphäre. Ach ja, und dann müssten wir auch noch ganz dringend den Wasserdampf und die Wolken

und die Schmutzpartikel in der Luft hinzunehmen.

Wir erkennen daran, dass eine einigermaßen korrekte Energiebilanz sehr viel mehr Faktoren einschließen muss und schauen uns deshalb jetzt lieber die Resultate genauer Messungen und zuverlässiger Berechnungen an.

Dennoch, lehrreich ist das Modell dieser schwebenden Glasscheibe schon – und zahlenmäßig höchst erstaunlich. Übrigens: Die untere Atmosphäre (Troposphäre) enthält ca. 75 % der Luftmasse und ist mit rund 10 km Höhe im Verhältnis zum Erddurchmesser (12 700 km) nur eine hauchdünne Schutzschicht. Wer als Ersthelfer bei Unfällen gelernt hat, wie ein Verletzter mit einer hauchdünnen, reflektierenden Rettungsfolie vor Auskühlung geschützt werden kann, darf dabei auch an die Erde und ihre wärmende Atmosphäre denken.

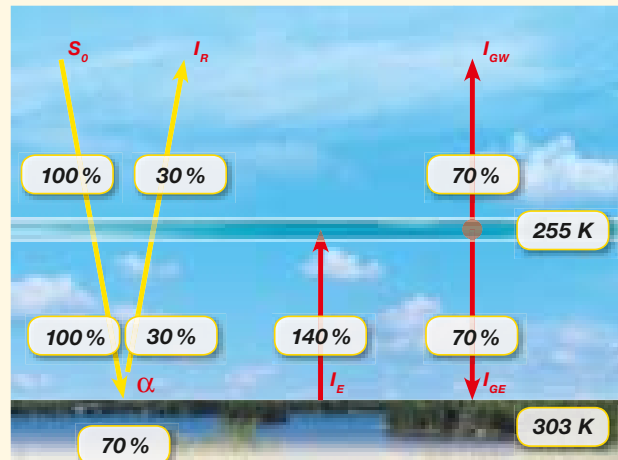




■ Das Sonnenspektrum enthält viele Wellenlängen ■ Wärmestrahlung

Abb. 31: Die dargestellten Energieströme sind mittlere gegenwärtige Werte auf die mittlere Einstrahlung  $S_0$  bezogen:  $S_0 = 342 \text{ W/m}^2 = 100\%$ . Die Energieströme ergeben sich aus den langjährigen globalen Messwerten und einem physikalischen Modell der Atmosphäre. Im Vergleich zu anderen Datensätzen ergeben sich geringfügige, nicht entscheidende Abweichungen, die auf die unterschiedlichen Modelle und Mittelungen für die globalen Prozesse zurückzuführen sind. Alle entscheidenden Größen in der Energiebilanz sind unstrittig (nach Ref. 1, 3, IPCC).

Die Energieströme in dem einfachen Modell der „schwebenden Glasscheibe“ (Abb. 29) zum Vergleich.



# DIE ATMOSPHÄRISCHE ENERGIEBILANZ – GENAUE WERTE

Wenn wir nach unseren erstaunlichen Berechnungen nun in der Abbildung 31 die tatsächlichen Energieströme betrachten, so sehen wir, dass 30% der einfallenden Strahlung  $S_0$  direkt reflektiert werden. Das ist genau dieselbe Albedo wie in unserem Modell. Zusätzlich werden 25% der Einstrahlung bereits direkt in der Atmosphäre absorbiert und erwärmen die Luft über uns. Nur 45% erwärmen die Erdoberfläche, viel weniger als im Modell. Die Erde gibt ihre Wärme in Form von Wärmeleitung, Konvektion, Verdunstung und Abstrahlung ab – allerdings ebenso wie im Modell fast nur an ihre Atmosphäre. Nur ein sehr geringer Teil der Abstrahlung (14% von  $S_0$ ) schafft es, durch die Atmosphäre hindurch direkt ins All zu verschwinden. In diesem Sinn war unsere schwebende Glasscheibe eine zutreffende Vorstellung. Deshalb ist auch die reale Atmosphäre entscheidend für die Abstrahlung ins All. Sie emittiert 56% von  $S_0$ . Die Rückstrahlung zur Erdoberfläche fällt mit 96% sogar noch intensiver aus. Hier wirkt sich vor allem die Tatsache aus, dass die reale Lufttemperatur mit zunehmender Höhe stark abnimmt, während die Modellglasscheibe nur eine einzige feste Temperatur besaß. Tatsächlich erreichen uns etwa 2/3 der Gegenstrahlung aus einer Höhe unter 100 m. Tiefe Wolken bilden eine besonders gute Wärmedecke. Bemerkenswert ist jedoch, dass die starke reale energetische Zirkulation von 127% (aufwärts gerichtet) und 96% abwärts gerichteter Rückstrahlung gar nicht so schlecht von unserem Modell wiedergegeben wurde.

Erst nach einer Berücksichtigung der zahlreichen Einzelprozesse kann man mit Hilfe von aufwändigen Klimamodellrechnungen auch den

richtigen Wert für die Temperatur erhalten:

Die mittlere Oberflächentemperatur der Erde liegt derzeit bei  $15^\circ\text{C}$  (288 K), und der natürliche Treibhauseffekt beträgt demnach 33 K.

In unserem Modell wurde die Gesamtkühlung der Erdoberfläche allein durch die Abstrahlung in eine aufgeheizte Atmosphäre erreicht. Deshalb ergab sich ein Treibhauseffekt von 48 K. Tatsächlich aber wird die Kühlung der Erdoberfläche zu etwa einem Viertel durch Verdunstung, Wärmeleitung und Konvektion bewirkt.

In diesem Kapitel sind wir bisher immer von einem Temperaturwert für die ganze Erde ausgegangen. Das ist nicht unproblematisch, denn heiße Klimazonen strahlen (wegen  $T^4$ ) viel intensiver als kalte Polargebiete. Deshalb muss man für genauere Berechnungen die orts- und zeitabhängige Strahlungsbilanz (jeweils lokal proportional  $T^4$ ) für alle Klimazonen getrennt aufstellen. Für eine globale Bilanz darf man nur die erhaltenen Abstrahlungswerte addieren.

Wir beschließen das Kapitel mit einer weitergehenden Erkenntnis. Bisher haben wir den zunehmenden Treibhauseffekt ausschließlich mit einer stärkeren Rückstrahlung innerhalb der Erdatmosphäre erklärt: Die bodennahe Lufttemperatur steigt dabei an, weil die „atmosphärische Wärmedecke“ etwas effektiver wird. Die Abstrahlung ins All sollte sich dabei nicht verändern und genau gleich groß wie die Einstrahlung von der Sonne sein. Wir haben also stillschweigend angenommen, dass die Energiebilanz der Erde gegenüber dem Weltall

**TAB. 2: DIE BEITRÄGE DER WICHTIGSTEN SPURENGASE ZUM NATÜRLICHEN TREIBHAUSEFFEKT (33 °C)**

Molekül	Konzentration	Effektive Temperaturerhöhung	Relativer Beitrag zum natürl. Treibhauseffekt
<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>2,6 %</b>	<b>20 °C</b>	<b>60 %</b>
<i>Sehr stabiles Molekül, auch als Dampf theoretisch unbegrenzt verfügbar. Weil der Dampf im thermischen Gleichgewicht mit flüssigem Wasser steht und nach 10 Tagen wieder ausregnet, ist H<sub>2</sub>O ungefährlich. Zusätzlicher Wasserdampf von der durch den Treibhauseffekt erwärmten Erdoberfläche und aus den Meeren verstärkt die Wirkung der anderen Spurengase. Für eine „explosionsartige Selbstverstärkung“ des Wasserdampf-Treibhauseffektes durch Dampfbildung aus den Ozeanen ist die Erde aber viel zu kalt.</i>			
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>387 ppm = 0,0387 %</b>	<b>8,6 °C</b>	<b>26 %</b>
<i>Sehr stabiles Molekül, Partner verschiedener Kohlenstoffkreisläufe. Verbleib in der Luft: ca. 10 Jahre in biologischen Kreisläufen, aber sicher weit über 100 Jahre bei der Verbrennung fossiler Energieträger. Man schätzt, dass eine Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu einer Temperaturerhöhung um mindestens 3 °C führt (Naiv würde man sogar für eine Verdopplung einen Temperaturanstieg um weitere 8,6 °C erwarten).</i>			
<b>O<sub>3</sub></b>	<b>0,04 ppm</b>	<b>2,3 °C</b>	<b>7 %</b>
<i>Hochwirksam, obwohl nur in sehr geringer Konzentration vorhanden. O<sub>3</sub> entsteht aus O<sub>2</sub> unter UV-Einwirkung, vgl. Seite 48.</i>			
<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>0,32 ppm</b>	<b>1,3 °C</b>	<b>4 %</b>
<i>„Lachgas“. Es entsteht u. a. bei übermäßiger Stickstoffdüngung und als Nebenprodukt bei Verbrennungsreaktionen. Lebensdauer: 100 Jahre.</i>			
<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>1,8 ppm</b>	<b>1 °C</b>	<b>3 %</b>
<i>Methan („Sumpfgas, Erdgas, Faulgas“) entsteht bei vielen biologischen Prozessen, so auch in Reisfeldern und Rindermägen, vgl. S. 155. Hochwirksam, Lebensdauer in der Luft: ca. 12 Jahre.</i>			

## DIE ANTHROPOGENEN EMISSIONEN

Die **anthropogenen Emissionen** bewirken einen Anstieg des Treibhauseffektes. Der resultierende globale Erwärmungstrend beträgt +0,7 °C für den Zeitraum von 1901 bis 2000.

**Dieser Trend über die letzten 100 Jahre beträgt für Deutschland +1 °C.**

Zu diesem Temperaturanstieg von 1 °C trugen die anthropogenen Spurengasemissionen wie folgt bei:

**CO<sub>2</sub>: +0,77 °C; CH<sub>4</sub>: +0,14 °C; N<sub>2</sub>O: +0,08 °C;**

Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) insgesamt etwa 1 % (= 0,01 °C).

**Die CO<sub>2</sub>-Emissionen stellen derzeit offensichtlich das größte Problem dar.**

zu 100% ausgeglichen sei. Das kann aber nicht exakt richtig sein, weil eine globale Erwärmung auch mit einer erheblichen Energiezufuhr verbunden sein muss.

Satellitendaten und Klimamodelle zeigen nun, dass sich der Strahlungshaushalt der Erde gegenüber dem Weltraum derzeit nicht vollständig im Gleichgewicht befindet. **Die im Mittel eingestrahelte Leistung von 342 W/m<sup>2</sup> ist um ca. 0,85 W/m<sup>2</sup> höher als die Abstrahlung der Erde** (J. Hansen et al., SCIENCE 308, p.1431, Juni 2005). Die über das Jahr gemittelte globale Strahlungsbilanz gegenüber dem Weltall ist derzeit nur zu 99,75% ausgeglichen, so dass die Erde etwas mehr Energie aufnimmt als sie ab-

gibt. Deshalb ist die Oberflächentemperatur der Ozeane in den letzten 100 Jahren um ca. 0,7 °C angestiegen und die dadurch bewirkte Ausdehnung des Meerwassers kann von Satelliten aus gemessen werden. Diese Beobachtung ist um so bedeutsamer, weil die gewaltige Wärmekapazität der Ozeane jede globale Temperaturänderung verlangsamt und zu Einstelzeiten von Jahrhunderten oder sogar Jahrtausenden führt, bis sich neue Gleichgewichtswerte einpendeln können. Die große Trägheit des Klimasystems birgt die Gefahr, die nur schleichend ablaufenden gewaltigen Prozesse in ihren langfristigen Auswirkungen zu unterschätzen. Wenn wir das fünfte und sechste Kapitel studieren, sollten wir uns gut daran erinnern.

## DIE CO<sub>2</sub>-KONZENTRATION DER ATMOSPHÄRE

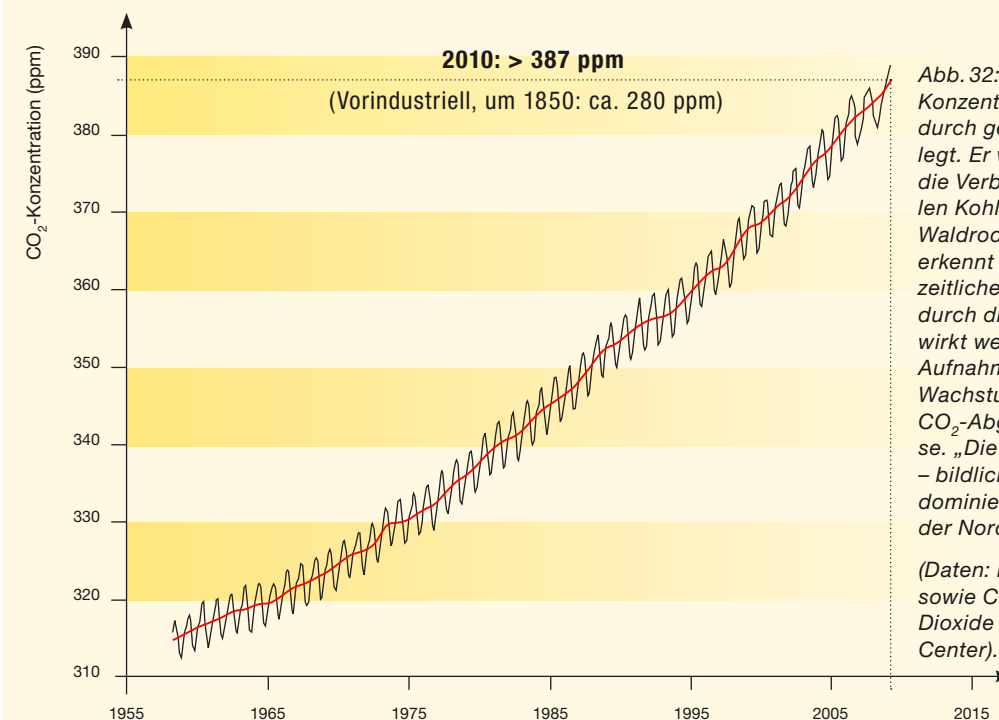


Abb. 32: Der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration ist seit 1958 durch genaue Messwerte belegt. Er wird vor allem durch die Verbrennung des fossilen Kohlenstoffs und durch Waldrodungen bewirkt. Man erkennt überlagerte jahreszeitliche Schwankungen, die durch die Vegetation bewirkt werden: Eine deutliche Aufnahme von CO<sub>2</sub> in der Wachstumsperiode und eine CO<sub>2</sub>-Abgabe in der Ruhephase. „Die Erde lebt und atmet“ – bildlich gesprochen. Dabei dominiert die Vegetation auf der Nordhalbkugel.

(Daten: Mauna Loa, Hawaii, sowie CDIAC – US Carbon Dioxide Information Analysis Center).

# DAS KLIMA DER ERDE IM RÜCKBLICK

4.1 STERNENSTAUB UND DIE HÖLLE AUF ERDEN . . . . .	82
4.2 DIE ERDE HÜLLT SICH IN EINEN DICKEN MANTEL AUS WASSER . . . . .	87
4.3 DIE „ZWEITE“ ATMOSPHÄRE SORGT FÜR EIN WARMES KLIMA . . . . .	88
4.4 DIE PHOTOSYNTHE ERSCHAFFT DIE „DRITTE“ ATMOSPHÄRE . . . . .	89
4.5 VEREISUNG UND VULKANISMUS . . . . .	90
DER GEOLOGISCHE KOHLENSTOFFKREISLAUF . . . . .	92
4.6 EISESKÄLTE, TREIBHAUSHITZE, BIO-KATASTROPHEN – EXTINKTIONEN UND NEUES LEBEN. . . . .	94
4.7 WANDERNDE KONTINENTE UND GROSSE ÜBERFLUTUNGEN. . . . .	98
4.8 VON DER WÄRME IN DIE RÄTSELHAFTEN VEREISUNGEN . . . . .	103
DAS KLIMA SEIT DEM KAMBRIUM . . . . .	104
DIE ERDBAHN UND DAS RÄTSEL DES RHYTHMUS. . . . .	107
DAS KLIMAARCHIV IM EIS . . . . .	109
DAS EISZEITPUZZLE DER GEGENWART . . . . .	111
KOHLENSTOFFINVENTAR UND -FLÜSSE . . . . .	114
GLETSCHER . . . . .	116
EIN VERGLEICH: 4 560 MILLIONEN JAHRE. . . . .	118



# STERNENSTAUB UND DIE HÖLLE AUF ERDEN

Die Erde ist ein sehr junger Himmelskörper. Die Geschichte der Erde beginnt vor 4,56 Milliarden Jahren. Damals lag der Urknall bereits 9,1 Milliarden Jahre zurück. Unvorstellbar viele Sterne hatten ihren vollen Lebenszyklus bereits durchlaufen. In ihnen waren vielfältige Kernreaktionen abgelaufen. Dabei wurden alle Elemente, die ganze Fülle des periodischen Systems, in gewaltigen Mengen produziert. In finalen Explosionen wurden sie ins All hinaus geschleudert. So konnte sich unser Sonnensystem aus den Überresten bereits vergangener Welten bilden und war nicht nur auf die reichlich vorhandenen primären Gase Wasserstoff und Helium angewiesen. Unter dem Einfluss der Gravitation verdichtete sich die weit ausgedehnte, dünne Materiewolke. Sie enthielt neben Wasserstoff und Helium den besonders wertvollen Sternenstaub in Form der chemischen Elemente, dazu viel Eis und uralte Gesteinsbrocken. Überall, wo zufällig viel Masse zusammenkam, sammelte sich immer mehr an. Die Sonne und ihre Planeten sind so entstanden.

Wenn Materie im Weltraum zusammentrifft, wird die Gravitationsenergie beim Aufprall freigesetzt. Weil alle Neuankömmlinge in Form eines gewaltigen Bombardements auf der jungen Erde eintrafen, wurde sie immer heißer und schmolz zeitweilig regelrecht

auf. In diesem Zustand sinken die schweren Elemente wie Nickel und Eisen zum Zentrum ab, während die leichteren Elemente aufschwimmen. Aus ihnen bildete sich später die Gesteinshülle.

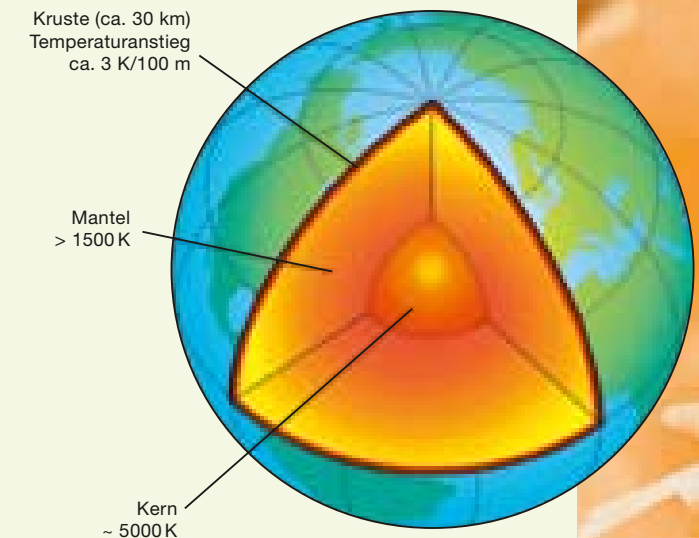
Die ersten 700 Millionen Jahre der jungen Erde waren so gewalttätig, dass sie als Höllezeitalter (Hadean) bezeichnet werden. Bei Zusammenstößen mit gewaltigen Brocken wurden sogar mehrfach riesige Stücke aus der Erde heraus geschlagen. Aus diesen Trümmern hat sich anschließend der Mond geformt.

Die erste Atmosphäre der Erde bestand aus den allgegenwärtigen Gasen Wasserstoff und Helium. Außerdem wurde auch in der frühen Periode ständig Eis aus dem Weltall aufgesammelt, aber in der gewaltigen Hitze gingen die Gase und der Wasserdampf wieder verloren.

Erst am Ende der Höllezeit war unser Sonnensystem durch die Anziehungskräfte der schweren Planeten von den gefährlichen großen Brocken weitgehend gesäubert. Nun kam die junge Erde ein wenig zur Ruhe. Eine dünne Oberflächenschicht kühlte sich ab und verfestigte sich. Unter dieser isolierenden Gesteinsschicht allerdings blieb es höllisch heiß. Nach wie vor ist die feste Kruste dünn und sehr verletzlich. Unter den Ozeanen ist sie an manchen Stellen mit nur 4–7 km Dicke am zartesten. Die Kontinentalplatten sind inzwischen über 100 km dick und deshalb et-

was stabiler, aber sie schwimmen noch immer auf dem flüssigen Erdinneren und verändern dabei ständig ihre Position – wie dicke Brotstücke auf einem blubbernden Käsefondue. Mit zunehmender Tiefe steigen die Temperaturen auch heute noch bis auf unglaubliche 5000 Grad an. Dazu trägt neben der Radioaktivität auch die Restwärme aus der heißen Ursprungsphase bei.

*Abb. 33: Im Kern ist unsere Erde vermutlich 5000 bis vielleicht 7000 Grad heiß – genauere Werte kennt man noch nicht. Das ist vergleichbar mit der Temperatur der Sonnenoberfläche! Etwa die Hälfte der Erdwärmeenergie stammt noch immer aus der Zeit der Erdentstehung vor 4,6 Milliarden Jahren. Das ist erstaunlich, denn vor 4 Milliarden Jahren war die Erdoberfläche schon kalt genug für die Entstehung des Lebens. Die andere Hälfte der Erdwärme ist vermutlich auf die Radioaktivität natürlicher langlebiger Isotope im Erdinneren zurückzuführen. Obwohl der Erddurchmesser 12 700 km beträgt, ist die starre Lithosphäre, auf der wir leben, nur 30 – 100 km dick. Maßstäblich auf dieser Abbildung wäre das eine 0,3 mm dicke Schale.*







## SEHR UNGLEICHE GESCHWISTER

Alle Planeten unseres Sonnensystems sind etwa zur selben Zeit entstanden: vor 4,56 Milliarden Jahren. Nur die vier inneren Planeten, Merkur, Venus, Erde und Mars, haben eine feste Gesteinsoberfläche gebildet, weil sich die schweren Elemente bevorzugt im starken Gravitationsfeld nahe der Sonne zusammen gefunden haben. Dagegen bestehen die äußeren Planeten aus großen Gaszusammenballungen, wie ja auch die Sonne selbst fast nur aus Gas besteht: 74 % Wasserstoff plus 25 % Helium.

Die Sonne liefert Strahlungsenergie an alle Planeten – aber in sehr unterschiedlichem Maße, denn die empfangene Leistung sinkt mit dem Quadrat des Abstandes.

Betrachten wir zuerst den sonnennächsten Planeten, den Merkur. Er wird auf seiner Tagseite regelrecht gegrillt, denn sein geringster Abstand zur Sonne beträgt nur 0,31 AE, also 31 % des Sonnenabstandes unserer Erde (1 AE = 1 Astronomische Einheit und entspricht dem Abstand Erde – Sonne, also etwa 150 Millionen km). Deshalb ist die Einstrahlung auf dem Merkur bis zu neunmal höher als bei uns und seine Oberfläche wird bis zu 460 °C heiß. In diesem Klima kann es kein Leben geben. Auf seiner Nachtseite sinkt

die Temperatur genau wie auf dem Mond rapide unter –150 °C, denn der Merkur besitzt keine schützende Atmosphäre.

Ganz anders ist die Situation auf dem weit entfernten Neptun. Dieser Planet am äußeren Rand des Sonnensystems muss sich mit einer sehr schwächlichen Sonneneinstrahlung begnügen. Der Neptun ist 30 AE von der Sonne entfernt. Deshalb ist die solare Einstrahlung dort 900 mal schwächer als bei uns. Während auf der Erde die volle Einstrahlung an einem wolkenlosen Sommertag etwa 1 kW/m<sup>2</sup> ausmacht, bleibt für den Neptun nur ca. 1 W/m<sup>2</sup> übrig: Das entspricht einem Taschenlampenbirnchen pro Quadratmeter. Deshalb ist die Wasserstoff- und Heliumatmosphäre des Neptun auch bitter kalt: unter –200 °C. Die vorbei fliegende Raumsonde Voyager 2 hat gezeigt, dass es in dieser kalten Atmosphäre gewaltige Stürme gibt. Das ist völlig rätselhaft, denn von der überaus schwachen Sonneneinstrahlung kann dieses Klimaphänomen nicht angetrieben werden.

Wenn man vom „gegrillten“ Merkur absieht, könnten drei der Gesteinsplaneten belebt sein. Unser Schwesterplanet Venus ist der Erde sogar recht ähnlich. Venus ist ungefähr so groß wie

die Erde und 0,72 AE von der Sonne entfernt. Die solare Einstrahlung ist deshalb doppelt so intensiv wie bei uns. Weil die Venus eine sehr dichte Atmosphäre hat, die ausgleichend wirken könnte, wäre ein angenehmes Klima möglich. Unter der schützenden Wolkendecke vermutete man früher sogar blühende Landschaften. Inzwischen wird von einer Reise zur Venus abgeraten. Die hohe und dichte Atmosphäre aus 96,5 % CO<sub>2</sub> und 3,5 % N<sub>2</sub> mit einem Bodenluftdruck von 92 bar führt zu einem enormen Treibhauseffekt, der die Oberflächentemperatur bis auf 460 °C steigen lässt. Weil sich dort kein Wasser halten kann, wird das atmosphärische CO<sub>2</sub> auch nicht im Wasser gelöst und als Karbonat im Gestein „klima-unschädlich“ gebunden. Statt dessen verbleibt es in der Atmosphäre, und die undurchdringliche, 20 km dicke Wolkendecke besteht nicht etwa aus Wasserdampf, sondern aus Schwefelsäure! Das Klima gleicht also eher der Hölle als einem Garten Eden. Die überhitzte Atmosphäre zerstört jede Lebensform und wurde zahlreichen Weltraumsonden zum Verhängnis. Erst 1970 gelang es, bis zum Venusboden vorzudringen.

Ernüchtert betrachten wir unseren anderen Nachbarn, den Mars. Sein Sonnenabstand be-

trägt 1,5 AE, die solare Bestrahlung ist deshalb nur noch halb so kräftig wie auf der Erde. Die mittlere Oberflächentemperatur ist mit –50 °C bitter kalt! Schuld daran ist ein sehr kümmerlicher Treibhauseffekt von nur 3 °C, weil seine Atmosphäre mit 0,007 bar sehr dünn ist. Ähnlich wie bei der Venus besteht sie im wesentlichen aus CO<sub>2</sub> (96 %) und N<sub>2</sub> (3 %). Vielleicht war der Mars mit 1/10 Erdmasse nicht schwer genug, um mit seiner Gravitationskraft eine Atmosphäre an sich zu binden, so dass sie von ständigen Meteoriteneinschlägen abgedampft wurde. Obwohl es früher vermutlich Wasser auf dem Mars gegeben hat, konnten mehrere Missionen mit Robotern keine Spuren von gegenwärtigem Wasser oder gar von Leben entdecken. Ohne schützende Lufthülle und ohne Treibhauseffekt erweist sich der Mars inzwischen als erkaltet und lebensfeindlich – wie unser Mond.

Man geht davon aus, dass es auch auf Mars und Venus Zeitfenster gab, die biologische Lebensformen erlaubt hätten, doch könnte die günstige Zeitspanne für die notwendigen Entwicklungsprozesse zu kurz gewesen sein. Heute ist das „vitale Fenster“ nur noch auf der Erde offen. Die Erdatmosphäre spielt dabei eine Schlüsselrolle.

## WAS EIN PLANET „ZUM LEBEN“ BENÖTIGT

### Der Planet

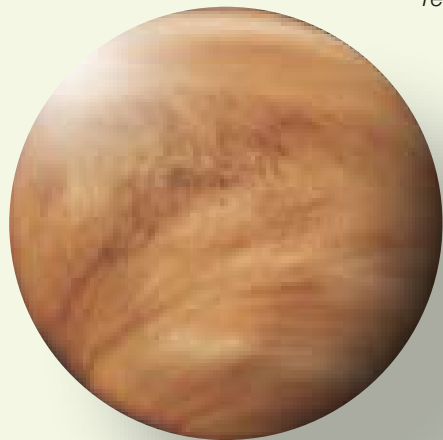
- muss schwer genug sein, um sein Wasser durch Gravitation festzuhalten
- muss warm genug sein, damit das Wasser flüssig bleibt
- darf nicht zu heiß werden, damit sein Wasser nicht vollständig verdampft
- sollte eine schützende Atmosphäre haben, damit
  1. die Moleküle des Wassers nicht durch UV-Strahlung zerlegt werden
  2. die Biomoleküle nicht durch intensive Strahlung zerstört werden
  3. ein akzeptables Klima mit Regenfällen auch Lebensformen auf dem Land erlaubt
- muss einen heißen Kern mit Vulkanismus besitzen, um den Treibhauseffekt und den  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft für die Photosynthese zu regulieren

### Sehr nützlich sind außerdem

- eine angemessen schnelle Rotation, um die Sonnenwärme gleichmäßig zu verteilen
- ein Mond, weil er die Rotationsachse stabilisiert
- und ein besonders massereicher Nachbarplanet wie der Jupiter, der mit seiner dreihundertfachen Anziehungskraft viele Meteore abfängt, bevor sie verheerende Einschläge verursachen können.

*Die Venus ist der Sonne zu nahe. Ihr Wasser wurde zum Teil zerlegt, wobei der Wasserstoff ins All verloren ging, weil er zu leicht ist. Ohne Verwitterung hat sich das  $\text{CO}_2$  in einer überhitzten Atmosphäre angesammelt.*

*Der Mars ist zu klein. Er hat sich innerlich abgekühlt. Sein Vulkanismus ist erloschen, und Mars hat seinen Kohlenstoff inzwischen komplett als  $\text{CaCO}_3$  gespeichert. Auf dem Mars ist es ohne Treibhausgas zu kalt geworden.*



## DIE ERDE HÜLLT SICH IN EINEN DICKEN MANTEL AUS WASSER

Die Gesteinskruste bietet eine hervorragende Wärmeisolation. Deshalb konnte sich bereits vor 3,8 Milliarden Jahren auf der noch hauchdünnen Kruste erstes flüssiges Wasser aus dem Wasserdampf der Atmosphäre ansammeln. Der Wasservorrat der Erde hat sich in der Folgezeit unglaublich vergrößert durch die gewaltigen Mengen an Eis, die im Sonnensystem kreisten und die von den Planeten nun zum wiederholten Male eingesammelt wurden.

Die Erde ist dabei besonders erfolgreich und umgibt sich mit einer gewaltigen, im Mittel circa vier Kilometer dicken flüssigen Wasserschicht, die auch heute noch 71 % ihrer Oberfläche bedeckt. Die besonders dünnen Gesteinsschichten, die das heiße Erdinnere von dem kalten Tiefenwasser der Meere trennen, werden niemals Ruhe finden. Sie sind den größten Temperaturunterschieden ausgesetzt und werden ständig von aufsteigendem Magma angegriffen, denn aus dem Inneren der Erde strömt flüssiges, heißes Gestein nach oben, während gleichzeitig das kältere zäh und langsam wieder absinkt. So ergeben sich umlaufende „Konvektionsströmungen“, bei denen enorme Massen bewegt werden. Sie wirken mit gewaltigen Reibungskräften auch auf die Kruste am Meeresboden und auf die Kontinentalplatten. Vor allem an den Schwachstellen der Meeresböden entstanden lange Risse. Dort können sich Tiefsee-Gebirge und Unterwasser-Vulkane bilden. Längs der Risse tritt glutflüssiges Magma aus und verdrängt

die Ozeanböden wie eine gewaltige Planier-raupe. Seit Jahrmilliarden werden die Meeresböden auf diese Weise an den Rissen erneuert und auseinander gedrückt. An weit entfernten Küstenlinien müssen sie sich zum Ausgleich unter die Kontinentalplatten schieben und verschwinden wieder. Dabei werden sie zusammen mit den Meeressedimenten in die Tiefe gedrückt und aufgeschmolzen. Deshalb ist das Gestein am Meeresboden sehr jung, oft nur wenige Millionen Jahre alt. An keiner Stelle ist es älter als 200 Millionen Jahre.

Die „Plattentektonik“ der Kontinente und Ozeane ist auch heute noch unvermindert aktiv und führt immer wieder zu heftigen Erd- und Seebeben. Es ist überaus erstaunlich, dass ausgerechnet diese Tektonik und die Sedimente am Boden der Ozeane dafür sorgen, dass die Konzentration des Treibhausgases  $\text{CO}_2$  in unserer Atmosphäre langfristig stabilisiert wird. Wir werden auf diese relativ neue Erkenntnis zurück kommen (S. 92).

# DIE „ZWEITE“ ATMOSPHERE SORGT FÜR EIN WARMES KLIMA

Während der heißen Phase reagierten die meisten Elemente begierig mit Sauerstoff. Deshalb enthielt die sich bildende „zweite“ Atmosphäre keinen freien Sauerstoff ( $O_2$ ), sondern vor allem die Oxide des Kohlenstoffs ( $CO_2$ , CO), Wasserdampf ( $H_2O$ ), Methan ( $CH_4$ ), Stickstoff ( $N_2$ ) und Schwefelverbindungen. Freier Wasserstoff ( $H_2$ ) dagegen ist zu leicht, um von der Gravitation der Erde festgehalten zu werden. Er verschwindet wieder ins All. (Das Gravitationsgesetz erlaubt auch diese Formulierung: Die Erde ist zu leicht, um Wasserstoffgas festhalten zu können – im Gegensatz zur Sonne und zum Jupiter.)

Nach der Höllephase hätte es auch auf der Erdoberfläche bald deutlich kälter werden müssen, denn die isolierende Gesteinshülle unter dem Wassermantel begrenzt den Wärmestrom aus dem Erdinneren. Obendrein strahlte die Sonne vor 3,8 Milliarden Jahren deutlich schwächer, mit nur etwa 3/4 ihrer heutigen Leuchtkraft.

Wegen der schwachen jungen Sonne hätte sich nun eine vereiste Erdoberfläche bilden

müssen, aber die damalige „zweite“ Atmosphäre mit sehr viel  $CO_2$  und reichlichem Wasserdampf bewirkte einen wesentlich kräftigeren Treibhauseffekt als die heutige Atmosphäre. So herrschte das Klima einer heißen Waschküche, in der es in Strömen regnete. Auf den völlig nackten Landflächen setzte eine gewaltige Verwitterung ein. Die Niederschläge nahmen dabei ständig auch  $CO_2$  aus der Atmosphäre auf, das sich sofort mit dem Wasser zu Kohlensäure verband. Der „saure Regen“ förderte die Zersetzung von Gestein. Aus Kalzium-Silikat-Verbindungen wie  $CaSiO_3$  bildete sich  $CaCO_3$  (Kalkstein) und  $SiO_2$  (Sand). So senkte der Regen den  $CO_2$ -Gehalt der Atmosphäre und transportierte den Kohlenstoff aus der Atmosphäre letztendlich in gewaltige Kalkablagerungen in den Ozeanen.

Damit setzte zum ersten Mal in der Erdgeschichte der Regelmechanismus des anorganischen Kohlenstoffkreislaufs ein, der auf einer sehr langen Zeitskala immer wieder das Klima stabilisieren wird, so dass flüssiges Wasser auf der Erde existieren kann.

# DIE PHOTOSYNTHESE ERSCHAFFT DIE „DRITTE“ ATMOSPHERE

Wir kennen nun schon einige Bedingungen, die für das Klima auf einem belebten Planeten bedeutsam sind – aber zwei Gesichtspunkte fehlen noch gänzlich:

- Woher kommt das Leben selbst?
- Woher kommt der Sauerstoff in der Atmosphäre, den fast alle Lebewesen benötigen?

Die Geschichte des Lebens beginnt vielleicht vor 3,8 Milliarden Jahren in den Tiefen eines Ur-Ozeans mit ungewöhnlichen Mikroorganismen, die von den Ausgasungen und der Wärme unterseeischer Vulkane leben. Der Zeitpunkt ist allerdings sehr unsicher, und wir wissen fast nichts über dieses frühe Leben. Erst viel später, etwa vor 3 Milliarden Jahren, treten in höheren Wasserschichten neuartige Lebensformen auf. Weil sie die Energie des Sonnenlichtes zur Photosynthese einsetzen, wurden sie früher zu den Pflanzen gerechnet und Blaualgen genannt. Auf Grund ihres Zellaufbaus werden sie inzwischen zu den Bakterien gezählt. Ihre Herkunft liegt im Dunklen. Diese Cyanobakterien erweisen sich jedenfalls als sehr vielseitige Mikroorganismen und sind heute noch in 2000 Arten weltweit verbreitet. Sie leben von Wasser,  $CO_2$  und Sonnenlicht und produzieren dabei natürlich vor allem neue Cyanobakterien.

Nur als Nebenprodukt entsteht gasförmiger Sauerstoff ( $O_2$ ). Der freie Sauerstoff wurde zuerst direkt in chemischen Reaktionen verbraucht, vor allem mit dem reichlich vorhandenen Eisen. Diese Oxidationsreaktionen

benötigten etwa 400 Millionen Jahre, um alles verfügbare Eisen verrosten zu lassen. Dabei entstanden riesige Eisenerzsedimente; und aus diesen Vorräten erschmelzen wir heute unseren Stahl. Danach, vor etwa 2,3 Milliarden Jahren, begann sich auch der Sauerstoff ganz langsam in der Atmosphäre anzureichern, denn  $CO_2$  und Sonnenlicht standen den Cyanobakterien nach wie vor reichlich zur Verfügung. Bereits geringe Sauerstoffmengen in der Atmosphäre reichten aus, um auch Ozon ( $O_3$ ) zu bilden. Ein wichtiger Schutzschirm für empfindliche biologische Moleküle gegen die zerstörerische UV-Strahlung von der Sonne entstand.

Wunderbar, so könnte man hoffen, nun endlich war alles vorbereitet für die großartige Entwicklung des Lebens auf dem Festland: ein warmes, feuchtes Klima in einer schützenden Atmosphäre, die mit ausreichend Sauerstoff und Ozon versehen war. Aber die Entwicklung des höheren Lebens musste sich noch sehr lange gedulden. Statt dessen entwickelte sich für fast 3 Milliarden Jahre – fast gar nichts, außer einem Schleim aus immer mehr Bakterien und einfachen Algen. Drei Viertel der gesamten Erdgeschichte verstreichen, ohne dass das Land besiedelt wird.

Vermutlich beschworen die winzigen Cyanobakterien dabei eine globale Klimakatastrophe herauf, die auch ihre eigene Existenz bedrohte. Zum ersten Mal in der Erdgeschichte erwies sich die Klimabeeinflussung durch eine Lebensform als zu heftig, um von geologischen Prozessen ausgeglichen zu werden.



Gewaltige Mengen von  $CO_2$  sind in Kalkstein gebunden: Die Kreidelfelsen von Dover.

# VEREISUNG UND VULKANISMUS

Meereis in der Arktis

Die Photosynthese, so könnte man meinen, ist enorm nützlich und eine der großartigsten Entwicklungen der Naturgeschichte. Dennoch kann jeder ungebremst ablaufende Prozess unerwartet schwerwiegende Konsequenzen nach sich ziehen. Die ständig ablaufende Produktion von Biomasse und Sauerstoff mit Hilfe der Photosynthesereaktion benötigt eine entsprechend massenhafte Zufuhr von  $\text{CO}_2$ :



Photosynthese in knapper Merkmformel. Dabei steht  $\text{-CH}_2\text{O-}$  als Kurzform für einen elementaren Biomasse-Baustein, z. B.: 1/6 Glukosemolekül  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ .

Mit Hilfe dieser Reaktion wurden im Laufe der Erdgeschichte wahrhaft gigantische Sauerstoffmengen ( $\text{O}_2$ ) produziert. Auch unser gesamter gegenwärtiger Luftsauerstoff (21 % der Atmosphäre) wurde mit Hilfe der Photosynthese aus  $\text{CO}_2$  gewonnen. Quantitativ bedeutet allein diese Menge einen  $\text{CO}_2$ -Umsatz von  $1,7 \cdot 10^{15}$  t  $\text{CO}_2$ , entsprechend 450 000 Gt C. Man muss unbedingt S. 114 zum Vergleich heran ziehen, um die dafür benötigte unvorstellbare Menge an  $\text{CO}_2$ -Gas überhaupt einordnen zu können. Im Umkehrschluss können wir aus diesen Zusammenhängen folgern, dass es auf der Erde heute noch einen entsprechenden, gewaltigen Vorrat an energiereichen Kohlenstoffverbindungen geben muss.

Allerdings könnte als Konsequenz der wundervollen Photosynthese eine globale Katastrophe über die Erde hereingebrochen sein:

Die allgegenwärtigen Cyanobakterien nahmen bei ihrer massenhaften Vermehrung im Laufe von Jahrtausenden die gesamten  $\text{CO}_2$ -Vorräte der Atmosphäre und der Ozeane in Anspruch. In Gegensatz zur heutigen Situation gab es damals vermutlich noch kaum Sauerstoffatmende Lebewesen und deshalb keine nennenswerten Rückreaktionen zur Photosynthese, wie etwa die biologischen Verbrennungsreaktionen. Das Land war noch völlig unbesiedelt und kahl, so dass es dort auch keine Buschfeuer geben konnte. Die möglichen Oxidationsprozesse, etwa von Eisen, erzeugten keinerlei frisches  $\text{CO}_2$ . Deshalb musste es mehrfach zu einer Verknappung des  $\text{CO}_2$  in Wasser und Luft gekommen sein. Parallel griff der freie Sauerstoff das in der Luft vorhandene Methan an, so dass die beiden atmosphärischen Treibhausgase  $\text{CO}_2$  und Methan knapp wurden und die Temperatur zu sinken begann.

Bei fallenden Temperaturen blieben Schnee und Eis im Frühjahr länger liegen. Deren weiße Flächen reflektierten die Sonneneinstrahlung und begünstigten eine weitere klimatische Abkühlung. Die Eis-Albedo-Rückkopplung setzte ein (vgl. S. 144). Das Klima wurde nun von Jahr zu Jahr kälter und kippte in wenigen Jahrhunderten regelrecht um.

Mindestens eine der folgenden Kaltzeiten wird von den Geologen „Snowball Earth“ genannt, denn die Erde wurde weitgehend weiß wie ein Schneeball. Die Photosynthese scheint

für Hunderttausende von Jahren nahezu zum Erliegen gekommen zu sein, und vermutlich haben sich lebende Organismen nur in den äquatornahen Regionen der weitgehend überfrorenen Ozeane erhalten können.

Die Erde fiel damit in einen biologischen und fast auch geologischen Winterschlaf. Nicht nur die Photosynthese erstarb, sondern auch die Verwitterung erlosch mangels Regen.

Die Schneeball-Erde könnte Ähnlichkeiten mit einer ganz modernen Beobachtung aufweisen: Vor wenigen Jahren entdeckte die Weltraumsonde Galilei bei ihrem Vorbeiflug am Jupitermond Europa Hinweise auf flüssiges Wasser unter einer dicken Eisdecke.

## Vulkane retten das Leben

Als alles Leben und damit auch die Photosynthese unter Schnee und Eis erstarrt war, blieb doch das Erdinnere davon unberührt. Die Vulkane blieben aktiv und emittierten unvermindert  $\text{CO}_2$ , so dass etwa alle 10 000 Jahre der  $\text{CO}_2$ -Anteil in der Luft um 250 ppm ansteigen konnte. Weil die zugefrorenen Ozeane kaum noch  $\text{CO}_2$  aus der Luft aufnahmen, kletterte der  $\text{CO}_2$ -Spiegel in der Atmosphäre unvermindert weiter. Nach spätestens 100 000 Jahren musste ein kräftiger Treibhauseffekt eingesetzt haben. Auch wenn sich die Luft bereits erwärmt hat, taut ein dicker Eispanzer nur sehr langsam ab. Erst nachdem große Flächen eisfrei sind, erwärmt die Sonneneinstrahlung die dunkle Erde effektiver, und die Schneeschmelze setzt mit Macht ein. Geologische Zeugnisse für gewaltige Schmelzwas-



serströme am Ende der Vereisungsphasen findet man in alten Gesteinsformationen auf allen Kontinenten.

Die Erde konnte dank der Vulkane endlich aus ihrem Winterschlaf erwachen – und fiel direkt in ein anderes Extrem: Der sehr hohe  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre sorgte mit seinem Treibhauseffekt in wenigen Jahrzehnten für ein sehr heißes und tropisch-feuchtes Klima. Die zuvor vollständig vereiste Erde war nur etwa 100 000 Jahre später von Pol zu Pol vollständig eisfrei. Für das fast erstorbene Leben bot sich die Chance für einen grandiosen Neuanfang auf unbesiedeltem Terrain.

*Die „Snowball-Earth-Episoden“ sind hoch interessant, aber in vielen Details noch immer umstritten. Insbesondere ist unklar, wie vollständig die Vereisung auch die äquatorialen Gebiete erfasst hat. Zu dem Thema gibt es ein sehr verständliches Buch (Ref. 14) und einen ausführlichen Internet-Auftritt ([www.snowballearth.org](http://www.snowballearth.org)).*



## DER ANORGANISCH-GEOLOGISCHE KOHLENSTOFFKREISLAUF

Wenn wir den „Geologischen Thermostat“ verstehen wollen, müssen wir die chemischen Kreisläufe des Kohlenstoffs betrachten. Kohlenstoffverbindungen sind

- entscheidende Bausteine für das Leben,
- Energieträger in Form von Kohle, Öl und Gas
- Mineralbildner in der Erdkruste
- in Form von  $\text{CO}_2$  und Methan ( $\text{CH}_4$ ) Treibhausgase in der Atmosphäre.

Weil der vierwertige Kohlenstoff so vielfältige chemische Verbindungen eingeht, nimmt er auch an sehr unterschiedlichen Kohlenstoff-Kreisläufen auf der Erde teil.

- 1 Der Kohlenstoffkreislauf des Lebens und Sterbens umfasst die Biochemie der Gegenwart: die Photosynthese und den Aufbau lebendiger Materie sowie Atmung, Absterben und Verrotten. Seine Zeitskala entspricht der Uhr des Lebens: Minuten, Tage oder viele Jahre – aber keinesfalls Jahrtausende oder gar Jahrmillionen. Diese sehr langen Zeiträume werden im nächsten Kreislauf erfasst.
- 2 Der Kohlenstoff der fossilen Brennstoffe stammt aus abgestorbenen Pflanzen und Kleinlebewesen, die sich vor langer Zeit unter Luftabschluss zu Kohle, Erdgas und Öl wandelten. Zeitskala: 10 – 300 Millionen Jahre.
- 3 Mit Abstand am meisten Kohlenstoff ist im Gestein gebunden. Der so genannte anorganische Langzeit-Kreislauf wird vor allem von geologischen Prozessen angetrieben, nämlich von der Verwitterung, der Plattentektonik und vom Vulkanismus. Zusätzlich können Kalk bildende Meereslebewesen beteiligt sein. Seine Zeitskala beträgt viele Jahrtausende bis Hunderte von Jahrmillionen.

Dieser Kreislauf beginnt mit dem  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre. Im Regen löst sich gasförmiges  $\text{CO}_2$  zu Kohlensäure  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . Auf diese Weise

wird das  $\text{CO}_2$  der Atmosphäre allmählich ausgewaschen. Die auch im Trinksprudel vorliegende Kohlensäure ist nur eine schwache Säure, kann aber im Laufe von Jahrhunderten Silikatgestein auflösen und ins Meer transportieren. Dort wird Kalziumkarbonat gebildet. Bei den Karbonatbildungsprozessen können zusätzlich auch Plankton und Kalkschalen bildende Meerestiere beteiligt sein. Dadurch werden letztendlich gewaltige Kalksteinablagerungen ( $\text{CaCO}_3$ ) auf dem Grund der Ozeane erzeugt. Sichtbare Beispiele sind die Kreidefelsen von Dover oder Rügen, die durch geologische Hebungen wieder ans Tageslicht kamen.

Die geologischen Karbonatlager könnten so in wenigen Millionen Jahren das gesamte  $\text{CO}_2$  aus der Erdatmosphäre vollständig aufnehmen. Der Treibhauseffekt würde schwächer, und die Erde müsste vereisen. Allerdings werden die Meeresböden von unterseeischen Vulkanen aufgebrochen und ständig unter die Festlandsplatten gedrückt (s. Abb. 11, S. 36). Dabei werden auch die Kalksedimente in tiefere und entsprechend heißere Schichten verfrachtet. Dort zerfällt das  $\text{CaCO}_3$  wieder und  $\text{CO}_2$  wird frei. Das Gas wird von den Vulkanen wieder in die Atmosphäre geblasen. Dieser Gasstrom beträgt derzeit etwa 0,2 Gt  $\text{CO}_2$ /Jahr.

Das mag uns zuerst als ein recht langsamer Prozess scheinen, aber Geologen sind sehr geduldige Menschen, die in Jahrmillionen denken. Aus ihrer Sicht ist das ein sehr schneller Vorgang, denn der gegenwärtige Vulkanismus- und Verwitterungszyklus benötigt nicht mehr als kurze 15 000 Jahre, um das gesamte derzeitige  $\text{CO}_2$  der Atmosphäre (3100 Gt  $\text{CO}_2$ ) umzusetzen.

Es ist eine relativ neue Erkenntnis, dass die Erdatmosphäre mit Hilfe dieses Kreislaufs über einen leistungsfähigen Thermostat für das Klima verfügt:

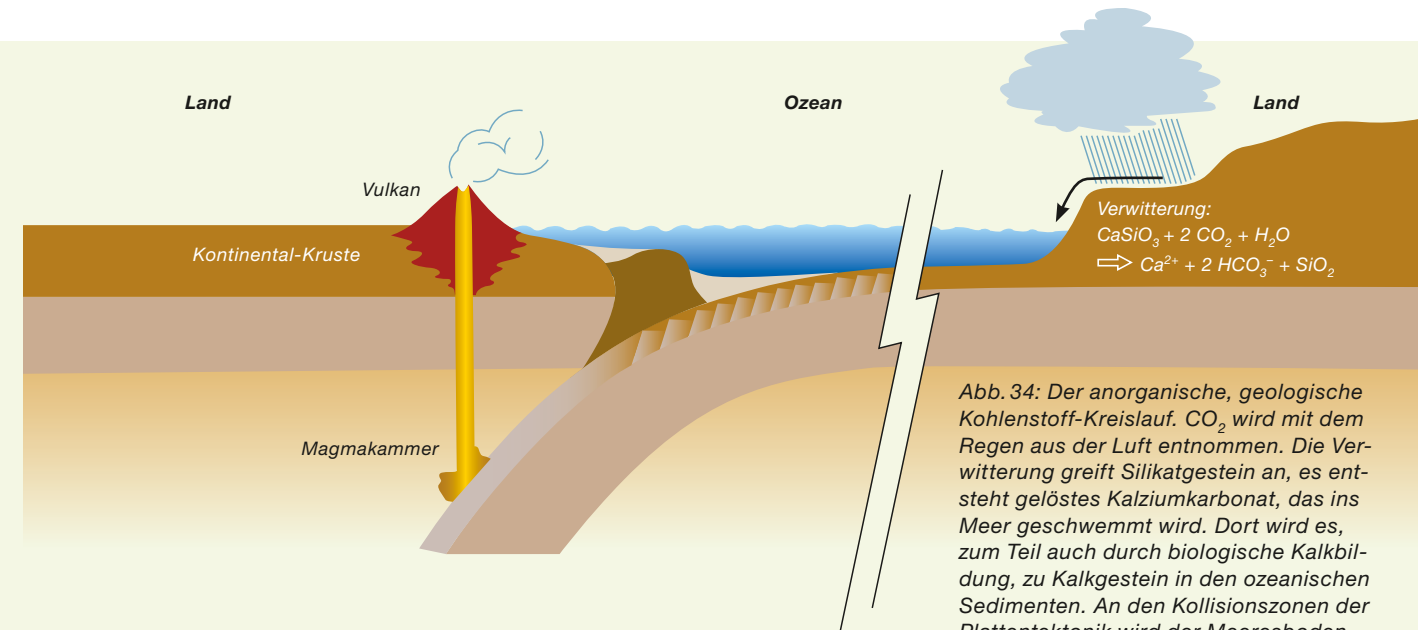


Abb. 34: Der anorganische, geologische Kohlenstoff-Kreislauf.  $\text{CO}_2$  wird mit dem Regen aus der Luft entnommen. Die Verwitterung greift Silikatgestein an, es entsteht gelöstes Kalziumkarbonat, das ins Meer geschwemmt wird. Dort wird es, zum Teil auch durch biologische Kalkbildung, zu Kalkgestein in den ozeanischen Sedimenten. An den Kollisionszonen der Plattentektonik wird der Meeresboden unter die Kontinentalkruste gedrückt. In der Tiefe wird das Karbonat durch die zunehmende Hitze zerstört und das  $\text{CO}_2$  gelangt durch den Vulkanismus wieder in die Atmosphäre (nach Ref. 10).

Steigt die Temperatur der Atmosphäre an, so ergibt das

- mehr Niederschläge und eine höhere Verwitterungsrate,
- ein verstärktes Auswaschen des  $\text{CO}_2$  aus der Luft und damit
- einen reduzierten Treibhauseffekt, also
- sinkende Temperaturen.

Wenn aber die Temperatur deutlich fällt, so sinkt die Verdunstung und weniger Regenwasser steht für die Verwitterung zur Verfügung. Der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre stagniert zuerst. Unverändert dagegen bleibt die Aktivität der Vulkane, weil sie von der Wärme aus dem Erdinneren angetrieben werden. Sie greift kontinuierlich die Sedimente an und erhöht den  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre langsam: Jedes Jahr steigt er um 0,2 Gt  $\text{CO}_2$ . Auch wenn das wenig erscheinen mag, so würden sich doch bereits nach 100 000 Jahren erstaunliche 20 000 Gt  $\text{CO}_2$  angesammelt haben. Das entspräche 2500 ppm  $\text{CO}_2$  in der Luft, ausreichend für einen kräftigen Treibhauseffekt.

Unverzichtbar für unsere Klimastabilisierung sind häufige Niederschläge für die „Luftwäsche“ und

die anschließende Verwitterung. Eine zu kleine Erde würde innerlich auskühlen, so dass der aktive Vulkanismus erlischt, wie auf dem Mars. Ohne Kohlenstoff in der Atmosphäre verschwindet der Treibhauseffekt und es wird zu kalt.

Auf der Venus ist der Vulkanismus zwar aktiv, aber dort ist das Wasser verloren gegangen. Ohne Niederschläge hat sich der gesamte Kohlenstoff als  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre angesammelt, und der Treibhauseffekt ist unmäßig angewachsen.

Allerdings ist der geologische Kohlenstoffkreislauf viel zu langsam, um das drängende Problem der  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus unserer Nutzung der fossilen Brennstoffe kurzfristig auszuregulieren. Deshalb steigt die Menge des  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre derzeit jährlich um ca. 16 Gt  $\text{CO}_2$  an (entsprechend 2 ppm  $\text{CO}_2$ ).

# EISESKÄLTE, TREIBHAUSHITZE, KATASTROPHEN – GEWALTIGE EXTINKTIONEN UND NEUES LEBEN

**542 – 488**  
MIO JAHRE

Über zwei Milliarden Jahre lang hatte das einfache, „primitive“ Leben im Wasser alle Katastrophen überstanden. Das Land dagegen war noch immer völlig unbesiedelt. Nachdem die gewaltige Vereisung der „Schneeball-Erde-Periode“ endlich abgetaut war, schlug das Klima vollständig um. Forschungsergebnisse lassen auf Temperaturen von bis zu +50 °C schließen. Aus einem unbekanntem Grund kam diesmal alles ganz anders. Urplötzlich, in nur wenigen Millionen Jahren, explodierte das Leben im warmen Wasser geradezu. Zahlreiche neue einfache Tierarten entwickelten sich und zum ersten Mal bildeten einige Lebewesen sogar Augen aus. Der Beginn dieser Epoche wird „Kambrische Explosion“ genannt. Im Kambrium wird der Höhepunkt der biologischen Kreativität innerhalb der gesamten Erdgeschichte erreicht. Diese glorreiche Epoche dauerte rund 70 Millionen Jahre. Nie wieder entstanden so viele neue Arten in so kurzer Zeit. Doch bevor sich endlich auch die Landpflanzen entwickeln konnten, brach schon wieder ein kaltes Klima mit einer Vereisungskatastrophe herein. Über die Hälfte der vielfältigen neuen Meeresbewohner überlebte das nicht und das Land blieb nach wie vor öde (Ref. 13 bietet eine anschauliche „Reportage“).

**440 – 390**  
MIO JAHRE

Erst viel später erobern die ersten Moose endlich das Land und ca. 50 Millionen Jahre später sind dann auch die ersten Insekten auf dem Land zu finden.

Solange das CO<sub>2</sub> reichlich vorhanden war, entwickelte sich in der wiederum feucht-warmen Atmosphäre eine gewaltig wuchernde Pflanzenwelt. Absterbende Pflanzen bildeten mächtige Moorschichten, die später unter Luftabschluss zu Kohle wurden. Damit beginnt ein zweiter Prozess, der der Atmosphäre das CO<sub>2</sub> langfristig entzieht. Jetzt wird der Kohlenstoff nicht nur in Kalkstein gebunden, sondern zuerst als Biomasse und später als Kohle für Hunderte von Millionen Jahren verwahrt.

**250 – 200**  
MIO JAHRE

Vor ca. 251 Millionen Jahren ereignete sich schon wieder ein fürchterliches Massensterben, dem 95 % der Arten im Meer und 75 % aller Arten auf dem Lande zum Opfer fielen. Eine eindeutige Ursache für diese Bio-Katastrophe ist nicht bekannt. Vielleicht war auch diesmal ein Klimawechsel daran beteiligt. Jedenfalls ergab sich im Anschluss wiederum ein besonders heißes Klima – das so genannte „Super-Treibhaus“ des Trias.



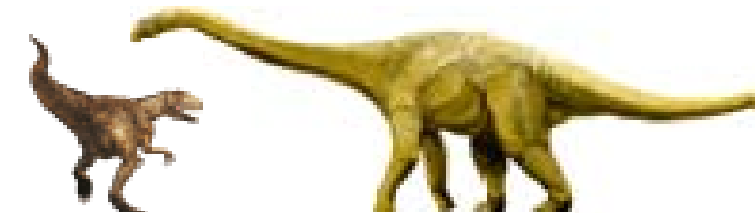
Aus den Sauriern entwickeln sich in der Folge auch die Vögel.

Jetzt endlich betreten die mächtigsten Tiere aller Zeiten die Bühne der Erde: die Saurier. Mit über 1000 Arten erobern sie Land, Luft und Wasser. Die kleinsten sind klein wie Hunde, die größten der Giganten werden bis zu 45 Meter lang. Sie entwickeln sich für unglaubliche 160 Millionen Jahre zu den unbestrittenen Herrschern der Erde.

Die Welt der Saurier ist uns durch Fossilienfunde recht zuverlässig bekannt und inzwischen auch durch Spielfilme sehr nahe gebracht. Tatsächlich gibt es keinen zwingenden Grund, warum es nicht auch heute noch Saurier auf der Erde geben könnte. Schließlich lebt derzeit auf mehreren Kontinenten noch eine zahlreiche Verwandtschaft dieser Echsen, wie beispielsweise die Krokodile.

**65**  
MIO JAHRE

Über das Ende der riesigen Echsen ist viel geforscht und spekuliert worden. Dabei dürfen wir nicht vergessen, dass alle für die Detektivarbeit nützlichen Indizien zwangsläufig uralte sind. In der einen geologischen Schicht findet man noch die entsprechenden Fossilien, in der nächst jüngeren Sedimentschicht fehlen sie. Die Zeitspanne dazwischen kann mehr als 10 000



## Das Zeitalter der großen Echsen

225 – 65 Mio Jahre vor heute:	160 Mio Jahre lang beherrschten die Saurier die Erde
-------------------------------	--

Wie vergleichsweise kurz ist die gesamte Menschheitsgeschichte dagegen:

4 Mio Jahre vor heute:	die ersten Menschenartigen (Hominiden) erscheinen in Afrika
------------------------	---

0,04 Mio Jahre vor heute: (40 000 Jahre vor heute)	die Steinzeit beginnt
--	-----------------------

0,004 Mio Jahre vor heute: (4 000 Jahre vor heute)	in Ägypten werden Pyramiden gebaut
--	------------------------------------





Jahre betragen. Das ist nur kurz im Vergleich zu 65 Millionen Jahren, aber doch viel zu lang, wenn man entscheiden will, ob die Dinos allmählich oder plötzlich ausstarben. Deshalb kann das Ende der Saurier prinzipiell nicht präzise festgelegt werden. Dennoch wird ihnen mit Vorliebe ein plötzlicher Tod in einer Bio-Katastrophe zugeschrieben – das ist viel aufregender und einprägsamer.

Sicher ist allerdings, dass sich nach jeder Katastrophe neue Lebensformen erfolgreich etabliert haben. Neue Arten eroberten die verwaisten Lebensräume und besetzten ihre Nischen. Das große Sauriersterben bot den Säugetieren weiten Raum für ihre Entwicklung und Ausbreitung.

Erfreulicherweise bleibt der Erde danach ein weiteres großes Massensterben erspart. Wir nähern uns nun ganz langsam der modernen

Erde. Auch die nunmehr „vierte“ Atmosphäre hat sich allmählich der gegenwärtigen Zusammensetzung angenähert.

Obwohl wir nun keine weitere Bio-Katastrophe mehr verzeichnen müssen, so führt doch ein langsamer, anhaltender Wandel zu sehr tief greifenden Folgen für die Lebensbedingungen und das Klima auf der Erde. Die Lage der Kontinente hat sich ständig verändert. Die Antarktis hat sich allmählich von Australien getrennt und danach ihren kalten Standort am Südpol erreicht. Ihr Klima ist nun nicht mehr tropisch oder subtropisch, sondern kühlt sich rapide ab. Auch das globale Klima wird dadurch beeinflusst, seit 30 Millionen Jahren wird es kühler und zunehmend labiler, unbeständiger. Wir treten ein in eine Zeit zahlreicher rätselhafter und überraschend heftiger Klimaschwankungen in Form von Kalt- und Warmzeiten.

## DER TOD DER SAURIER

*Ein großer Meteor könnte zweifellos den (hypothetischen) plötzlichen Tod der Saurier bewirkt haben, denn ein solches astronomisches Ereignis setzt unvorstellbare Energien frei. Glücklicherweise sind diese Ereignisse heute unwahrscheinlicher geworden, weil die meisten großen Brocken aus dem Bereich der inneren Planeten bereits in der Frühzeit der Erde eingefangen wurden. Wenn allerdings ein aus dem All kommender großer Meteor von vielleicht 10 km Durchmesser nicht von der Sonne oder vom Jupiter abgefangen wird, sondern es bis zur Erde schafft, dann wird seine gesamte Gravitationsenergie ebenfalls in kinetische Energie ( $1/2 mv^2$ ) umgesetzt. Bereits die Erdanziehung bewirkt, dass jeder aus dem All auftreffende Körper eine Auftreffgeschwindigkeit von min-*

*destens 11 km/s erreicht (Zur Erinnerung: So schnell müsste auch eine Kanonenkugel ins All abgeschossen werden, damit sie der Erdanziehung entkommen kann). Dazu kann sich die erhebliche Eigengeschwindigkeit der Meteore addieren. Die hohen Geschwindigkeiten und die Masse führen zu einer Energie, die mehreren Milliarden Hiroshima-Atombomben entspricht. Kommt es tatsächlich zum Einschlag, sind die primäre Druckwelle und die Hitze im Umkreis von vielen hundert Kilometern tödlich. Noch viel schlimmer sind die Konsequenzen für das Klima, denn große Mengen feinsten Staubs werden bis in die Stratosphäre geschleudert. Dort bilden sie einen Dunstschleier, der die Sonne verdunkelt. In dieser Höhe gibt es keinerlei Regen, und der Staub wird deshalb nicht nach einigen Tagen wieder absinken (Im Gegensatz dazu werden die Rauchpartikel auch*

*bei großen Feuersbrünsten immer wieder vom Wetter ausgewaschen. Traurige Beispiele dafür sind die verheerenden Brandrodungen der Tropenwälder). Nur gewaltige Vulkanausbrüche könnten ebenfalls stratosphärische Partikel und Aerosole produzieren und damit das Klima für einige Jahre abkühlen. Wenn eine weitgehende Dunkelheit einen ganzen Sommer lang anhält, blockiert sie die Photosynthese und senkt die Temperatur.*

*Auf diese Weise kann eine große Klimakrise auf der gesamten Erde zum Absterben der Pflanzen und des Planktons im Meer führen. Zuerst verhungern die Pflanzenfresser, und danach haben auch die Fleischfresser keine Überlebenschance. So könnte es den Sauriern vor 65 Mil-*

*lionen Jahren vielleicht ergangen sein. Es gibt immerhin Hinweise auf einen großen Meteor-Einschlagkrater bei Mexiko und auf Iridium-Ablagerungen in einer dazu passenden Sedimentabfolge im Meer. Das Iridium wird dem Meteor zugeschrieben. Beim Einschlag wäre es abgedampft und hätte sich verteilt.*

*Große Extinktionen können jedenfalls nicht durch ein lokales Ereignis bewirkt werden, sondern nur durch eine global wirksame biologische Krise. Ob die Konsequenzen der Krise vor 65 Millionen Jahren schlagartig oder allmählich wirksam wurden, und ob es nur eine einzige Ursache wie einen Meteoreinschlag gab, das alles muss offen bleiben. Auch eine globale Seuche durch einen tödlichen Virus wäre heute kaum noch nachweisbar.*



# WANDERnde KONTINENTE UND GROSSE ÜBERFLUTUNGEN

An dieser Stelle möchten wir auf den ungewöhnlich vielseitigen Meteorologen und Polarforscher Alfred Wegener hinweisen (Ein Blick in die Wikipedia zeigt sein vielfältiges Schaffen). Als er sich mit der Geologie und den Fossilien in Südamerika und Afrika beschäftigte, fielen ihm große Ähnlichkeiten zwischen den Kontinenten auf. Außerdem erkannte er, dass die Küstenlinien auf beiden Seiten des Südatlantiks erstaunlich gut zusammenpassten, obwohl sie inzwischen 5000 km weit voneinander entfernt sind. Er folgerte, dass Amerika und Afrika Bruchstücke eines ehemals zusammenhängenden Kontinents bilden. Im Jahr 1912 stellte er zum ersten Mal der staunenden Fachwelt die Theorie der Kontinentalverschiebung vor und erntete nur ungläubige Reaktionen auf seine Annahme, dass die mächtigen Kontinente zerbrochen sein sollten, um dann in jedem Jahr einige Zentimeter über die Erdoberfläche zu wandern. Das war zunächst völlig unvorstellbar. Schließlich mussten sie zuvor bereits seit Hunderten von Millionen Jahren zu viele Kilometer dicken, festem Gestein erstarrt gewesen sein. Auch noch zehn Jahre später wird Wegener als geologischer Außenseiter auf Konferenzen verspottet und heftig angegriffen, weil er nicht erklären konnte, welche Triebkräfte diesen ungeheuerlichen Effekt bewirken. Die Konvektionsströme im Erdinneren waren damals noch unbekannt. Heute dagegen gilt Wegeners Theorie der Plattentektonik als geniales Erkenntnis und unverzichtbar für das Verständnis der Entwicklung der Erde und des Klimas. Über den durch die Tektonik

ermöglichten geologischen Klima-Thermostat haben wir bereits auf S. 92 gesprochen.

Im Folgenden diskutieren wir die Lage der Kontinente. Sie haben sich im Laufe der Erdgeschichte tatsächlich so gewaltig bewegt und verändert, dass wir nur einige Phasen in aller Kürze darstellen können. Dazu gehen wir noch einmal zurück in die frühe Saurierzeit und starten dort direkt beim Superkontinent Pangäa. Es lohnt sich, eine eindrucksvolle Präsentation der Kontinentalverschiebungen im Internet zu betrachten: [www.scotese.com](http://www.scotese.com).

**225  
MIO JAHRE**

Besonders bemerkenswert war die Landkarte der Erde in der Trias vor 225 Millionen Jahren. Alle Kontinente, die zwischenzeitlich durchaus weit getrennte Positionen inne gehabt hatten, hatten sich zu einem globalen Rendez-vous zusammengefunden. Sie bildeten einen zusammenhängenden Superkontinent, Pangäa (Ganze Erde) genannt, der sich relativ nahe am Äquator aufhielt und schon deshalb ein besonders warmes Klima haben musste. Pangäas Landflächen lagen dabei deutlich niedriger als heute – oder, was prinzipiell nicht unterscheidbar ist, der Meeresspiegel war damals höher. Man geht von einem Meeresspiegel aus, der unglaubliche 300 m höher als heute lag, so dass etwa die Hälfte der Landflächen von Pangäa überflutet war. Natürlich konnte sich damals die gesamte Wassermenge nicht einfach drastisch vermehrt haben. Selbst wenn alles Festlandeis



Abb. 35a:  
Beginn der Trias –  
Beginn der Saurierzeit:  
225 Mio Jahre

Abb. 35b:  
Ende der Kreidezeit –  
Ende der Saurierzeit:  
65 Mio Jahre

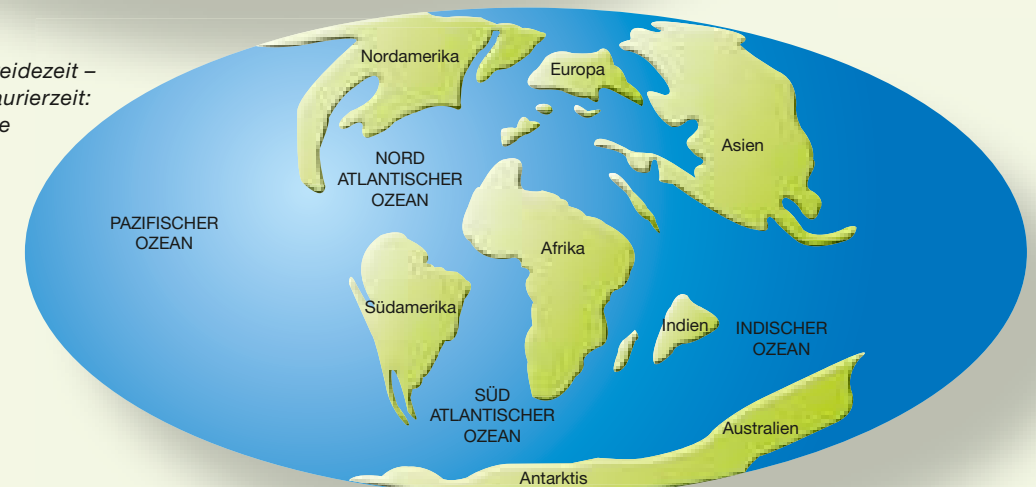


Abb. 35c:  
Heute. Eine Darstellung  
der tektonischen Platten  
befindet sich auf Seite 36.

(Nach Ref. 10)



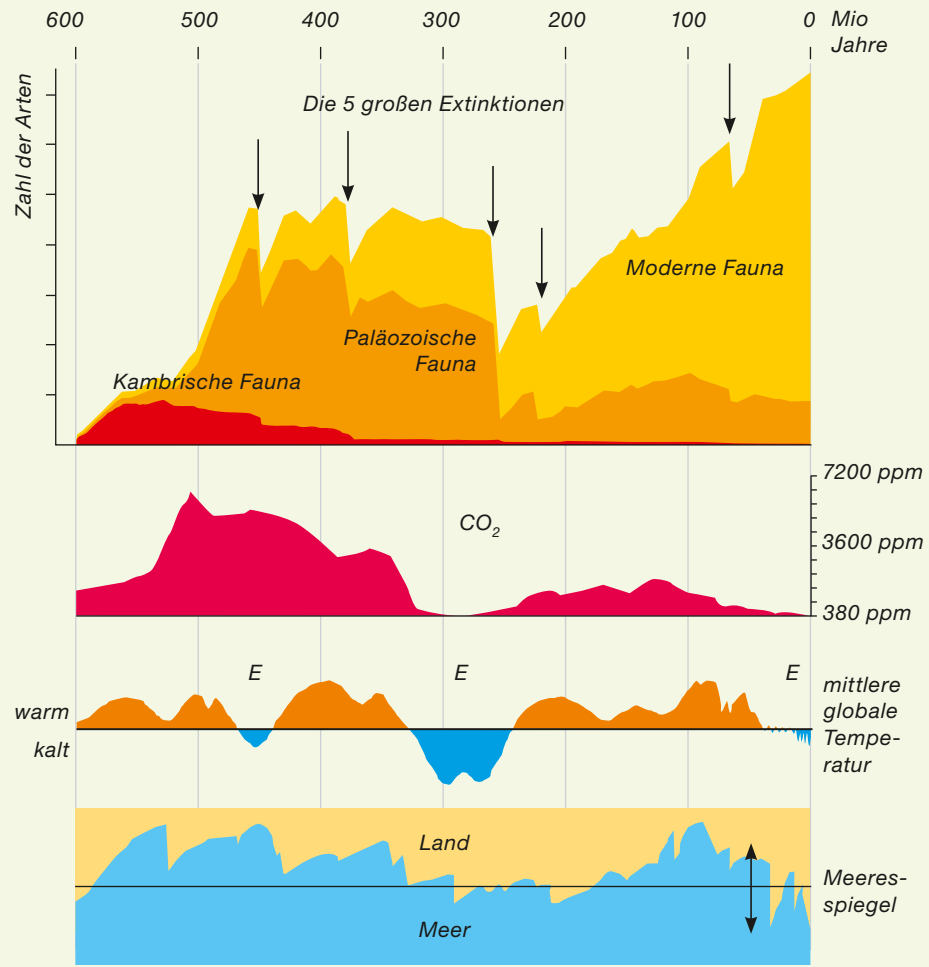


Abb. 36: Ein Rückblick

a: Artenreichtum und Biokatastrophen

b: Der CO<sub>2</sub>-Spiegel der Atmosphäre. Im Maximum werden Werte erreicht, die 20-mal höher sind als gegenwärtig.

c: Die Temperatur zeigt große Variationen. Das vorherrschende eisfreie Warmklima wird von Eiszeitaltern (E) unterbrochen.

d: Der Meeresspiegel verändert sich stark und liegt im Maximum 300 m höher als heute.

geschmolzen ist, so kann das im Vergleich zum gegenwärtigen Niveau maximal etwa 65 m Anstieg ausmachen. Stattdessen werden gewaltige Aufwölbungen von großen vulkanischen unterseeischen Bergrücken vermutet. Über die ständigen Angriffe des Magmas auf die relativ dünnen Meeresböden sind wir ja schon informiert. So sank das Fassungsvermögen der Ozeane und führte zu weit ausgedehnten Überschwemmungen. In diesen warmen Flachmeeren wuchsen gewaltige Korallenbänke, deren Überreste heute an vielen Stellen, nunmehr auf dem Festland, gefunden werden. Das Klima muss damals

feucht und schwül-warm gewesen sein – ein globales Treibhaus. Sogar der tiefe Ozean war mit bis zu 15 °C badewannen-warm, wie man an den Meeresfossilien ablesen kann. Das sauerstoffarme warme Wasser der Saurierzeit hat die Bildung von Erdöl und Erdgas aus absinkenden organischen Resten stark gefördert. Wegen der hohen Wassertemperaturen war auch nur halb so viel CO<sub>2</sub> wie heute im Wasser löslich, so dass sich relativ viel CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre befand. Heute dagegen sind die tiefen Ozeane mit Temperaturen von 1–2 °C sehr kalt.

**100 MIO JAHRE**

Vor 100 Millionen Jahren, noch immer in der Saurierzeit, waren die Kontinentalplatten schon wieder weit auseinander gedriftet. Wie zuvor waren sie in weiten Teilen von Flachmeeren bedeckt. Zwischen den beiden Amerikas sowie Afrika, Europa und den anderen Platten hatten sich breite Gräben gebildet. Eine kräftige warme Meeresströmung konnte rings um den Globus auf der Höhe des Äquators strömen. Sie wurde angetrieben von den Passatwinden, die damals nach demselben Muster wie heute wehen werden. Die Antarktis hatte sich gemeinsam mit Australien zum Südpol aufgemacht. Indien war mit bis zu 20 cm pro Jahr unterwegs auf einer 5000 km langen Reise nach Norden. Damit hält Indien den Allzeit-Geschwindigkeitsrekord unter den Kontinenten! Die Meere waren immer noch sehr warm und das Klima unverändert tropisch. Die Saurier waren überall vertreten und hatten noch eine glanzvolle Zukunft von weiteren 35 Millionen Jahren vor sich.

**65 MIO JAHRE**

Das Ende der Riesenechsen kam vor 65 Millionen Jahren, aber das warme Klima blieb der Erde weiter erhalten. Die Antarktis bildete noch immer mit Australien einen gemeinsamen Kontinent mit tropischem oder subtropischem Klima.

**55 MIO JAHRE**

Vor 55 Millionen Jahren war es sogar in hohen Lagen ausgesprochen warm. Die Antarktis war mit Sicherheit eisfrei, begann sich aber von Australien zu lösen.

**50 MIO JAHRE**

Erst vor etwa 50 Millionen Jahren wurde es besonders in den Polregionen langsam kälter. Die Antarktis war am Südpol angekommen und wurde immer weiter von Eis bedeckt. Ähnliches galt auch für die nördlichsten Landmassen. Wo immer Schnee lag, änderte sich die Albedo und eine weitere Abkühlung wurde wahrscheinlicher. Die hohe Verdunstung über den warmen Ozeanen betätigte sich in den polnahen Regionen als effektive „Schneekanone“ und sorgte für reichliche Niederschläge. Immer wenn Schnee und Eis im Frühjahr abtauten, strömte das kalte Schmelzwasser in die Meere. In den Polargebieten sank zunehmend kaltes, salzhaltiges Wasser in die Tiefe.

**35 MIO JAHRE**

Vor 35 Millionen Jahren hatte sich das Bild bereits deutlich gewandelt. In der Antarktis erschienen erste Gletscher und wuchsen bis zum Meer. Seit 30 Millionen Jahren entwickelte sich hier das Kühlhaus der Erde mit mittleren Temperaturen von derzeit –33 °C. Das Tiefenwasser der Ozeane kühlte sich rapide ab. Die indische Platte hatte Asien erreicht und der gewalttätigste Zusammenstoß der modernen Erdgeschichte nahm seinen Lauf. Dadurch wurde auch die zirkumäquatoriale Meeresströmung praktisch blockiert. Noch heute schiebt sich Indien mit unverminderter Geschwindigkeit tief in und unter die asiatische Platte – was regelmäßig zu gewaltigen Erdbeben vom Iran bis nach China führt. Letztendlich wird dabei der Himalaya mit solcher Macht aufgefaltet, dass er ohne den Einfluss der Verwitterung auf weit über 10 km Höhe angewachsen wäre. Das tibetanische Plateau, das „Dach der Welt“, entsteht und erreicht eine Höhelage zwischen 4500 und 5500 m. In dieser Höhe ist die

# VON DER WÄRME IN DIE RÄTSELHAFTEN VEREISUNGEN

Atmosphäre immer sehr kalt. Niederschläge fallen dort oft als Schnee und die einsetzende Vergletscherung verändert das Klima.

In vieler Hinsicht entwickelte sich deshalb seit 50 Millionen Jahren langsam eine ganz neu konfigurierte Erdoberfläche, eine „neue Welt“.

Die neu aufgefalteten Bergrücken wie die Alpen, Rocky Mountains, Anden und der Himalaya beeinflussten die Luftströmungen. Außerdem verstärkten sie die Verwitterung und banden dabei viel CO<sub>2</sub>. Der Meeresspiegel sank und die trockene Landfläche wuchs fast auf das Doppelte. Landflächen erwärmen sich schneller und kühlen sich auch schneller ab als Wasserflächen.

Dadurch sowie durch die wechselnde Bedeckung des Landes mit reflektierendem Schnee und Eis wird die klimatische Variabilität wesentlich vergrößert.

Ein Beispiel aus unserer Gegenwart veranschaulicht die ausgleichende Wirkung von großen Wasserflächen: An der Nordseeküste betragen die Unterschiede der Wassertemperatur zwischen Sommer und Winter nur ca. 15 °C. Dagegen erreichen die jahreszeitlichen Schwankungen der Lufttemperatur im Festlandklima leicht das drei- bis vierfache.

**25**  
MIO JAHRE

Vor 25 Mio Jahren stellte sich eine stabile Strömung rund um die Antarktis ein, die zur verstärkten Bildung von kaltem Tiefenwasser führte. Das kalte Wasser

war nun in der Lage, viel größere Mengen an CO<sub>2</sub> aufzunehmen. Daraus ergab sich ein anhaltender Verstärkungseffekt in Richtung eines kälteren Klimas, denn die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft sank rapide.

**6**  
MIO JAHRE

Bereits vor 6 Millionen Jahren waren die Eismassen der Antarktis so stark angewachsen, dass der Meeresspiegel zum ersten Mal ganz drastisch absank. Die Straße von Gibraltar fiel völlig trocken. Das Mittelmeer wurde zuerst zum reinen Binnenmeer und trocknete für eine Weile völlig aus. Eine dicke Salzschiebe in der Tiefe zeugt heute noch von einer Zeit, in der man zu Fuß von Afrika nach Italien gelangen konnte.

**5**  
MIO JAHRE

Erst vor 5 Millionen Jahren schloss sich der Isthmus von Panama zu einer festen Landverbindung zwischen Nord- und Südamerika. Dadurch wurde die äquatoriale Meeresströmung vom Atlantik in den Pazifik unterbrochen und der Golfstrom in seine heutige Richtung umgelenkt. Sein nördlicher Zweig brachte nunmehr vermehrt Wärme und Niederschläge nach Westeuropa.

**3**  
MIO JAHRE

Wer jetzt glaubt, dank des Golfstroms wäre ein konstant wärmeres Klima in Nordeuropa angebrochen, hat natürlich nicht aufgepasst. Denn nun brechen immer wieder lang anhaltende periodische Vereisungen über Nordeuropa herein. Das warme Wasser führt dabei zu besonders kräftigen Niederschlägen, die in der kalten Luft als Schnee fallen und die Vereisungen und Vergletscherungen beschleunigen. Der ständige Wechsel von Kalt- und Warmzeiten setzt sich bis in unsere Gegenwart fort.

Wir sind auf einem sehr rätselhaften Weg in unsere Gegenwart. Seit 50 Millionen Jahren wird das Klima kälter, geht dabei aber durch große Schwankungen, deren Ursachen die Forscher auch heute noch vor Probleme stellen. Die nächsten Seiten sind diesen Fragen gewidmet, weil sie auch für die Diskussion der Gegenwart von Bedeutung sind.

Zunächst rufen wir uns in Erinnerung:

**300**  
MIO JAHRE

Die Steinkohleflöze sind in der langen Warmzeit des Karbon entstanden.

**250**  
MIO JAHRE

Nach einer kühleren Periode im Perm folgte ab 250 Mio Jahren das Super-Treibhaus der Trias. Die gesamte „Saurierzeit“ (Trias, Jura, Kreidezeit, 250 – 65 Millionen Jahre) blieb ausgesprochen nass und warm, ganz ohne Gletscher. In der Kreidezeit bildeten sich große Erdöllagerstätten.

**55**  
MIO JAHRE

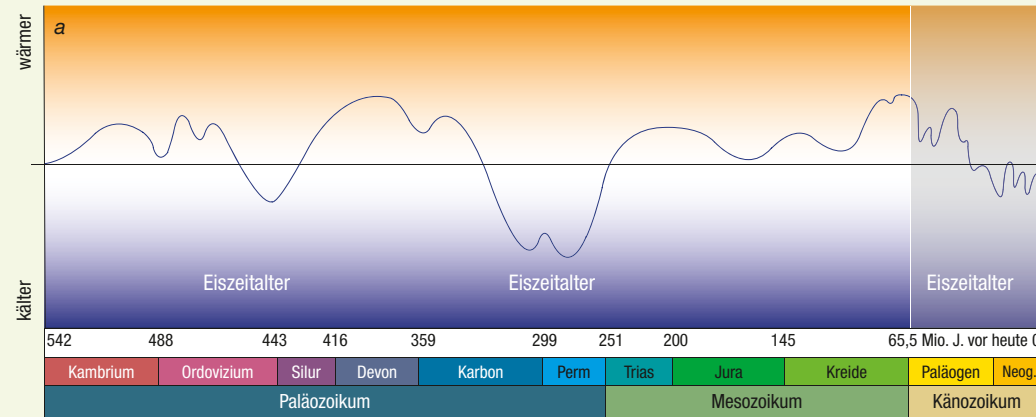
Eine letzte globale Hitzewelle folgte vor 55 Millionen Jahren. In dieser Periode wuchsen sogar in Nordsibirien noch Palmen, in Europa betragen die Wintertemperaturen um die 20 °C. Die Erde war zum letzten Mal bis in die Höhen der Berggipfel völlig eisfrei.

In der nun folgenden Zeit zeigte das Erdklima eine deutliche Tendenz zur Abkühlung. Die Palmengrenze zog sich ganz allmählich vom Nordmeer in Richtung Mittelmeer zurück. In beiden Polregionen, ganz besonders in der Antarktis, kam es wieder zu Vereisungen. Je näher wir der Gegenwart kommen, desto deutlicher und klarer werden die Zeugnisse von großen Klimaschwankungen. In Nordeuropa stößt das Eis über Skandinavien bis über die Elbe vor, und parallel schieben sich die Alpengletscher weit herunter ins Vorland.

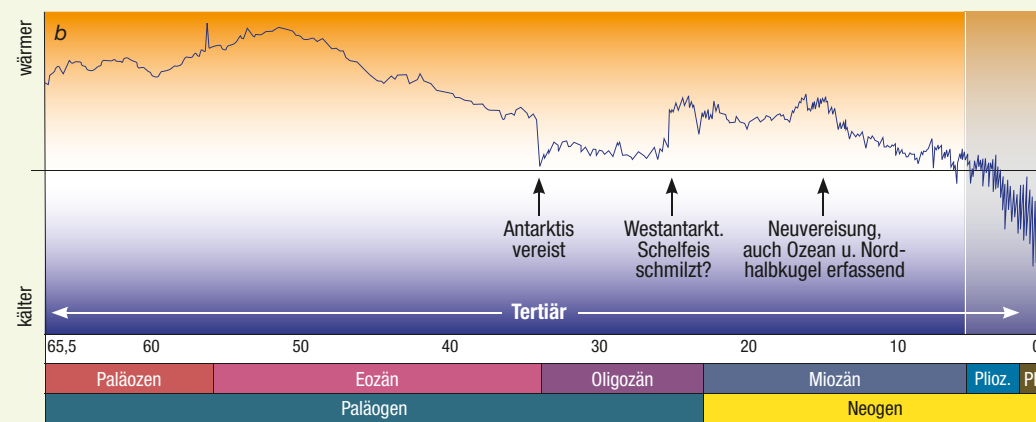
**3**  
MIO JAHRE

Seit 3 Millionen Jahren pendelt das Klima heftig hin und her. Wir sind in dem modernen Eiszeitalter, unserer Gegenwart, angekommen. Große Eisvorstöße und Warmzeiten wechseln sich regelmäßig ab, und seit über zwei Millionen Jahren hat sich ein rätselhafter Rhythmus von rund 90 000 Jahren Eis und 10 000 Jahren Wärme eingestellt – bis in unsere Gegenwart, bis heute.

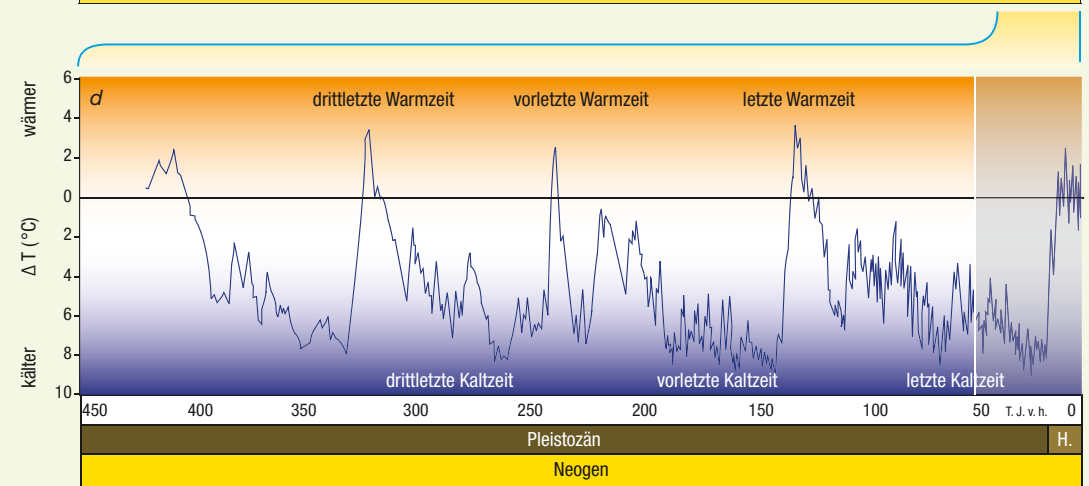
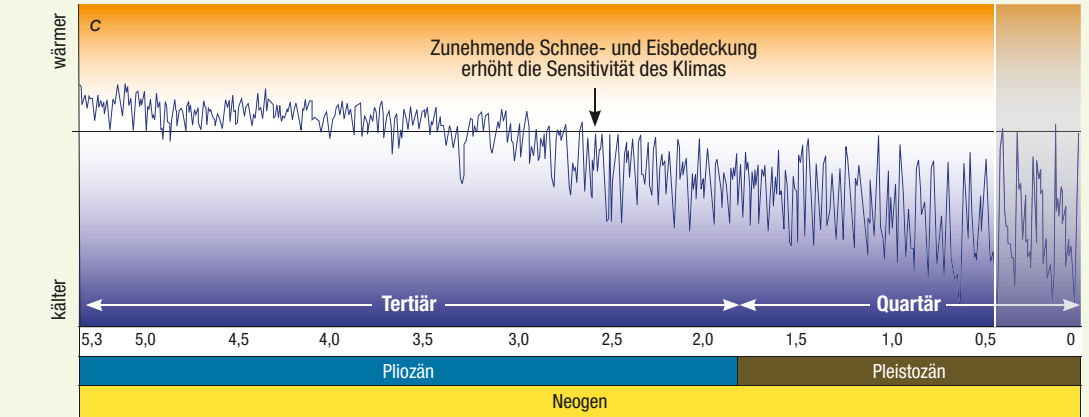
**ABB. 37: EIN ÜBERBLICK ÜBER DIE GLOBALEN KLIMAÄNDERUNGEN SEIT DEM KAMBRIUM**



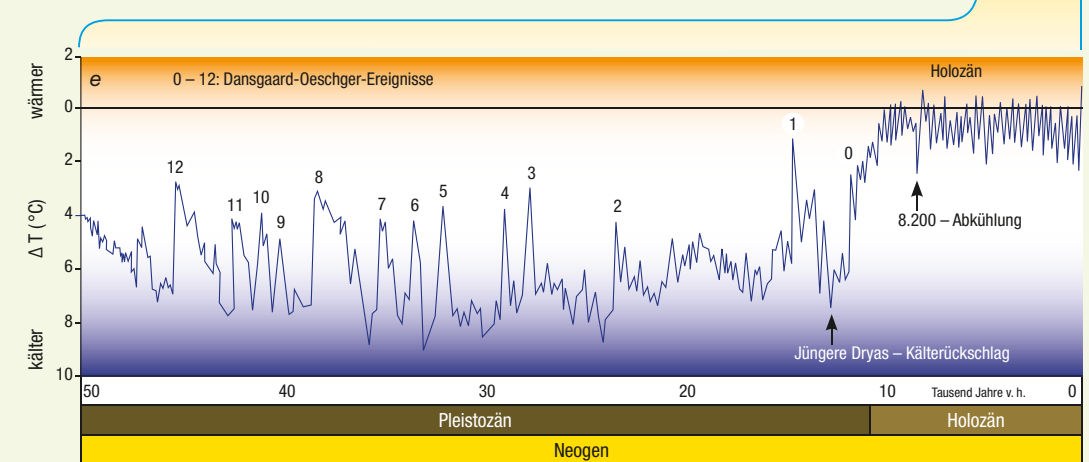
Der letzte Abkühlungstrend hat vor ca. 50 Millionen Jahren eingesetzt. In den folgenden Grafiken nähern wir uns der Gegenwart. Dabei wird die Auflösung der Daten immer besser. Die Namen der geologischen Zeitalter sind zur Orientierung genannt. Zeitskala: Millionen Jahre vor heute.



Die zunehmende Labilität des Klimas in den letzten 3 Millionen Jahren wird auf den Diagrammen der nächsten Seite verdeutlicht. Noch sind die Ursachen nicht in allen Einzelheiten geklärt. Zeitskala: Millionen Jahre vor heute.



Zeitskala jetzt in Tausend Jahren vor heute. Wir erkennen das Holozän, unsere Gegenwart.



(Grafiken nach Bubenzer und Radtke in Ref. 4)



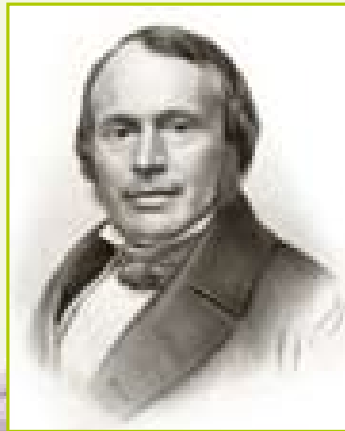
## PERIODISCHE VEREISUNGEN – DIE ABSURDE SPEKULATION EINES AUSSENSEITERS

Die These von mehreren großen Vereisungen in der nahen Vergangenheit vertrat als erster der Schweizer Louis Agassiz im Jahr 1837, der unter anderem die Findlinge, Endmoränen und Felsabschürfungen richtig deutete. Er wurde verlacht und verhöhnt. Periodische große Eiszeiten in Nordeuropa waren eine unvorstellbare und absurde Spekulation. Das war verständlich, denn eine so tiefgreifende Klimaänderung in der vertrauten Heimat läuft jeder menschlichen Erfahrung zuwider. Außerdem gab es weder in der Bibel noch sonst irgendwo menschliche Überlieferungen von einer großen „Eiszeit“.

Nur äußerst mühsam und widerwillig konnte man sich mit der Vorstellung anfreunden, dass es zahlreiche Gletschervorstöße bis in unsere Breiten gegeben haben musste. Der Grund für ihr Auftreten blieb hundert Jahre lang ein großes Rätsel. Inzwischen sind einige Puzzlesteine für die Lösung entdeckt.

Zwei entscheidende Fragen sind vor allem zu klären:

1. Warum stieg und fiel die Temperatur immer wieder so stark
2. Warum traten die letzten „Vereisungen“ so regelmäßig und langanhaltend in einem hunderttausendjährigen Rhythmus auf?



Seitenmoräne eines Gletschers bei Zermatt



# DIE ERDBAHN UND DAS RÄTSEL DES RHYTHMUS

Wir alle sind vertraut mit dem Rhythmus der jahreszeitlichen Schwankungen. Für ein halbes Jahr erhält die Nordhalbkugel mehr Wärme, in der anderen Hälfte des Jahres wird die Südhalbkugel bevorzugt. Wieso aber sollten die Sommer in Nordeuropa regelmäßig für viele Tausende von Jahren ausfallen? Was steckt hinter dem rätselhaften Rhythmus innerhalb unseres Eiszeitalters?

Es gibt keine Hinweise darauf, dass die Wärmeproduktion der Sonne im Rhythmus von 100 000 Jahren geschwankt haben könnte. Zwar hat die Abstrahlung der Sonne seit ihrer Entstehung ganz allmählich um 30 % zugenommen. Die Ursache dafür liegt im Brennstoffumsatz in ihrem Inneren und ihrem ganz langsamen Aufblähen. Weil dies ein langsamer und gleichmäßiger Prozess ist, strahlt sie in dem vergleichsweise kurzen Zeitraum von einer Million Jahren mit nahezu konstanter Leistung. Bis zum Jahr 1924 standen die Klimaforscher deshalb dem Rätsel des Vereisungsrhythmus völlig ratlos gegenüber.

### Ein astronomischer Herzschrittmacher

Einen Durchbruch erzielte der Mathematiker Milankovitch mit einer astronomischen Berechnung.

- Er wies darauf hin, dass die Umlaufbahn der Erde um die Sonne nicht konstant kreisförmig ist, sondern auf Grund der Anziehungskräfte der anderen Planeten mit Perioden

### PRÄZSSION

Die Neigung der Erdachse bleibt konstant, nur ihre Richtung ändert sich. Die Erdachse läuft langsam auf einem Kegelmantel um. Periodizität: 19 000 und 23 000 Jahre



### SCHIEFE (OBLIQUITÄT)

Der Kippwinkel ändert sich. Periodizität: 41 000 Jahre



### EXZENTRIZITÄT

Die nahezu kreisförmige Bahn wird mehr oder weniger elliptisch. Periodizität: 100 000 und 400 000 Jahre



Abb. 38  
(nach Ref. 4)



# DAS KLIMAARCHIV IM EIS

von 100 000 und 400 000 Jahren zwischen geringfügig elliptischen Bahnen hin und her wechselt.

- Allerdings bleiben die Abweichungen immer sehr gering, so dass die gesamte jährliche Einstrahlung auf die Erde nur um 0,3 % variiert.

Zudem gibt es zwei weitere astronomische Effekte, die analog zu dem jahreszeitlichen Sommer/Winter-Effekt wirken:

- Die Neigung der Rotationsachse der Erde schwankt zwischen 22° und 25°. Derzeit beträgt sie 23,4°. Periodizität: 41 000 Jahre.
- Die Erdachse „präzediert“, so dass weitere Perioden von 19 000 und 23 000 Jahren auftreten.

Die beiden letzten Effekte verändern nur die Verteilung der eingestrahnten Energie auf die unterschiedlichen Breitengrade geringfügig und führen beispielsweise zu etwas wärmeren Wintern und kälteren Sommern auf einer Halbkugel. Die Gesamteinstrahlung auf die Erdkugel wird dadurch nicht verändert.

In der Wikipedia findet man dazu hilfreiche Animationen.

- Selbst durch das gemeinsame Zusammenwirken aller Erdbahneinflüsse ergibt sich kein kräftiger Effekt. Allerdings ist die geringe Variation der Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel (für 65° nördl. Breite) mit den Messdaten über Warm- und Kaltzeiten der letzten zwei Millionen Jahre deutlich korreliert.

Damit hatte Milankovitch einen periodischen Auslöser (Trigger) gefunden – aber nicht mehr, denn die Variation der Einstrahlung um 0,3 % kann nicht primär in der Lage sein, eine weitgehende Vereisung zu bewirken. Außerdem galten dieselben astronomischen Bedingungen schon immer, beispielsweise auch zu den Zeiten der Saurier. Dennoch kam es damals für 200 Jahrmillionen überhaupt nicht zu diesen großen Vereisungen.

## Warum wurde dieser „Schrittmacher“ erst in den letzten 3 Millionen Jahren so ausgesprochen wirkungsvoll?

Nun, darüber haben wir gerade gesprochen. Man geht heute davon aus, dass die Ursache in der Lage der Kontinente zu suchen ist.

Große Landmassen in Polnähe auf der Nordhalbkugel und vor allem die mächtige Antarktis am Südpol zeigen ein ganz anderes klimatisches Verhalten als der Großkontinent Pangäa in Äquatorlage (vor 225 Millionen Jahren), denn Schnee kann nur auf kalten Landflächen liegen bleiben, nicht aber auf offenen Wasserflächen.

Aber noch ein weiteres Rätsel bleibt zu lösen. Die Eiszeiten sind durch ein kälteres Klima auf der gesamten Erde gekennzeichnet. Nicht allein die Nordhälfte ist betroffen. Die Spuren der Vereisung finden sich gleichzeitig auch auf der Südhalbkugel, wo ein entgegengesetzter Einstrahlungsrhythmus wirkt.

## Warum wirkt eine nördliche Abkühlung auch im Süden abkühlend?

Schon bei den sehr weit zurück liegenden Kaltzeiten wurde ein CO<sub>2</sub>-Mangel als wichtigster Grund vermutet. Bei den jüngsten Kaltzeiten sind wir nun in einer wesentlich besseren Situation, denn aus den winzigen Gasbläschen in den Eisbohrkernen aus Grönland und der Antarktis kann man die Zusammensetzung der Luft der letzten 600 000 Jahre zuverlässig rekonstruieren. Die Resultate sind eine wahre Sensation, wie Abb. 40 zeigt.

Man erkennt, dass der CO<sub>2</sub>-Anteil in der Luft in den letzten 600 000 Jahren genau wie der Temperaturgang des Klimas geschwankt hat:

zwischen 280 ppm (Warmzeit) und 180 ppm (Kaltzeit).

- Kaltes Klima ist demnach durch einen CO<sub>2</sub>-Mangel in der Luft gekennzeichnet.
- In Warmzeiten dagegen liegen überall hohe CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Konzentrationen vor.

Weil sich das CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> mit den Luftströmungen sehr schnell innerhalb der gesamten Erdatmosphäre verteilen, kann man wegen des veränderten Treibhauseffektes auch einen globalen Klimawandel gut verstehen, obwohl die Messungen jeweils nur lokal erfolgen können.

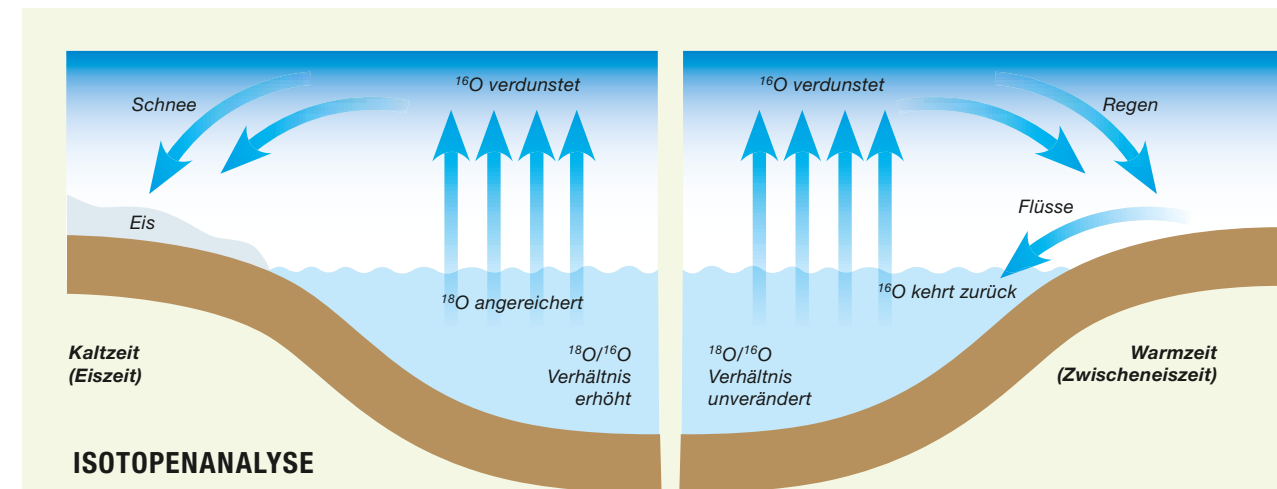
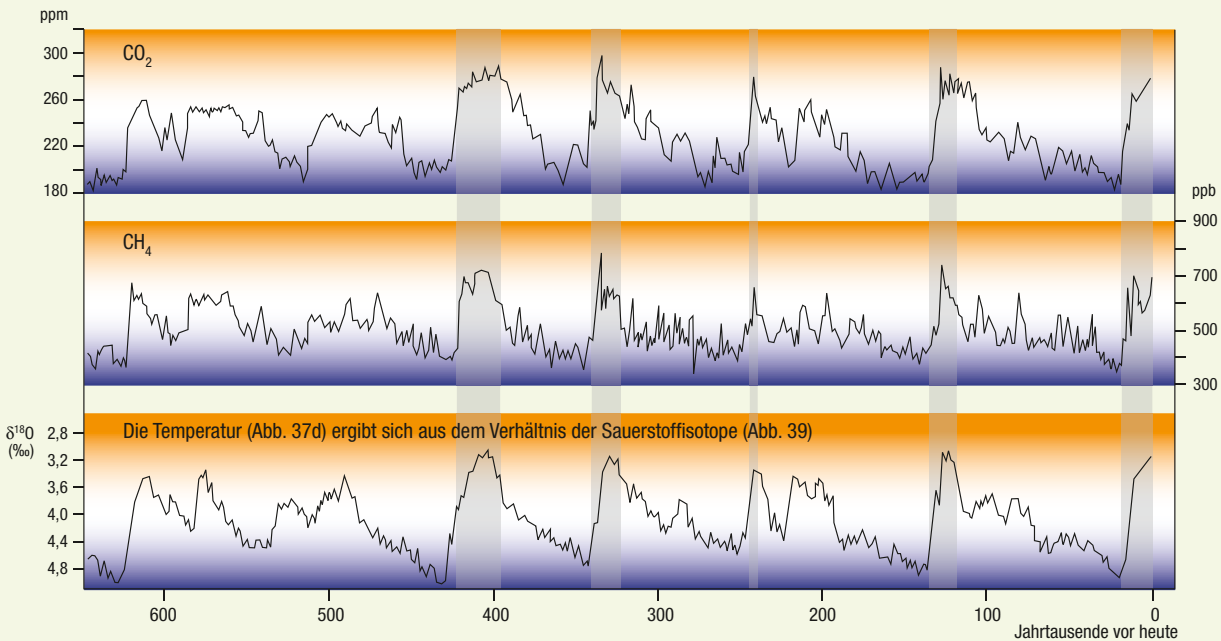


Abb. 39: Von den Sauerstoff-Isotopen ist <sup>16</sup>O am leichtesten. Deshalb verdunsten Wassermoleküle, die <sup>16</sup>O enthalten, leichter als Wassermoleküle aus <sup>18</sup>O. In Warmzeiten verändert sich das Verhältnis von <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O im Meer nicht, denn die Flüsse führen das <sup>16</sup>O mit dem Wasser wieder dem Ozean zu. In Kaltzeiten wird dagegen neues Landeis an <sup>16</sup>O angereichert. Deshalb ist das Ozeanwasser geringfügig reicher an <sup>18</sup>O. Dieses veränderte Verhältnis findet man auch in den Kalkschalen der Meerestiere und damit auch in den Kalksedimenten. Die Isotopenanalyse ist ein wichtiges und vielfältiges Werkzeug der Geologie und Paläoklimatologie. Das Beispiel zeigt, wie man aus Sedimentabfolgen auf Warm- und Kaltzeiten schließen kann (nach Ref. 10).

Abb. 40: Weit im Landesinneren der Antarktis und in Grönland liegen die Bohrstationen der Klimaforscher auf den dicksten Stellen des ewigen Eises. An manchen Stationen arbeiten 20 Personen das ganze Jahr über bei Temperaturen von  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Das über 4000 m dicke Eis der Antarktis ist das älteste Klimaarchiv. Es hat die Geschichte von Niederschlag, Temperatur und Zusammensetzung der immer sehr kalten Atmosphäre konserviert. Das älteste, tiefste und bisher unerreichte Eis dürfte ca. 1 Million Jahre alt sein.

Die Bohrtechnik hat Ähnlichkeit mit einer Erdölbohrung, wobei der Bohrturm wegen der Kälte ringsum geschlossen ist. Die Eisbohrkerne von jeweils 3 m Länge und 15 cm Durchmesser werden mit Hilfe eines Hohlbohrers an einem mehrere tausend Meter langen Bohrgestänge gewonnen. Das Bohrloch wird natürlich nicht wie beim Erdöl mit wässrigem Schlamm gespült, sondern mit Hilfe von Kerosin (Diesel) stabilisiert und geschmiert. Das Gestänge darf keinesfalls festfrieren oder verklemmen – dann wären Gestänge und Bohrkern verloren, und eine gänzlich neue Bohrung müsste an anderer Stelle gestartet werden.

Viele tausend Bohrkern wurden auf diese Weise bis heute gewonnen und mit Hilfe der Isotopenanalyse (S. 109) ausgewertet. Die sensationellen Resultate haben unser Wissen von den Eiszeiten wesentlich erweitert, so dass auch die Temperaturskala der Abb. 37 erstellt werden konnte (Ref. 1).



## IM EISZEITPUZZLE DER GEGENWART

Ist das Puzzle nun komplett? Ob wir wirklich schon alle Einzelstücke des „Eiszeitpuzzles“ erfasst haben, kann derzeit noch kein Klimawissenschaftler mit endgültiger Sicherheit sagen. Aber vielleicht sind wir der Wahrheit inzwischen sehr nahe gekommen.

### SEIT 3 MIO JAHREN

Wir fassen noch einmal zusammen, was für das wechselhafte, labilere und im Mittel viel kältere Klima der

letzten 3 Millionen Jahre mit ihren zahlreichen regelmäßigen Vereisungen besonders wichtig sein könnte:

- eine veränderte Lage der Kontinente im Vergleich zu der vorangehenden Erdzeit
- neue hohe Gebirge und Ebenen
- die Lage der ständig verschneiten kalten Antarktis am Südpol
- Bildung neuer Meeresströmungen
- Temperaturabhängigkeit der  $\text{CO}_2$ -Löslichkeit im Ozean mit ihrem gewaltigen  $\text{CO}_2$ -Reservoir
- Temperaturabhängigkeit der Methanfreisetzung in Tundrenregionen
- Klimarückschläge beim Übergang zu Warmphasen durch Störungen des nördlichen Golfstromes durch zu starken Schmelzwassereintrag (Süßwasser behindert die haline Tiefenwasserbildung)
- mehrere positive Rückkopplungen durch
  - Eis-Albedo-Reflexion, die die Abkühlung und Erwärmung verstärkt,
  - viel mehr trockene, zeitweilig schneebedeckte Landflächen als etwa zur Warmzeit der Saurier

- der astronomische Trigger (Milankovitch) der Sonneneinstrahlung

Einige grundsätzliche Fragen zu den zeitlichen Abläufen sind auch heute noch nicht befriedigend geklärt:

- Wieso wurde es nach eiskalten 90 000 Jahren immer wieder so **plötzlich** für kurze 10 000 Jahre angenehm warm?
- Wieso konnten die schwächlichen periodischen Milankovitch-Zyklen immer wieder derart **lang andauernde** Vereisungen und nur **vergleichsweise kurze** Erwärmungen auslösen?

Zudem waren die Unterschiede zwischen Warm- und Kaltzeiten vor allem in höheren Breiten ausgeprägt, etwa ab  $45^\circ$  bis zu den Polen. In diesen Regionen ergaben sich die größten Temperaturunterschiede (Ref. 1, Abb. 140).

Für die damit verbundenen Vereisungen spielten besonders die ausgedehnten Landmassen der Nordhalbkugel eine entscheidende Rolle, und unser Bild der letzten Vereisung wird natürlich vor allem von der Witterung in diesen Regionen geprägt. Der abgesunkene Meeresspiegel bewirkte, dass die Nordsee eine trockene Tundra und England eine zu Fuß erreichbare, eisige Insel war.

Im äquatorialen Bereich dagegen war der Einfluss der Kaltzeiten wesentlich schwächer, denn dort schneit es nicht, so dass der Eis-Albedo-Effekt nicht wirksam werden kann.

## DIE ERSTAUNLICHEN D/O-EREIGNISSE DER LETZTEN KALTZEIT (WÜRM-KALTZEIT) UND DER ÜBERGANG IN UNSERE WARMZEIT (HOLOZÄN)

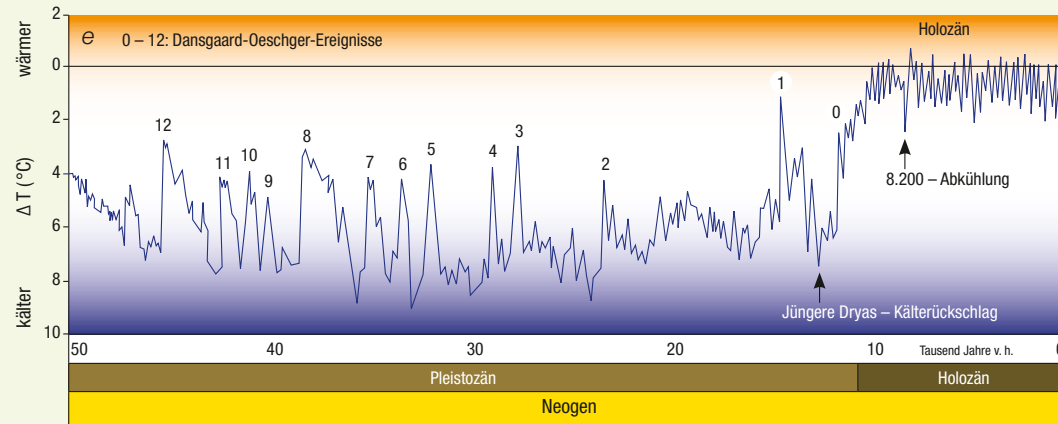


Abb. 37e (vgl. S. 105): Eisbohrkerne aus Grönland zeigen erstaunliche Klimaschwankungen, die Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (D/O). Sie bestehen in einer raschen Erwärmung, gefolgt von einer relativ langsamen Abkühlung. Dagegen ist die Jüngere Dryas-Zeit durch einen Kälterückschlag an der Pleistozän-Holozän-Grenze gekennzeichnet, der sich vor 8200 Jahren v.h. in stark abgeschwächter Form wiederholt hat (seitdem nicht mehr). Als Ursache wird ein Erliegen oder eine Abschwächung der thermohalinen Zirkulation im Bereich des ozeanischen Nordatlantikstroms vermutet. Die Meeresströmungen und Windmuster mit den Jetstreams waren möglicherweise wesentlich labiler als heute (Ref. 6). Der El Niño im Pazifik (S. 133) wird oft als Analogie heran gezogen (Abb. nach Bubenzer, Radtke, Ref. 4).

Die Temperaturänderung der Äquatorregion von 30 °C auf 24 – 25 °C machte sich kaum bemerkbar.

Vermutlich waren alle Klimazonen, vom äquatorialen Gebiet über die Subtropen und die gemäßigten Breiten bis hin zum Rand der vereisten Gebiete, jeweils auf schmalere Bänder geographischer Breite zusammengedrückt. Nördlich des Mittelmeeres begann schon bald die Tundra. Dafür war es in Nordafrika feucht und klimagünstig. Insgesamt aber führte die globale Abkühlung mit kühleren Ozeanen zu wesentlich weniger Regenfällen. Die tropischen Regenwälder schmolzen auf winzige Flecken zusammen. Unsere ausgedehnten

heutigen Tropenwälder, etwa im Amazonasgebiet, sind mit nur etwa 6000 Jahren noch unglaublich jung. Sie sind erst lange nach der letzten Eiszeit in dieser Form entstanden.

Wenn wir uns mit den Lebensbedingungen in der Eiszeit beschäftigen, so müssen wir unsere nordeuropäischen Vorfahren wirklich bewundern, weil sie mit einfachsten Mitteln einem relativ ungünstigen Klima trotzen konnten. Feuerstellen zum Wärmen, Behausungen in schützenden Höhlen und Zelten und einfache Jagdgeräte sind aus dieser Zeit überliefert. Metalle standen ihnen nicht zur Verfügung, nur scharfe Klingen und Spitzen aus Feuerstein sowie Holz- oder Tierprodukte.

Die Jagd war zum Überleben im kalten Klima unverzichtbar. Leider gab es noch keine Möglichkeiten, die Details der von ihnen miterlebten klimatischen Wandlungen aufzuschreiben, obwohl sie drastische Umschwünge innerhalb weniger Jahrzehnte ertragen mussten. So sind wir auf die Analyse von Pollen, Pflanzen- und Tierresten sowie von Vulkanasche aus den Ablagerungen (Sedimenten) in Seen, Flüssen und Mooren angewiesen. Die verblüffende Genauigkeit der paläoklimatischen Forschungsarbeiten spiegelt sich in diesem Text wider (Ref. 15):

„Vor etwa 15 000 Jahren ging die letzte Eiszeit zu Ende, wobei sich das Eis nach Skandinavien und in die Alpentäler zurückzog. Es folgt eine 3000-jährige Zeit spektakulärer klimatischer Wechsel.“

Nach zahlreichen starken Klimaschwankungen, die jeweils nur einige hundert Jahre dauerten, war das Klima in der Jüngeren Tundrenzzeit (Jüngere Dryas, 12 950 – 11 800) für 1100 Jahre noch einmal besonders rau, mit sehr kalten Wintern und kühlen Sommern. Dann aber ging die Eiszeit schlagartig zu Ende. Die durchschnittliche Temperatur stieg um mindestens 5 °C, was dem Klimaunterschied zwischen Stockholm und Mailand entspricht. Der Umschwung des Klimas vollzog sich binnen 5, höchstens 15 Jahren.“

Für Klimaforscher ist diese Periode wegen der unglaublich schnellen Klimawechsel eine besondere Herausforderung. So wird die starke Abkühlung in der Jüngeren Dryas mit dem Einströmen von großen Schmelzwassermengen in den Nordatlantik in Verbindung gebracht. Als Konsequenz könnte die thermohaline Pumpe (S. 37) zum Erliegen gekommen sein, und der wärmende Einfluss des

Golfstroms in Nordeuropa wäre vielleicht für 1000 Jahre erloschen. Ungeklärt ist, ob diese kalte Periode auch auf der Südhalbkugel zu einer Abkühlung führte. Am Ende dieser Zeit muss in Europa wieder ein stabiles Wettermuster mit warmen Luftströmungen eingesetzt haben.

Der Schlüssel zur Lösung des Rätsels der Klimaschwankungen auf der „seit 50 Millionen Jahren neu geformten Erde“ könnte in einer prinzipiellen klimatischen Labilität auf Grund der gegenwärtigen Konfiguration der Kontinente und Ozeane zu finden sein. Das Klima ist ja nicht nur einmalig aus dem Treibhaus der Saurierzeit in eine ewige Kaltzeit umgeschlagen, sondern die erstaunlich schnellen klimatischen Schwankungen sind ein wesentliches Charakteristikum der Neuzeit. Besonders der Weg von der letzten (Würm-) Kaltzeit in die Gegenwart (Holozän) war von sehr starken Klimaschwankungen gekennzeichnet. Man sieht ausgeprägte rasche Erwärmungen, gefolgt von Abkühlungen, die jeweils einige Jahrhunderte dauerten. Als Ursache wird jeweils eine Instabilität der Zirkulation des Nordatlantikstromes vermutet. Nach dem Kälterückschlag der „Jüngeren Dryas“ begann unsere gegenwärtige Warmzeit, das „Holozän“.

### Heute leben wir im Holozän.

Im fünften Kapitel werden wir unsere Zeitschritte wesentlich verkleinern, um auf diese Weise die Entwicklung des Klimas besonders aufmerksam zu verfolgen. Dabei können wir endlich auch auf zuverlässige Thermometerdaten und Wetteraufzeichnungen zurückgreifen und sind nicht mehr ausschließlich auf Indizien (indirekte Hinweise) angewiesen.

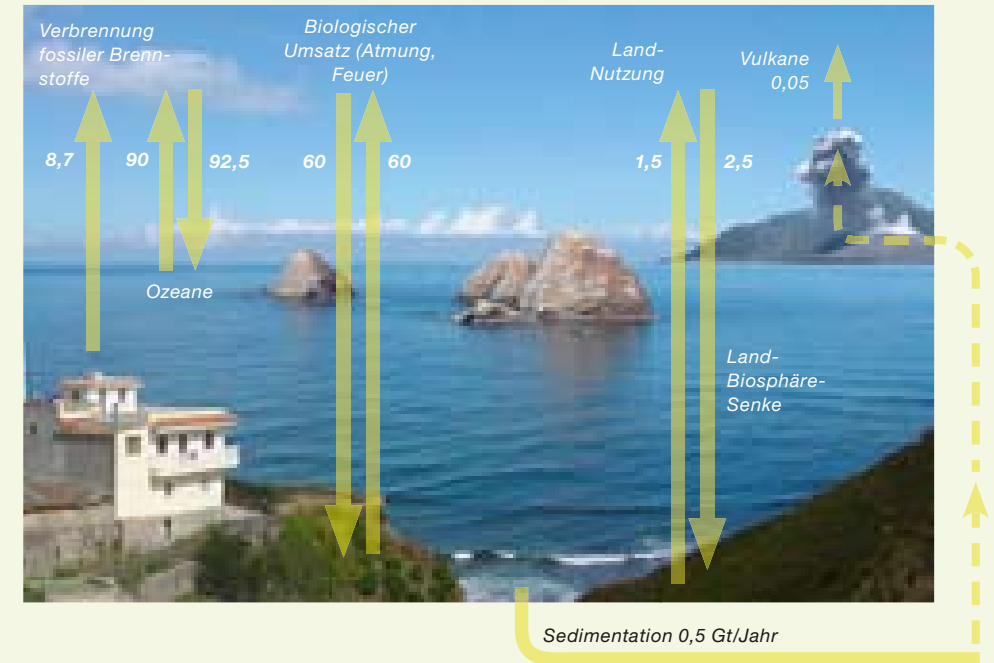
**TAB. 3: DAS KOHLENSTOFF-INVENTAR DER ERDE**

In unserer Gegenwart liegt praktisch der gesamte Kohlenstoffvorrat von Erdoberfläche, Atmosphäre und fester Erdkruste (Lithosphäre) gebunden im Gestein vor: Das sind ca.  $10^8$  Gt C (Es gibt sogar noch weitere  $23 \cdot 10^8$  Gt Kohlenstoff in den tieferen Schichten der Erde, die in unserer Bilanz aber unberücksichtigt bleiben). Nur ganz winzige Bruchteile (je etwa 1/100 000) befinden sich noch in der lebenden Biomasse oder als Gas in der Atmosphäre. Auch der uns so mächtig erscheinende Kohlenstoffvorrat in Form von Kohle, Öl und Erdgas macht nur 5/100 000 aus. Erstaunlich ist die Masse des Kohlenstoffs in Form von gefrorenem Methan ( $CH_4$ ), gebunden in den eisartigen Hydraten (Ref. 2). Die Hydrate lagern in Sedimenten am Meeresboden oder in Dauerfrost-Regionen der Tundra (Permafrostgebiete).

Im Wasser der Ozeane gelöst befindet sich eine bedeutende Menge Kohlenstoff, nämlich 50/100 000 des Bestandes. Dieser Kohlenstoff steht als  $CO_2$  im Gasaustausch mit der Atmosphäre. Wegen der sehr langsamen Umwälzung des Tiefenwassers dauert die Einstellung eines vollständigen Gleichgewichts zwischen den Ozeanen und der Atmosphäre viele Jahrhunderte.

	Kohlenstoff-Vorrat	Bemerkungen
Anorganisch im Gestein der gesamten Lithosphäre gebunden	ca. 70 000 000 Gt C	max. 100 000 000 Gt
Organisch gebunden im Gestein in Form von Ölschiefer oder Bitumen	ca. 15 000 000 Gt C	max. 20 000 000 Gt zur Herkunft s. S. 90
Gashydrate in Ozeanen und Tundra	10 000 Gt C	
Kohle, Öl, Erdgas (Fossile Energieträger)	> 5000 Gt C	zur Herkunft s. S. 94, 100
Torf, Humus	1500 Gt C	
Gelöst in den Ozeanen	40 000 Gt C	
Lebende Biomasse	600 Gt C	
C in Form von 387 ppm $CO_2$ in der Luft	846 Gt C	das sind 3105 Gt $CO_2$
	Kohlenstoff-Umsatz	Bemerkungen
Natürliche Emissionen durch Vulkanismus	0,05 Gt C/Jahr	das sind ca. 0,2 Gt $CO_2$ pro Jahr
Bindung durch Sedimentation, Verwitterung	0,5 Gt C/Jahr	
Anthropogene, also zusätzliche Emissionen von verbranntem fossilem Kohlenstoff und aus Waldrodungen	10 Gt C/Jahr	das sind 37 Gt $CO_2$ pro Jahr
Umsatz der Biosphäre (inkl. Ozeane)	60 Gt C/Jahr	Wachstum, Atmung, Verrotten
Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Ozeanen	> 90 Gt C/Jahr	vergl. S. 156

**Kohlenstoff-Flüsse in Gt/Jahr**



Die geologischen Schätzwerte schwanken je nach Literaturquelle beträchtlich. Ein Fehler von mindestens +/- 10% muss bei der Biomasse und wesentlich größere Fehler bei den Bodenschätzen akzeptiert werden. Der genaueste Messwert ist natürlich der  $CO_2$ -Gehalt der Atmosphäre.

Man erkennt, dass die Verwitterung und Sedimentation das anthropogene  $CO_2$  nicht schnell aus der Luft entfernen wird. **Auch der gewaltige biologische Umsatz von 60 Gt C/Jahr durch Landpflanzen und Plankton kann das anthropogen freigesetzte  $CO_2$  NICHT binden**, denn derzeit wird nirgendwo Kohlenstoff in Form von Biomasse der Atmosphäre langfristig in ausreichend großen Mengen entzogen. Es bilden sich derzeit praktisch keine neuen Kohlelager.

Heute haben wir ca. 50-mal mehr  $CO_2$  in den Ozeanen gelöst als unsere Luft enthält. Für unser Klima hofft man, dass das gewaltige  $CO_2$ -Reservoir der Ozeane das  $CO_2$  in der Luft stabilisiert. Damit würde auch der Treibhauseffekt stabilisiert. Wenn sich allerdings das Fassungsvermögen des großen ozeanischen Reservoirs ändert, weil dessen Temperatur steigt und warmes Wasser weniger  $CO_2$  lösen kann, dann wird die  $CO_2$ -Konzentration im kleinen Reservoir der Luft ganz gewaltig beeinflusst. Ein Ausgasen von nur 2% des ozeanischen  $CO_2$  würde den  $CO_2$ -Spiegel in der Luft verdoppeln. Das ist eine sehr unangenehme und bedrohliche Vorstellung, die nur durch die große thermische Trägheit (Wärmekapazität) der Ozeane gemildert wird. Glücklicherweise erwärmen sich die tiefen Ozeane nur sehr langsam.

Es gelten diese Umrechnungen:  
 1 Gigatonne (Gt) = 1 000 000 000 Tonnen = 1 Petagramm (Pg) =  $10^{15}$  g;  
 1 Gt Kohlenstoff (C) entspricht 3,67 Gt  $CO_2$



# GLACIER'SCHER WEITEN

Gletscher leben davon, dass es im Winter ausreichend schneit und dass das Eis im Sommer nicht zu kräftig schmilzt. Deshalb entstehen sie besonders in dem kalten Klima der hohen Breiten (in Polnähe) sowie in der kalten Luft auf hohen Bergen. Der Schnee verwandelt sich unter dem Druck (Gewicht) des neuen Schnees zu Eis.

Gletscher auf dem Festland kriechen unter dem gewaltigen Druck der Eismassen langsam vorwärts, bis sich ihre Ausläufer in einer Zone befinden, wo das Abtauen überwiegt. Wenn oberflächliche Schmelzwasserströme tief unter das Eis vordringen, kann das Kriechen stark beschleunigt werden. Den Rekord hält der Kutiah-Gletscher im Himalaya, der sich in einem Jahr um 12 Kilometer vorwärts schob. Typische Werte für die Eisschilde auf Grönland und der Antarktis betragen um die 100 m pro Jahr.

Die nordischen Eisschilde der vergangenen letzten großen Vereisung (Ende vor 15 000 Jahren) besaßen in Skandinavien eine Dicke von bis zu 3000 m und drückten mit ihrem Gewicht die Landmassen um bis zu 1000 m tief in die zähe Erdkruste. Nachdem das Eis verschwand, stieg Skandinavien bisher um 400 m an und steigt weiter mit ca. 1 cm pro Jahr. Wenn Gletscher in große Höhen (3000 m) anwachsen, erreichen sie höhere und damit kältere Luftschichten. Das ergibt eine selbstverstärkende, positive Rück-

kopplung und damit eine „Labilisierung“, denn auch hier gilt die Umkehrung: Das Abschmelzen wird sich entsprechend beschleunigen, wenn die Eisoberkante in tiefere und wärmere Luftschichten gelangt. Das Grönlandeis könnte in Zukunft davon betroffen sein.

Derzeit (2010) schrumpft der Eisschild auf Grönland und trägt mit etwa 0,4 mm pro Jahr zum Meeresspiegelanstieg bei. Auch die Antarktis verliert gegenwärtig etwas Eis. Bei weiterer Erwärmung ist dort aber ein verstärkter Schneefall und damit ein Anwachsen der Eismasse zu erwarten, denn die Temperatur bleibt in der sehr kalten Antarktis immer weit unter dem Gefrierpunkt.

Wenn Festlandsgletscher und Eisschilde langsam vorwärts kriechen, können sie sich direkt bis an die Wälder und Wiesen vorschieben. Der nordische Eisschild ist auf diese Weise mehrfach bis nach Norddeutschland vorgestoßen. Anschauliche Beispiele dafür bieten auch die Alpengletscher, die noch in der unmittelbaren Gegenwart der „Kleinen Eiszeit“ (etwa 1500 – 1850) bis in die Täler vorgerückt sind. Direkt vor diesen Gletschern lagen die bewirtschafteten Bauernhöfe, deren Besitzer für einen Rückzug des Eises beteten. Derzeit (2010) befinden sich die Alpengletscher immer noch in einer sehr kräftigen Rückschmelzphase.

Gletscher am Ozean verhalten sich ganz anders. Weil alle Gletscher „bergab“ fließen, erreichen sie irgendwann die Küste. Dort bricht das Meer große Stücke oder ganze Eisberge aus ihnen ab: die Gletscher kalben. Das Kalben ist deshalb a priori kein Hinweis auf das Abschmelzen der Gletscher, sondern ein zwangsläufiger Prozess, der besonders bei zunehmender Vergletscherung auftreten muss. Wenn in der Vergangenheit besonders große Eismassen und Eisberge abgebrochen sind oder wenn ein hinter einer Eisbarriere angestauter Süßwassersee plötzlich in den Nordatlantik ausströmte, dann konnte das den Salzgehalt des Meerwassers so verringern, dass der Nordatlantikstrom möglicherweise für lange Zeiträume beeinträchtigt wurde. Deshalb wird das komplizierte Wechselspiel zwischen Gletschern, Meereis, Süßwasser und den Strömungsmustern im Nordatlantik sehr intensiv von den Klimaforschern untersucht. Derzeit nimmt die nördliche Meereisbedeckung so kräftig ab, dass ein im Sommer eisfreier nordpolarer Ozean in diesem Jahrhundert Wirklichkeit werden könnte (Damit ist kein Anstieg des Meeresspiegels verbunden, denn schwimmendes Eis verdrängt genau so viel Wasser wie es selbst wiegt).

Eine interessante Form des Kalbens beobachtet man ständig in der Antarktis: Dort schieben

sich gewaltige Eisschilde vom Land ins Meer, wo sie der Gang der Gezeiten mürbe macht, bis sie abbrechen. Obwohl sich die Antarktis seit 30 Millionen Jahren im Zustand einer kontinuierlichen Vereisung befindet, konnten ihre Eismassen nie nach Südamerika hinüber fließen. Der südliche Ozean hat Südamerika vor den Gletschern aus der Antarktis geschützt, weil die Eisschilde zerbrechen und als Eisberge in wärmere Regionen driften und tauen. Dagegen fehlt den Landmassen in Nordeuropa und Nordamerika ein entsprechender ozeanischer „Schutzgraben“. Sie waren den Vorstößen der nördlichen Eisschilde ungeschützt ausgesetzt.

Für die Einleitung von „Geologischen Eiszeitaltern“ scheint es notwendig zu sein, dass zumindest eine große Landmasse in der Nähe der Pole vorhanden ist, so dass sich dort eine stabile Schnee- und Eisbedeckung halten kann. Schwimmendes Meereis an den Polen tritt zwar in Kaltzeiten auf, aber allein kann es kein Eiszeitalter auslösen, denn wenn Eisschollen auf dem Meer in wärmere Regionen treiben, schmelzen sie wieder.

Zu den Gletschern in aller Welt gibt es eine wundervolle Website: [www.swisseduc.ch/glaciers/](http://www.swisseduc.ch/glaciers/)

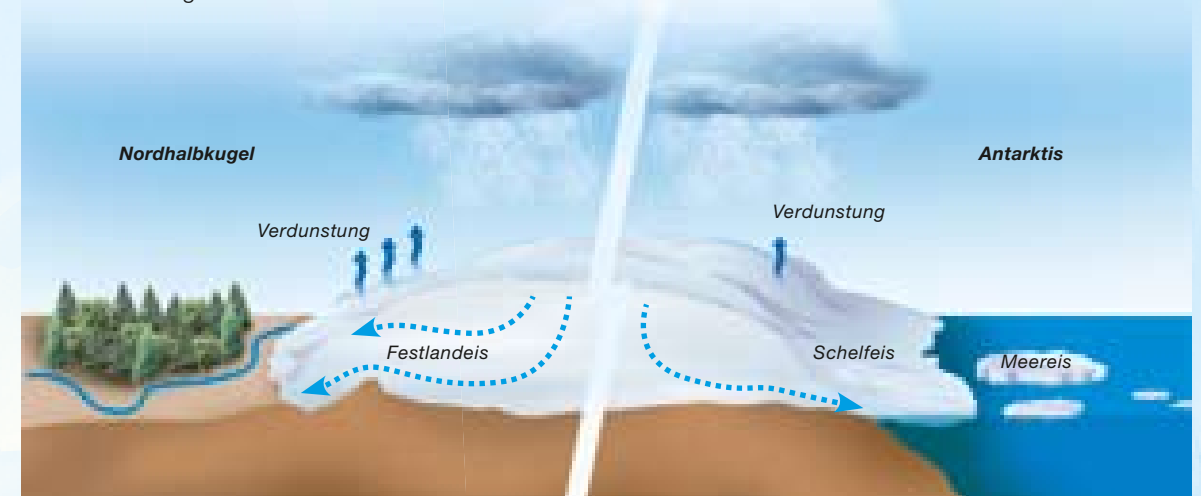


Abb. 41: Nördliche Eisschilde flossen unter ihrem Gewicht aus den arktischen Regionen nach Süden und erreichten dort wärmere Zonen. Der Schneefall kann dabei tausende Kilometer weiter nördlich erfolgt sein. Das Eis der Antarktis dagegen wird nach wie vor von einem tiefen Meer blockiert (nach Ref. 10).

# 4560 MILLIONEN JAHRE

Wir wollen uns die Entwicklungsgeschichte der Erde „hautnah“ veranschaulichen und benutzen dazu unsere ausgebreiteten Arme als Zeitmaßstab.

Vor 4,56 Milliarden Jahren, an der Spitze des rechten Mittelfingers, entstand die Erde. Zuerst mussten ca. 700 Millionen Jahre verstreichen, bis die Erde erträglich abgekühlt war. In der Nähe des rechten Handgelenks konnte sich flüssiges Wasser bilden und im Laufe von Jahrtausenden entstanden die Ozeane. Im Wasser begann das Leben. Viel später beginnen die Cyanobakterien dann mit der Photosynthese. Von nun an wurde beständig Sauerstoff produziert.

An dieser Situation ändert sich im wesentlichen ca. 3 Milliarden Jahre lang gar nichts – den rechten Arm hinauf und den linken hinunter gibt es immer nur Bakterien und Algen im Wasser, die sich vermehren und Sauerstoff produzieren. Allerdings sind mehrere Eiszeitalter zu vermeiden.

In der Nähe des linken Handgelenkes gibt es den großen biologischen Durchbruch. In der „Kambrischen Explosion“ entwickelt sich ein enorm vielfältiges Leben im Wasser.

Auf der linken Handfläche wird endlich auch das Land erobert. Anschließend „laufen die Dinosaurier eine sehr lange Zeit auf dem linken Mittelfinger herum“. Erst dort, wo der Fingernagel beginnt, sterben sie wieder aus.

Die restliche Erdgeschichte von 65 Millionen Jahren muss nun auf dem Fingernagel Platz finden. Es wird dabei langsam kühler und schließlich wechseln sich viele Eis- und Zwischeneiszeiten ab. Wenn wir nur den äußersten Rand unserer Fingernägel

betrachten, so entspricht 1 mm bereits 3 Millionen Jahren. So lange dauert das gegenwärtige Eiszeitalter an, in dem wir uns heute noch befinden. In der letzten Kaltzeit reichte die nördliche Eis- und Schneedecke bis Paris, und die Nordsee selbst war eine verschneite trockene Tundra, weil der Meeresspiegel damals ca. 120 m tiefer lag.

Erst vor 12 000 Jahren endete die letzte Kaltzeit, und unsere Warmzeit mit der uns zunehmend vertrauten menschlichen Kulturentwicklung kann endlich einsetzen.

Wie viel Platz auf dem Fingernagel haben die Menschen dafür zur Verfügung?

Sehr wenig.

Das kleine Stückchen, das die Nägel in 40 Minuten wachsen, umfasst bereits die gesamten 12 000 Jahre Entwicklungsgeschichte des modernen Menschen. Ein Strich mit der Nagelfeile – und 12 000 Jahre sind weggeputzt, denn für die Entwicklung des modernen Menschen sind in unserem Maßstab ganze 4/1000 Millimeter reserviert.

(Der Skalenfaktor des Vergleiches beträgt 1,5 m pro 4,5 Milliarden Jahre. Das Wachstum der Fingernägel ist mit 1 mm pro Woche angesetzt. Grafik: Lara Ludwigs)

Ca. 700 Millionen Jahre später: Ende der Höllezeit. Wasser sammelt sich an, erste Photosynthesereaktionen.

Vor ca. 4,5 Milliarden Jahren: die Erde formt sich aus „Sternschrott“.

Für ca. 3 Milliarden Jahre besteht das Leben aus Bakterien im Wasser.

Vor ca. 600 Millionen Jahren: Eine „Schneeball“-Periode.

Vor ca. 2,2 Milliarden Jahren: Erstes, archaisches Eiszeitalter.

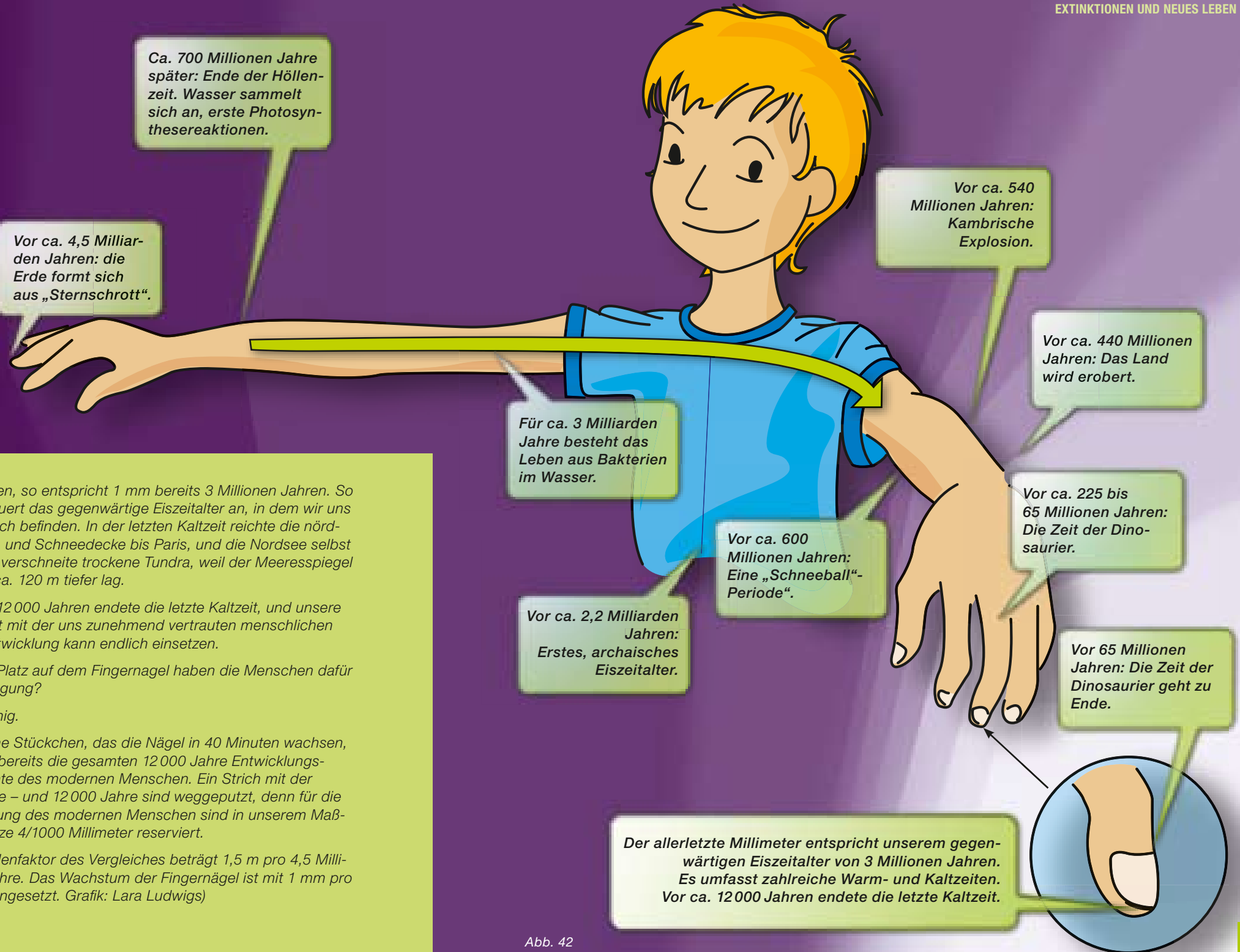
Vor ca. 540 Millionen Jahren: Kambrische Explosion.

Vor ca. 440 Millionen Jahren: Das Land wird erobert.

Vor ca. 225 bis 65 Millionen Jahren: Die Zeit der Dinosaurier.

Vor 65 Millionen Jahren: Die Zeit der Dinosaurier geht zu Ende.

Der allerletzte Millimeter entspricht unserem gegenwärtigen Eiszeitalter von 3 Millionen Jahren. Es umfasst zahlreiche Warm- und Kaltzeiten. Vor ca. 12 000 Jahren endete die letzte Kaltzeit.





# 5

## DER WEG IN DIE GEGENWART

5.1 DIE JÜNGEREN KLIMADATEN .....	122
TEMPERATURTRENDS FÜR DEUTSCHLAND .....	125
REGIONAL AUFGELÖSTE GLOBALE TEMPERATURTRENDS .....	128
5.2 VERSTEHEN WIR DIE DATEN? .....	129
EL NIÑO .....	132
RÄTSELHAFTE KLIMASCHWANKUNGEN, KLEINE EISZEIT .....	134
5.3 KLIMAPROJEKTIONEN – MÖGLICHE ZUKÜNFTIGE KLIMAENTWICKLUNGEN .....	138
KLIMAMODELL-ZUKUNFTSPROJEKTIONEN .....	142
KIPPELEMENTE IM KLIMASYSTEM .....	144
IPCC-BERICHTE .....	146

# DIE JÜNGEREN KLIMADATEN

Die Kapitel über die Physik der Atmosphäre und der Rückblick auf die wechselvolle Klimageschichte der Erde haben uns die vielfältigen und bisweilen höchst überraschenden Zusammenhänge des natürlichen Geschehens gezeigt. Nun sind wir mit unseren Betrachtungen fast in der Gegenwart angekommen. Deshalb sind wir nicht mehr auf indirekte Klimazeugen aus Eis, Fossilien, Sedimenten und Gesteinen angewiesen, sondern können auf Berichte und Chroniken oder sogar auf wetterkundliche Aufzeichnungen zurückgreifen. Etwa seit 200 Jahren existieren so vertrauenswürdige Daten, dass sie eine sehr genaue Analyse der jüngeren Klimavergangenheit erlauben. Weil sich in dieser Zeitspanne auch das menschliche Handeln verändert hat, hat man gute Chancen, die menschlichen Einflüsse auf das Klimageschehen von den natürlichen Klimafaktoren zu trennen. Erst wenn dieser Ansatz zum Erfolg führt, kann überhaupt eine Projektion in die Zukunft gewagt werden. Dabei bewegen uns zahlreiche Fragen:

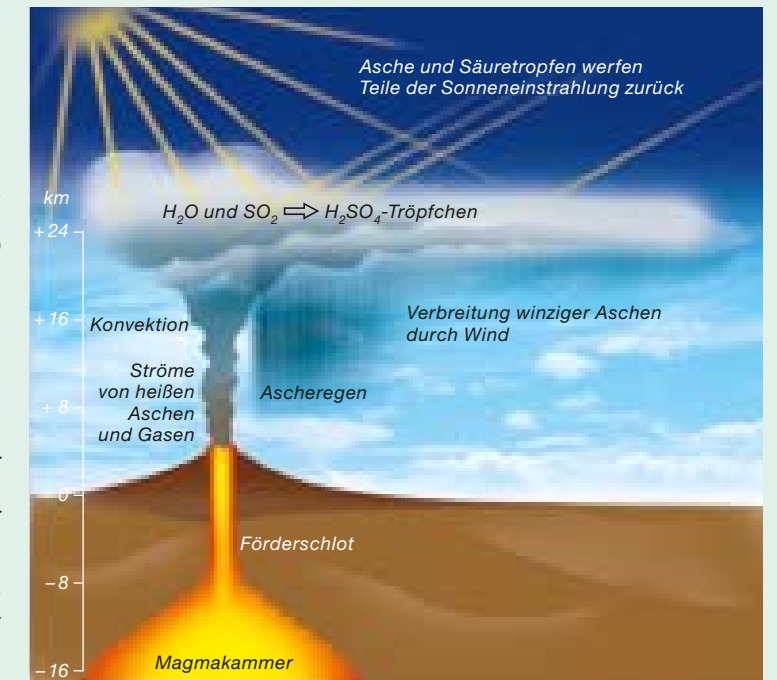
- Wie war das Klima vor Beginn des Industriezeitalters und wie hat es sich seitdem verändert?
- Haben die Menschen das Wettergeschehen und das Klima beeinflusst?
- Wo stehen wir heute?
- Wie wird sich die Menschheit in Zukunft entwickeln und wie wird sie die Schätze der Erde, insbesondere die fossilen Energievorräte nutzen?
- Mit welchen Folgen ist zu rechnen – was wird auf uns zukommen?
- Was kann man heute tun?

Dieser Themenkomplex steht im Zentrum der Kapitel 5 bis 7.

Mit Sicherheit haben die Menschen durch Waldrodungen, Landwirtschaft und Städtebau schon seit Jahrtausenden das regionale Klima deutlich beeinflusst. Trockengelegte Moore, Seen, Staudämme und begradigte Flüsse verändern den Wasserhaushalt. Massive Abholzungen können eine unumkehrbare Erosion auslösen, denken wir dabei an die frühen Kahlschläge im Mittelmeerraum. Das Klima in einer Großstadt unterscheidet sich deutlich vom Klima einer offenen Landschaft und noch mehr vom Klima im Wald. Am deutlichsten wird das am Temperaturgang, an der Luftfeuchtigkeit und an der Luftbewegung. Dennoch kann man sicher sein, dass vor der Industrialisierung noch keine global wirksamen Veränderungen durch menschliches Handeln ausgelöst wurden.

Erst ab etwa 1850 ergab sich eine neue Situation durch die einsetzende Industrialisierung mit der stark anwachsenden Förderung und Verbrennung von Kohle. Wie wir wissen, verteilt sich das frei gesetzte  $\text{CO}_2$  in der gesamten Atmosphäre und verbleibt dort für Jahrhunderte. Zusätzlich werden unter anderem auch schwefelige Abgase ( $\text{SO}_2$ ), Rußpartikel und andere Aerosole emittiert. Aerosole sind kleinste Schwebepartikel, die als Kondensationskeime für Wassertröpfchen die Strahlungsbilanz und die Wolkenbildung beeinflussen. Sie wirken durch Streuung abkühlend auf das Klima der Troposphäre. Wie wir in Abb. 49

Abb. 43: Im April 1815 explodierte der auch heute noch aktive indonesische Vulkan Tambora. In der Region starben über 70 000 Menschen. Die maximale Konzentration der stratosphärischen Aerosole stellte sich erst nach vielen Monaten ein, weil sich die winzigen klimawirksamen Partikel (Tröpfchen) nur langsam aus den Gasen ( $\text{SO}_2$ ) bilden. Dieser Effekt war so ausgeprägt, dass es im Folgejahr 1816 auf der gesamten Nordhalbkugel zu einem extrem kühlen „Jahr ohne Sommer“ kam. Die dadurch bedingten Missernten führten zur schlimmsten Hungersnot des 19. Jahrhunderts und zu weltweit anhaltenden schweren sozialen Krisen (nach Ref. 16).



sehen werden, hat dieser Abkühlungstrend die Erwärmung durch den anthropogenen Treibhauseffekt bisher sehr deutlich gemildert. Auch bei Vulkanausbrüchen werden große Mengen von Aerosolen ausgestoßen – sogar bis weit in die Stratosphäre. Dort verbleiben sie für einige Jahre, vermindern ebenfalls die Sonneneinstrahlung und beeindrucken durch spektakuläre, farbige Sonnenuntergänge. Die Explosion des Tambora im Jahr 1815 ist das einschneidendste derartige Ereignis in der jüngeren Geschichte. Die weit reichende und lang anhaltende Wetterwirksamkeit der Emissionen des Tambora gab einen entscheidenden Anstoß für die Wetterkundler, die globalen Zirkulationsmuster in der Atmosphäre zu erforschen und zu kartieren.

Betrachten wir nun einige langjährige Temperatureaufzeichnungen. Kann man trotz des

sehr wechselhaften Schwankungsmusters auch eine gerichtete Veränderung, einen so genannten „Trend“ erkennen? Liegt eine langfristige Erwärmung oder Abkühlung vor?

Wir beginnen mit einer Rückschau auf die Temperaturentwicklung in Deutschland seit 1760. Die Abb. 44 zeigt die Jahresmittelwerte, und es ist offensichtlich, dass selbst diese von Jahr zu Jahr um bis zu 4 Grad streuen.

Diese natürliche Variabilität, das „Klimarauschen“, überlagert den langfristigen Trend. Um die Daten zu glätten, bildet man Jahr für Jahr 30-jährige „fließende“ Mittelwerte, fasst also die 15 Jahre vor und nach einer Jahreszahl zusammen. Das Ergebnis zeigt die blaue Kurve, die aber immer noch sehr deutliche Schwankungen aufweist. Mit Hilfe der Ausgleichsrechnung kann man eine einfache



Parabel an die Daten anpassen und so den „ruhigen Trend“ erkennen (gestrichelte Kurve).

Dieser Trend enthüllt eine Erwärmung von ca. +1 °C pro 100 Jahre, beginnend etwa um 1900. Das gilt annähernd auch für die jeweiligen jahreszeitlichen Trends, obwohl die überlagerten Schwankungen deutlich veränderte Bilder für die Sommer- und Winterzeiten ergeben.

Wenn man die jahreszeitlichen Grafiken genauer betrachtet, erkennt man, dass sich die Streuung der Daten für die Sommer- und Wintertemperaturen stark unterscheidet. **Die Winterwerte variieren erstaunlich heftig.** Es gab immer wieder Winter, die besonders kalt (bis zu 6 °C kälter als langjährige Winter-Mittelwerte) oder ungewöhnlich warm waren (2 – 3 °C über dem Mittelwert bzw dem Trend). Dagegen zeigen die Sommermonate keine derart extremen Abweichungen vom langjährigen Mittelwert.

Warum? Weil sich die Landschaft in unseren Breiten nur im Winter mit einer stark reflektierenden Schneedecke überziehen kann. Die Variation der Albedo verstärkt die winterlichen Temperaturschwankungen. Zudem ist es typisch für einen strengen Winter, dass stabile Hochs die Westwinddrift der Tiefs blockieren und polare Festlandsluft zuströmen lassen. In milden Wintern dagegen führt die Westwinddrift deutlich wärmere maritime Luftmassen zu uns, und eine stabile Schneedecke kann sich nicht ausbilden.

Es ist übrigens angesichts der oben erwähnten natürlichen Variabilität von bis zu 4 °C außerordentlich bemerkenswert, dass eine

langfristig anhaltende globale Klimaänderung von nur 3 – 4 °C bereits den drastischen Unterschied zwischen einer Kaltzeit („Eiszeit“) und einer Warmzeit ausmacht.

Die entsprechende langjährige Statistik für die Niederschläge im Jahresmittel in Deutschland zeigt ebenfalls einen schwach zunehmenden Trend. Er setzt sich zusammen aus einer deutlichen Zunahme im Winter und ständig geringeren Sommerniederschlägen. Für die Bewertung der Niederschlagstätigkeit ist das Auftreten von Extremwerten besonders wichtig, denn Überschwemmungen oder Dürreperioden haben oft hohe Schäden zur Folge. Deshalb werden diese Vorgänge auch sehr sorgfältig von den Versicherungsgesellschaften registriert und statistisch ausgewertet. Dabei zeigt sich tatsächlich, dass insbesondere im Winter eine deutliche Tendenz zu extremeren Niederschlägen festzustellen ist. In der Zeit von 1901 bis 2003 ergab sich an einer Station nahe Limburg (Lahn) eine deutliche Tendenz sowohl zu geringeren als auch gleichzeitig zu wesentlich stärkeren Niederschlägen auf Kosten der mittleren Werte, Abb. 45.

Diese lokalen Niederschlagswerte darf man aber keinesfalls direkt auf andere Regionen übertragen, denn mehr noch als bei der Temperatur ergeben sich sehr starke regionale Unterschiede mit zum Teil sogar umgekehrten Trends. Eine besonders eindrucksvolle Darstellung der Trends der Winterniederschläge in Europa zeigt die Abb. 46. Neben einer Niederschlagszunahme in Deutschland, Skandinavien und Schottland sind deutlich geringere Niederschläge im Mittelmeerraum zu verzeichnen. Das kann eine erhebliche Beeinträchtigung der regionalen Wasserversorgung bedingen.

## TEMPERATURTRENDS FÜR DEUTSCHLAND

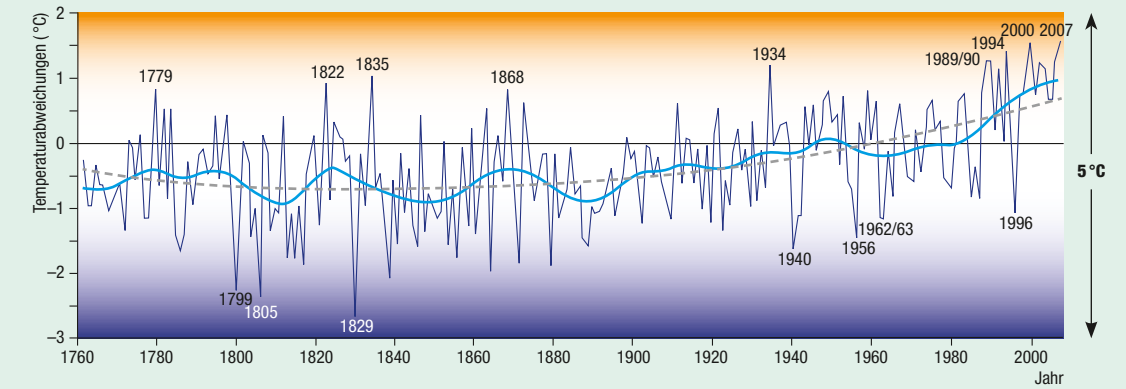


Abb. 44a: Jahresmittel (Flächenmittel für Deutschland) der bodennahen Lufttemperaturen, bezogen auf den Mittelwert von 8,3 °C (Mittelwert der Referenzperiode 1961–1990). Die blaue Kurve zeigt die Glättung durch 30-jährige Mittelung, die gestrichelte Kurve ist eine Anpassung an eine einfache Parabel.

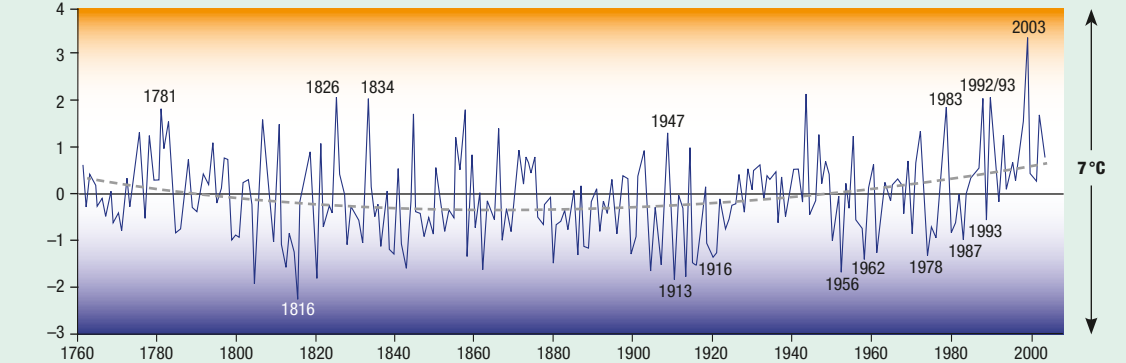


Abb. 44b: Gemittelte Temperaturen der Monate Juni, Juli, August, bezogen auf den Mittelwert von 16,2 °C (Referenzperiode 1961–1990). **Die Temperaturskala ist erweitert auf 7 °C.**

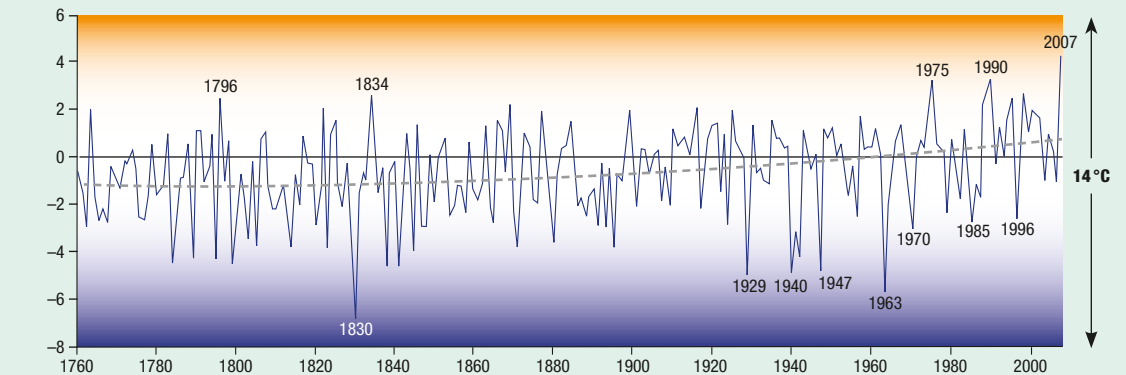


Abb. 44c: Gemittelte Temperaturen für Dezember, Januar, Februar, bezogen auf den Mittelwert von 0,2 °C (Referenzperiode 1961–1990). Es fällt auf, dass die Wintermonate sehr starke Temperaturschwankungen aufweisen. Die Erklärung findet sich auf der linken Seite. **Die Temperaturskala ist erweitert auf 14 °C.** (Nach Ref. 1, Daten von J. Rapp und DWD)

## WINTERNIEDERSCHLÄGE NAHE LIMBURG (LAHN)

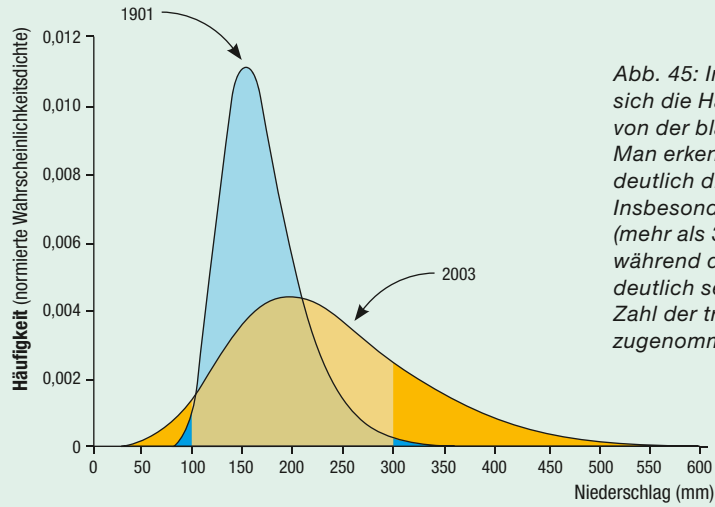


Abb. 45: In der Zeit von 1901 bis 2003 hat sich die Häufigkeitsverteilung allmählich von der blauen zur gelben Kurve verändert. Man erkennt an der breiteren Verteilung deutlich die Zunahme der Extreme: Insbesondere die stärkeren Niederschläge (mehr als 300 mm pro Winter) sind häufiger, während die mittleren Niederschläge deutlich seltener werden. Aber auch die Zahl der trockenen Winter (< 100 mm) hat zugenommen (Ref. 1).

Die globale Klimadatenbasis des letzten Jahrhunderts ist nahezu unerschöpflich und könnte Stoff für viele dicke Bücher liefern, denn die regionale Wetterentwicklung variiert ganz erheblich. Neben den Trends sind dabei vor allem die Abweichungen vom Mittelwert wichtig. Besonders bedrohlich und für die Erinnerung am einprägsamsten sind die Extremwetterlagen mit Unwettern, Stürmen, Überschwemmungen, aber auch Hitzewellen und Trockenheit. Allerdings gibt es gerade bei der statistischen Erfassung und Bewertung der Extreme auch die größten Probleme, weil diese Ereignisse naturgemäß ausgesprochen selten sind. Beispielsweise erwies sich der Hitzesommer 2003 mit Temperaturabweichungen von +3 °C über dem Mittelwert in Deutschland als der mit Abstand wärmste Sommer seit 1760. Diese sommerliche Extremwetterlage wurde auf Grund der langjährigen Statistik bisher als äußerst unwahrscheinlich bezeichnet („höchstens einmal in 500 Jahren“) und wird nun oft gedeutet als ein möglicher Hinweis dafür, dass weitere ungewöhnlich heiße und trockene Sommer

folgen könnten. Glücklicherweise sind die Ereignisse mit besonders großen Schäden auch am seltensten. Die Versicherungsmathematiker machen sich viele Gedanken dazu, denn die Erfassung der mit Großschäden verbundenen finanziellen Risiken wird für sie eine fast unlösbare Aufgabe, wenn sich ein noch unbekannter Trend hinter den Fluktuationen verstecken sollte.

Auch Sturmschäden sind in diesem Zusammenhang ein wichtiges Thema. Denken wir an Hurrikan Katrina in New Orleans oder an Orkan Lothar, der in Deutschland extreme Schäden angerichtet hat. Sind das bereits Beweise für einen möglicherweise sogar globalen Trend? Das ist noch völlig offen, denn aus der Statistik der Stürme ergeben sich bisher keine eindeutigen Befunde. Dennoch geht man davon aus, dass die Intensität der tropischen Wirbelstürme anwachsen wird, weil eine erhöhte Lufttemperatur mit entsprechend höherer Luftfeuchtigkeit auch mehr Energie in die Atmosphäre einbringt. Dagegen sollten die Luftdruckgegensätze über Europa

bei einer weiteren Erwärmung abnehmen. Deshalb vermuten viele Meteorologen eine Verlagerung der Zugbahnen starker Stürme in Richtung Norden. In Deutschland könnte die Zahl der starken Stürme abnehmen, während England und Skandinavien häufiger betroffen wären.

Von allen Klimadaten hat sich die mittlere bodennahe Lufttemperatur als die statistisch und physikalisch am zuverlässigsten auswertbare Größe erwiesen. Sie steht deshalb auch bei uns im Mittelpunkt aller Diskussionen. Ein globaler Rückblick auf das letzte Jahrhundert zeigt einen Erwärmungstrend im Flächenmit-

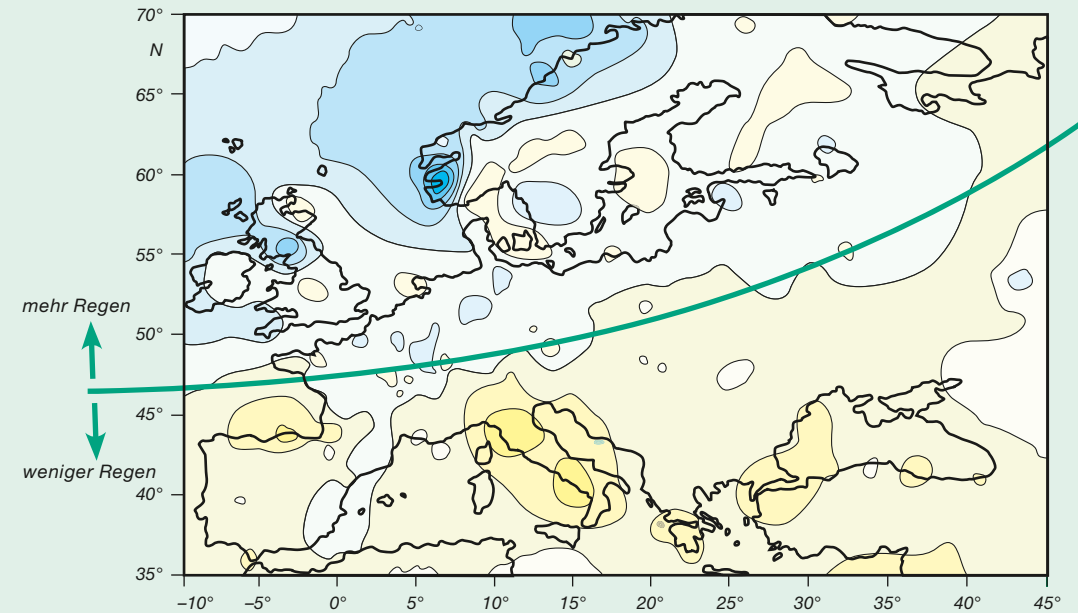


Abb. 46: Gemessene Trends der Winterniederschlagssumme in mm für die Monate Dezember, Januar, Februar. Betrachteter Zeitraum: 1951 – 2000.

Die Farben weiß bis dunkelblau zeigen eine Niederschlagszunahme von 0 bis zu +300 mm. Die Farben hellgelb bis dunkelgelb zeigen eine Abnahme von 0 bis -100 mm.

1 mm entspricht 1 Liter/m<sup>2</sup> (nach Ref. 1, Schönwiese und Janoschitz, 2008).

## Globale Temperaturtrends der letzten 100 Jahre

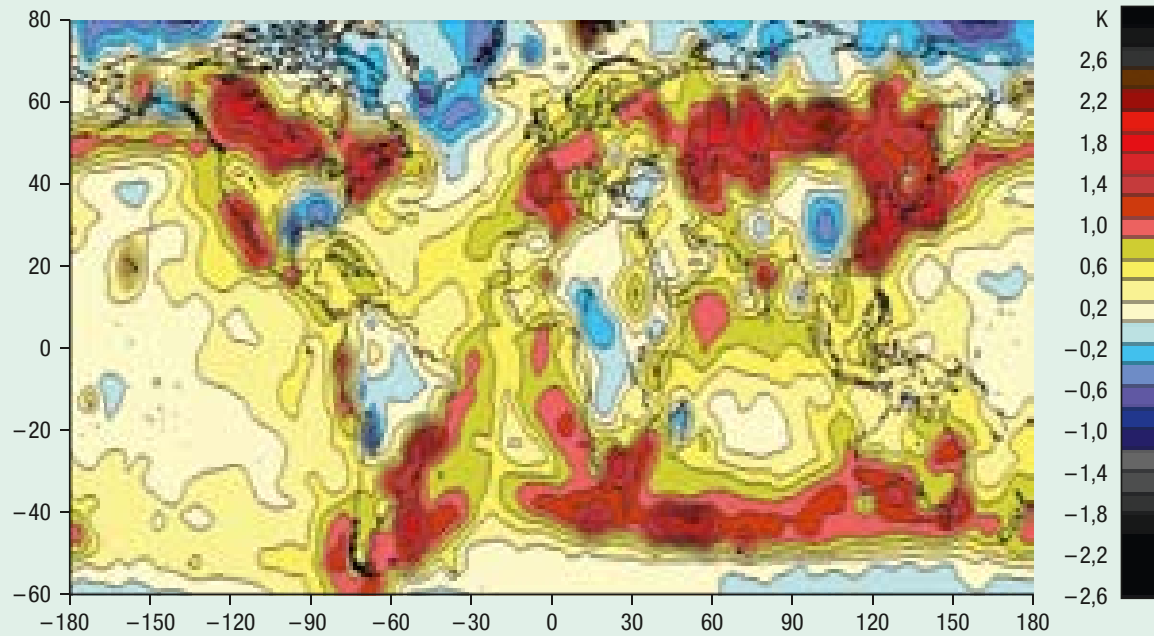


Abb. 47: Weltkarte mit der Darstellung der regional aufgelösten Temperaturtrends über 100 Jahre (1901 – 2000). Man erkennt große Gebiete mit kräftigen Erwärmungen (bis über +2,3 °C), aber erstaunlicherweise auch Regionen mit Abkühlungen (bis fast – 1 °C). Das globale Flächen- und Jahresmittel zeigt dennoch eine Erwärmung um 0,7 °C in 100 Jahren (Ref. 1).

Weil die Umrisse der Kontinente nicht leicht zu erkennen sind, ist es hilfreich, einen Blick auf die Abb. 11, S. 36 zu werfen.

tel, der für Deutschland ca. +1 °C/100Jahre ausmacht. Global beträgt er etwa +0,7 °C/100 Jahre. Schaut man sich die einzelnen klimatischen Regionen an, so erkennt man ganz erstaunliche Unterschiede. Es scheint derzeit zwei „Erwärmungsgürtel“ zu geben. Ein einheitlicher globaler Trend ist nicht zu erkennen.

Es lohnt sich, die Abb. 47 in Ruhe zu studieren und die unterschiedlichen Regionen zu identifizieren, denn bisweilen werden regionale Abkühlungstrends trickreich herangezogen,

um die gesichert nachgewiesene globale Erwärmung bestreiten zu können.

Parallel zur Erwärmung um 0,7 °C ist der mittlere Meeresspiegel von 1901 bis 2000 um 17 cm angestiegen. Der Anstieg um 1,7 mm pro Jahr ist marginal angesichts der Bedrohungen durch Sturmfluten mit Hochwasser und Wellenhöhen von vielen Metern. Auch der derzeitige Anstieg von 3,1 mm/Jahr (S. 142) kann keinesfalls als Ursache für große Überschwemmungen herangezogen werden.

## VERSTEHEN WIR DIE DATEN?

Auf den vorhergehenden Seiten haben wir in einer Rückschau die Trends für die gemessenen Temperaturen ohne jede detaillierte Analyse oder Ursachenforschung wiedergegeben. Im folgenden diskutieren wir vor allem die globale mittlere Temperatur, weil dieser Wert am zuverlässigsten ausgewertet und modelliert werden kann. Die regionalen Trends sowie Niederschläge, Wind und Bewölkung sind derzeit viel weniger zuverlässig modellierbar und werden im folgenden nicht näher betrachtet. Wenn man dagegen die ausführlichen IPCC-Berichte zu Rate zieht, findet man auch zu diesen Klimaelementen zahlreiche Informationen (vgl. S. 146).

Die zentrale Herausforderung jeder Modellierung ist es, zuerst die Klimavariationen der Vergangenheit quantitativ zu reproduzieren. Dazu muss man die Beiträge der globalen Klimafaktoren, natürliche und anthropogene, mit den gemessenen Daten in Beziehung setzen und prüfen, in wie weit sich diese Einflüsse aus den Schwankungen des Klimas herauschälen. Am besten wäre es, wenn man alle Klimaeinflüsse erkennen und in den Daten genau erfassen, also von einander trennen könnte, um auf diese Weise das „zufällige Klimaraussehen“ zu minimieren. Das ist unser Ziel. Erst danach kann man den Einfluss des menschlichen Handelns erkennen und in einem weiteren Schritt auch einen Blick in die Zukunft wagen.

Zuerst wird man mit Hilfe der Klimamodelle prüfen, ob allein die natürlichen Einflüsse

ausreichen könnten, um das beobachtete Klimageschehen zu bewirken. Deshalb zeigt die Abb. 48 den gemessenen Temperaturgang seit 1900 und die zusammengefassten Resultate von 23 Modellrechnungen (IPCC 2007), wobei im wesentlichen nur die Einflüsse von Sonnenaktivität und Vulkanismus berücksichtigt wurden. Den umfangreichen Gang der Berechnungen können wir hier natürlich nicht darstellen.

Statt dessen wenden wir uns direkt der entscheidenden Beobachtung zu:

Der gemessene Temperaturgang bis etwa 1970 ist möglicherweise noch überwiegend durch natürliche Vorgänge erklärlich, aber danach öffnet sich eine Diskrepanz, die sich nur durch den Anstieg der anthropogenen Emissionen erklären lässt.

Wir wollen nun noch genauer auf die Daten schauen und betrachten dazu die Entwicklung der globalen Temperatur-Mittelwerte (Flächenmittel der bodennahen Lufttemperatur) seit 1860. Mit Hilfe statistischer Berechnungen korrelieren wir sie mit den bekannten Messwerten für die Variation der Sonneneinstrahlung, dem Vulkanismus und den pazifischen El-Niño-Oszillationen sowie andererseits mit den anthropogenen Einflüssen durch Treibhausgase und durch Aerosole aus Emissionen in die untere Atmosphäre. Als Quellen

## GLOBALTEMPERATUR 1900 – 2008

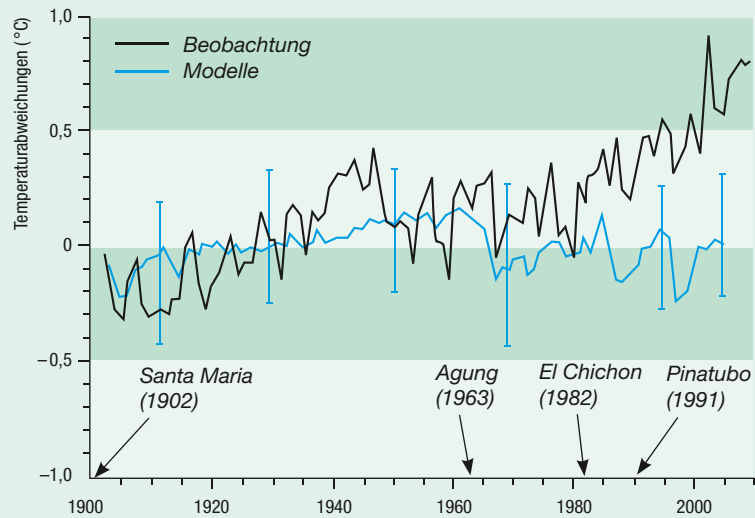


Abb. 48: Die schwarze Kurve zeigt die gemessenen globalen Temperaturänderungen seit 1900 (Die Abb.44a zeigt die entsprechenden Messwerte nur für Deutschland). Die blaue Kurve ist eine Zusammenfassung von 23 Klimamodellrechnungen nach IPCC 2007. Bei diesen Rechnungen wurden nur natürliche Einflüsse berücksichtigt, insbesondere die Sonnenaktivität und der Vulkanismus. Die vertikalen Balken zeigen die Streuung der Modellrechnungen. Man erkennt, dass der beobachtete Trend für die Temperatur seit etwa 1970 nicht mehr durch natürliche Einflüsse zu erklären ist (nach Ref. 1 und IPCC).

## GLOBALTEMPERATUR 1860 – 2008

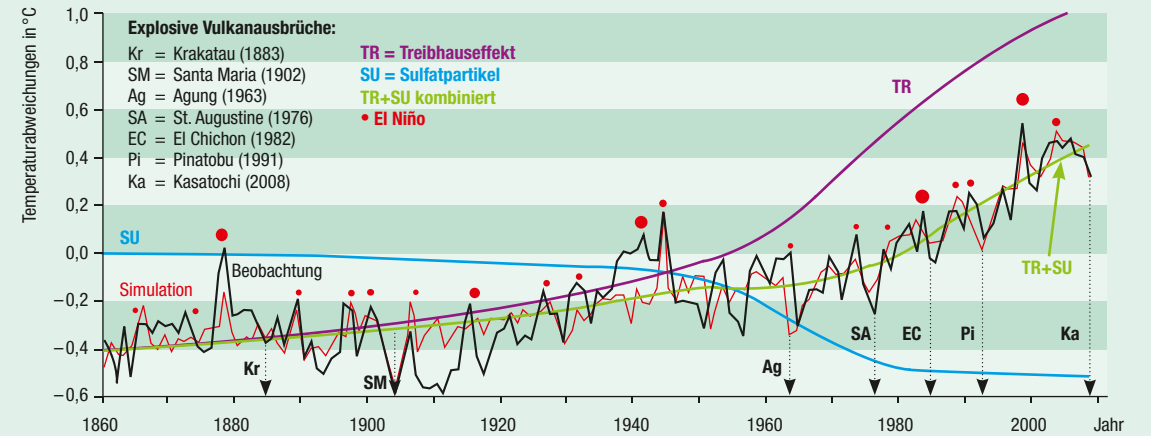


Abb. 49: Die schwarze Kurve zeigt den Verlauf der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur seit 1860. Die rote Kurve ist eine statistisch-mathematische Analyse dieser Daten mit Hilfe eines „Neuronalen-Netz-Modells“. Dabei wurden die folgenden Einflussgrößen berücksichtigt:

- anthropogene Treibhausgase (TR), erwärmend,
- anthropogene Sulfat-Aerosole (SU), abkühlend,
- El-Niño-Ereignisse, erwärmend
- Vulkaneruptionen, abkühlend
- Sonnenaktivität

Es ist bemerkenswert, dass die Sulfatmissionen den Einfluss der Treibhausgasemissionen sehr deutlich gemildert haben (nach Ref. 1 und Mitteilungen der DMG 1/2009, S. 4).

für die Aerosole kommen die schwefelhaltigen Brennstoffe und die Erzverarbeitung in Betracht, weil beim „Rösten“ der Erze ebenfalls viel  $\text{SO}_2$  frei gesetzt werden kann.

Das Diagramm Abb. 49 gibt die Resultate wieder. Die Messdaten zeigen einen Anstieg um  $0,8^\circ\text{C}$  für den Zeitraum von 1860 bis 2008. Man erkennt einen Erwärmungstrend, der ungefähr ab 1960 sehr kräftig ansteigt und als Treibhaussignal interpretiert werden kann. Sein Gesamtbeitrag von 1860 bis 2008 macht sogar  $1,4^\circ\text{C}$  aus. Allerdings wirkt dem ein abkühlender Einfluss von Sulfat-Aerosolen entgegen. Er beträgt  $-0,5^\circ\text{C}$ , so dass sich aus dieser Berechnung für den Zeitraum von 150 Jahren ein anthropogener Einfluss von ca.  $+0,9^\circ\text{C}$  (global) ergibt. Auch die großen Vulkaneruptionen sind vermerkt, weil sie je-

weils zu einer Abkühlung von bis zu  $0,2^\circ\text{C}$  für einige Jahre beitragen. Die El-Niño-Ereignisse beeinflussen den pazifischen Raum sehr kräftig, sind aber für das Klima in Europa kaum signifikant. Im globalen Jahresmittel schlagen sie noch mit bis zu  $0,3^\circ\text{C}$  zu Buche, obwohl der Effekt immer nur wenige Monate anhält. Sie sind in der Abbildung durch rote Punkte gekennzeichnet. Mehr Informationen zum El Niño finden sich auf S. 132.

Die in Abb. 49 dargestellten Resultate sind sehr vertrauenswürdig, weil sie gut mit den physikalischen Prinzipien und mit den Ergebnissen der großen globalen Klimamodelle (Tabelle 4, S. 141) übereinstimmen. Sie zeigen einen eindeutigen und deutlichen Erwärmungstrend, für den ein zunehmender Treibhauseffekt verantwortlich ist.

**Deshalb können wir davon ausgehen, dass wir die Entwicklung der mittleren globalen Temperatur der nahen Vergangenheit verstanden haben und sie korrekt mit physikalischen Modellen berechnen können. Das ist unter den Klimawissenschaftlern inzwischen weltweit und allgemein akzeptiert.** Nur außerhalb der Fachwelt gibt es noch einige Skeptiker, die den deutlichen Einfluss der Treibhausgase bezweifeln.

Das bedeutet aber keinesfalls, dass die Fachleute für Klimamodellierung nunmehr alle Probleme gelöst hätten. Wie schon der Blick auf die Abb. 46 und 47 zeigt, kann bereits die eminent wichtige Vorhersage für große Regionen oder einzelne Klimazonen, beispielsweise für Nordeuropa, den Mittelmeer- oder den Alpenraum, nicht mehr allein

mit Hilfe des globalen Trends für die Temperatur beschrieben werden. Hier sind sehr viel detailliertere Klimamodelle gefordert. Will man versuchen, Aussagen über kleinere Gebiete (wie etwa Norddeutschland) oder gar einzelne Regionen (Allgäu) zu treffen, so stoßen die Modelle schnell an ihre Grenzen. Um die geographische Struktur der Regionen (Berge, Küsten, Seen, Städte) angemessen zu berücksichtigen, muss das regionale Geschehen mit deutlich feinerer räumlicher Auflösung in die grobmaschigen globalen Modelle (S. 141) eingebunden werden. Der Einsatz eines „regionalen Vergrößerungsglases“ wird „Nesting“ genannt, weil dabei ein feineres Netz mit einer Ortsauflösung von derzeit vielleicht 50 km in das gröbere globale Netzwerk eingefügt wird. Es liegt in der Natur der bisweilen Monate lang laufenden Rechenprogramme,



## EL NIÑO

El Niño ist ein wiederkehrendes Wetterphänomen im Pazifik. Es ist als Wechselspiel von Atmosphäre und Ozean inzwischen gut verstanden und wird als Beispiel für großräumige Klimaschwankungen betrachtet (Ref. 1). Im Fall von El Niño handelt es sich um ein Hin- und Herschwingen zwischen zwei ausgeprägten Zuständen, nicht jedoch um ein irreversibles klimatisches Umkippen.

Dabei verändert sich das Luftdruck- und Windmuster zwischen Südamerika und Indonesien in unregelmäßigen Abständen von drei bis acht Jahren. Der Mindestabstand zwischen zwei El Niños beträgt drei Jahre und kennzeichnet die stabile Normal-Wetterlage.

Ursache für die Instabilität und die Oszillationen ist der Energieaustausch zwischen der weiträumigen atmosphärischen Zirkulation (Luftdruck, Windrichtung und Niederschlag) und der Oberflächenschicht des Pazifiks (Wassertemperatur und windgetriebene Strömung). Unterschiede der Wassertemperatur an der Meeresoberfläche lassen die Hoch- und Tiefdruckgebiete entstehen und erzeugen damit die Winde. Die Winde ihrerseits treiben die Meeresströmungen an und verändern damit großräumig die Temperatur an der Meeresoberfläche.

Man kann nicht entscheiden, ob der Ozean oder die Atmosphäre als Auslöser wirkt, denn beide sind Akteure in einem gemeinsamen Geschehen. Weil jeder El Niño bereits Vorgänge auslöst, die ihn nach wenigen Monaten wieder schwächen, überwiegt insgesamt eine negative (stabilisierende) Rückkopplung innerhalb eines Systems mit zwei metastabilen Zuständen.

Ein El Niño bewirkt eine windgetriebene Strömung von warmem Oberflächenwasser bis vor die Küste Perus. Dort wird die Klimawirksamkeit des kalten Humboldtstroms abgeschwächt, und die Temperaturen an der Wasseroberfläche können um bis zu 7 °C ansteigen. Die Wetteränderungen sind erheblich und bewirken feuchtes Wetter an der Westküste von Süd- und Nordamerika sowie trockenes Wetter im

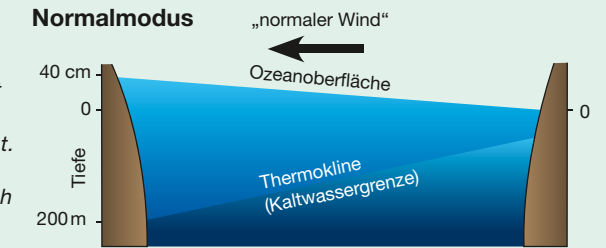
dass jede Halbierung der Maschenweite, etwa von 100 x 100 km<sup>2</sup> auf 50 x 50 km<sup>2</sup>, jeweils eine Verachtfachung der Rechenzeiten bedingt, so dass die Klimaforscher fast immer den Einsatz der größten verfügbaren Superrechner benötigen.

Die Modellierungen der Klima-Elemente, die über die mittlere Temperatur hinausgehen, ergeben bisher widersprüchliche oder sehr unsichere Resultate, so dass man den Niederschlag, die Wolkenbildung oder die Windmuster noch nicht im Griff hat. Offensichtlich muss es dann auch noch weitaus schwieriger sein, eine Eintrittswahrscheinlichkeit für deren Extremereignisse, wie Starkregen oder Stürme, abzuschätzen. Hier ist man nach wie vor auf „intelligente Vermutungen“ angewiesen. Die Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Starkregen im Bodenseegebiet zusammen mit einer Schneeschmelze in den Alpen zu einer großflächigen Überschwemmung im Gebiet der Rheinanlieger führen wird, muss derzeit offen bleiben.

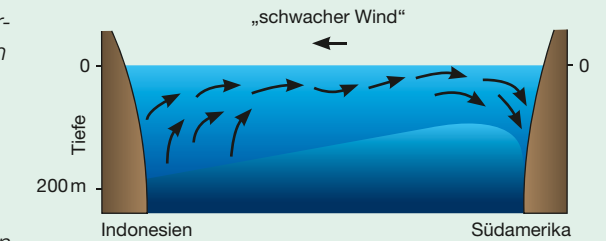
**Wenn wir uns abschließend noch einmal fragen, ob wir die Daten verstanden haben, so können wir zumindest für die mittlere globale Temperatur der letzten 150 Jahre festhalten, dass wir dieses Klimaelement recht genau analysieren und seine Entwicklung beschreiben können. Das ermutigt uns, auch eine Projektion in die Zukunft zu wagen (ab Seite 138).**

Abb. 50:

- a) Normalmodus: Der kräftige Südost-Passat treibt das Wasser des Pazifik nach Westen, so dass dort der Meeresspiegel um bis zu 40 cm ansteigt.  
b) El Niño: Der Wind ist nur schwach, das Wasser strömt zurück und der Meeresspiegel gleicht sich aus. Tropisch warmes Wasser erreicht die Küste vor Peru (nach Ref. 1).



El Niño (Warmwasserereignis)



Westpazifik. Der El Niño 1982/83 führte zu Überschwemmungen in den Wüsten Perus, dagegen zu katastrophaler Trockenheit in Australien.

Ein El Niño ist für das Klima in Europa kaum relevant. Allerdings werden ähnliche Oszillationen der Luftdruckmuster auch über dem Nordatlantik zwischen Island und den Azoren registriert („Nordatlantik-Oszillationen“, NAO). Sie scheinen das Auftreten von strengen oder milden Wintern in Nord- und Mitteleuropa zu beeinflussen.

Die El-Niño-Oszillationen zeigen, wie die Koppelung zwischen Meeresströmungen und der Atmosphäre zu einer Eigendynamik im Klimageschehen führen kann. Ähnliche Vorgänge im Bereich des Nordatlantikstroms könnten ein großes Rätsel der Vergangenheit lösen: Warum gab es immer wieder sehr schnelle, heftige

Klimaschwankungen vom Nordatlantik bis nach Westeuropa? In Eisbohrkernen aus Grönland wurden mindestens 25 solcher rasanten Klima-Umschwünge während der letzten großen Vereisung nachgewiesen (115 000 – 11 000 Jahre v.h.). Sie werden nach ihren Entdeckern als Dansgaard-Oeschger-Ereignisse bezeichnet (vgl. Abb.37e, S. 112, Ref. 1 und wikipedia).

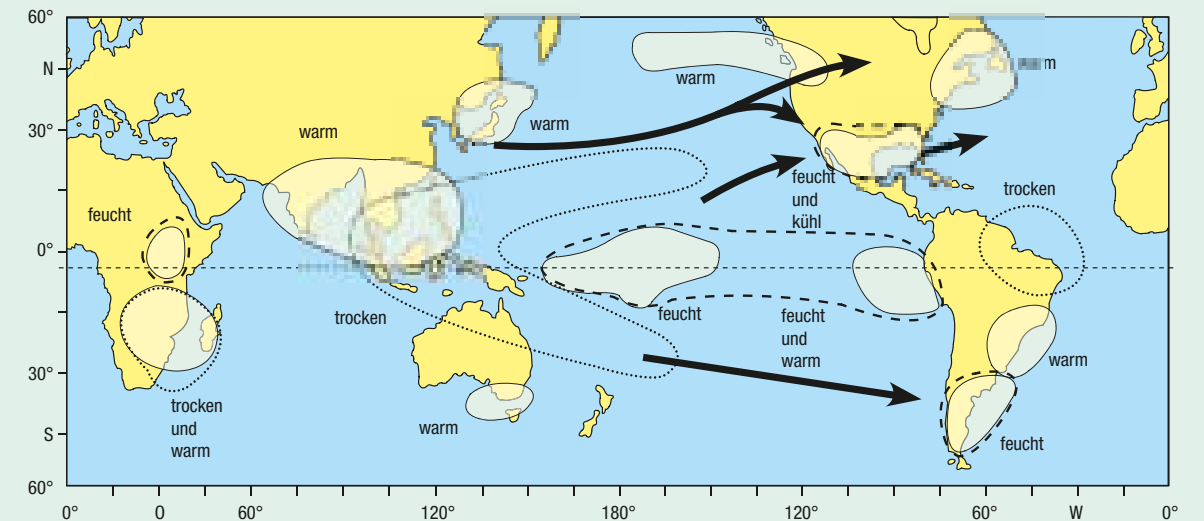


Abb. 51: Typische Temperatur- und Niederschlagsanomalien („feucht“: mit unterbrochenen Linien umrahmte Gebiete; „trocken“: punktiert umrahmte Gebiete; „hell“: warme Gebiete) sowie Hauptstrahlstromrichtungen (Jetstreams) während eines El-Niño-Ereignisses (nach Ref. 5).

# Rätselhafte Klimaschwankungen der nahen Vergangenheit

## Eine „Kleine Eiszeit“ und günstige Jahrhunderte wechseln sich ab

Selbst in den letzten tausend Jahren wurde unser Klima in Europa durch deutlich spürbare natürliche Schwankungen geprägt, die fast bis in unsere unmittelbare Gegenwart reichen. Die Suche nach den Ursachen muss die gesamte Vielfalt der Wetterakteure berücksichtigen.

Wie wir wissen, kann unser Wetter von sehr unterschiedlichen Luftmassen bestimmt werden:

- die Westwinddrift mit den vielen eingelagerten Tiefs und den weniger zahlreichen Zwischenhochs,
- die stabilen Hochdruckgebiete der Subtropenregion (Azorenhoch) und
- die polaren Luftströmungen.

Entscheidend sind außerdem die Sonneneinstrahlung, die Warmwasserheizung durch den Nordatlantikstrom und die abkühlend wirkende Albedo von Schnee und Meereis. Inzwischen ist uns bewusst, dass das komplexe Zusammenwirken der unterschiedlichen Akteure zu fluktuierenden Effekten führen kann. Deshalb bewirken kleine externe Auslöser bisweilen unerwartet starke Reaktionen im Klimageschehen.

Dabei werden vor allem zwei natürliche Auslöser für die erheblichen Klimaschwankungen in den letzten Jahrtausenden betrachtet. Da ist zuerst die Sonne zu nennen, deren Einstrahlung auf die Erde in mehrjährigen Zeiträumen geringfügig, im Promillebereich, variiert. Diese Schwankungen der Aktivität zeigen sich oft auch an den Sonnenflecken, wobei viele Flecken auf eine „unruhige Sonne“ mit erhöhter



Abb. 53: Lucas van Valckenborch (1586): Winterlandschaft (Kunsthistorisches Museum, Wien). In der „Kleinen Eiszeit“ waren die Winter deutlich schneereicher und kälter als gegenwärtig.

Abstrahlung hinweisen. Zum zweiten haben wir am Beispiel des Tambora bereits gesehen, dass der aktive Vulkanismus einen deutlichen Einfluss besitzt.

Diese schwachen Auslöser (Trigger) im Zusammenspiel mit der Eigendynamik des Klimas werden für die natürliche Klimaentwicklung der letzten Jahrtausende verantwortlich gemacht. Über die Jahrhunderte betrachtet, zeigt das Klima offensichtlich eine erhebliche Labilität (Empfindlichkeit gegenüber Störungen), die zu deutlich spürbaren Langzeit-Schwankungen geführt hat.

So hat es in Europa und im Mittelmeerraum während der Zeit um Christi Geburt eine relativ lange und ausgesprochen warme Zeit mit günstigen Niederschlagsmustern gegeben, in der Nordafrika als Kornkammer des römischen Imperiums diente. Hannibal konnte mit seinen Kriegselefanten die Alpenpässe überqueren. Die Vegetationsperiode in Mitteleuropa war einige Wochen länger als heute, so dass der Weinbau sogar in England möglich wurde.

Das günstige Klima mit Weinbau in England stellte sich im „mittelalterlichen Optimum“ wiederum ein. Nordafrika litt allerdings in dieser Periode unter großer Trockenheit.

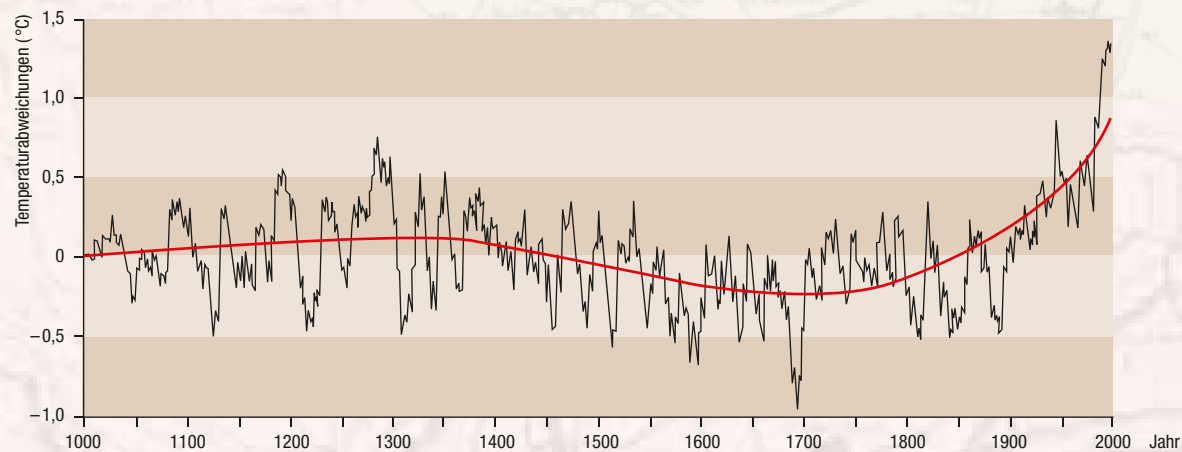


Abb. 52: Rekonstruktion der Jahresabweichungen 1000 – 2006 der mittleren bodennahen Lufttemperatur in Mitteleuropa aufgrund historischer Quellen, übergreifende 11-jährige Mittelwerte und langfristiger Trend (nach Ref. 1 und Glaser und Riemann, 2008).





Abb. 54: Die Nordseeküste wurde in der Vergangenheit von mehreren verheerenden Sturmfluten heimgesucht.

Das nebenstehende Bild zeigt die Folgen eines Deichbruchs im Bereich der Weser.

den Anwohnern ersehnte Rückzug der Alpengletscher aus den Tälern in höhere Regionen ein.

Der lange Zeitraum des kälteren Klimas in Mitteleuropa und wohl auch in Nordamerika und Ostasien von ca. 1300 bis 1900 könnte insgesamt als „Kleine Eiszeit“ bezeichnet werden (Ref. 1), obwohl meistens dafür nur kürzere Zeiträume angegeben werden, etwa 1500 – 1800. Es ist bemerkenswert, dass die Alpengletscher noch um 1850 ihre maximale Ausdehnung besaßen und dass erst ab 1900 wieder deutlich wärmere Temperaturen erreicht wurden. Höchst überraschend ist die Rekonstruktion des Temperaturverlaufs dieser Zeit, denn es zeigt sich, dass diese einschneidenden klimatischen Umschwünge nur mit relativ geringen Änderungen der mittleren Jahrestemperaturen verknüpft waren. Leider gibt es aus dieser

Zeit noch keine zuverlässigen Thermometerdaten, sondern nur indirekte Rekonstruktionen. Man geht heute von einer Abkühlung von etwa  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  für Nordeuropa und im globalen Mittel aus, obwohl regional auch mittlere Jahrestemperaturen berichtet werden, die um  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  unter den heutigen Werten lagen.

Es zeigt sich auch hier, dass die Kenntnis der Extremwerte (strenge Winter) und der Klimadetails (kühle und nasse Sommer oder Spätfröste) mindestens so wichtig ist wie die Angabe einer mittleren Temperatur. Daran sollten wir uns erinnern, wenn zukünftige Klimaentwicklungen diskutiert werden.

Abb. 55: Die kalten Winter nach 1550 schlugen sich auch in der niederländischen Malerei nieder. Die dick vereisten Wasserflächen boten bequeme Verkehrswege und Flächen für Märkte und Volksfeste.



Dieses günstige Klima wurde in der Folge durch deutlich ungünstigere Jahrhunderte unterbrochen, stellte sich aber in der Zeit von 850 bis 1200 wieder ein. Dieses „mittelalterliche Optimum“ ermöglichte eine fruchtbare Entwicklung der Landwirtschaft bis nach Grönland.

Allerdings sind auch mindestens fünf verheerende Sturmfluten zu verzeichnen: 1099, 1212, 1218, 1287 und 1362. Ab 1300 kühlten sich die nördlichen Gewässer wieder deutlich ab, das Meereis drang ständig weiter nach Süden vor, und die Siedlungen in Grönland wurden wieder aufgegeben.

Der harte Winter 1322/23 übertraf alles davor und danach bei weitem. Die Kaufleute zogen mit ihren Wagen über das Eis der Ostsee von Rügen aus direkt bis nach Schweden.

Zwischen 1550 und 1770 erreichte die Kälte einen weiteren Höhepunkt. Die Bevölkerung in ganz Europa litt unter langen und schneereichen Wintern. Missernten führten zu Hungersnöten. Wölfe verfolgten die Menschen bis an die Stadtttore. Die isländische Schifffahrt war regelmäßig von Januar bis September durch große Packeismengen blockiert – eine Situation, die heute nur für wenige Tage im Jahr eintritt. Das polare Meereis drang sogar bis zu den Shetland-Inseln vor.

Das Vorrücken der Eisgrenze verschärfte die Temperatur- und Luftdruckgegensätze in unseren Breiten, und die Sturmhäufigkeit im Atlantik nahm zu (Umgekehrt lässt die derzeitige Entwicklung eine deutlich wärmere Nordpolarregion und ein ausgeglicheneres und milderes Klima für Nord- und Mitteleuropa erwarten). Erst gegen 1880 setzte endlich auf Grund des bekannten Erwärmungstrends auch der von

# KLIMAPROJEKTIONEN – MÖGLICHE ZUKÜNFTIGE KLIMAENTWICKLUNGEN

Klimaprojektionen sind die Resultate umfangreicher physikalisch-mathematischer Modellrechnungen. Sie stellen insbesondere die zu erwartende zukünftige Entwicklung der mittleren Temperatur dar, oft schlicht „Erderwärmung“ genannt. Die Komplexität der großen Klimamodelle ist überwältigend. Sie sind immer das Werk eines größeren Teams und einer langjährigen Entwicklung. Deshalb können wir hier nur einige sehr vereinfachte Erläuterungen geben.

Alle Versuche, das Klima der Zukunft abzuschätzen, beginnen mit dem Klima der Gegenwart und setzen in hohem Maße die Stabilität der natürlichen Komponenten voraus. Damit werden die in der Vergangenheit so machtvoll wirksamen natürlichen Klimaänderungen erst einmal als unvorhersehbar ausgeschlossen. Dazu zählen der Einfluss des Vulkanismus und der variablen Sonnenaktivität, die ja unter anderem auch die erheblichen klimatischen Veränderungen der „Kleinen Eiszeit“ bewirkt haben.

Allerdings muss der laufende Erwärmungstrend (S. 130, 131) berücksichtigt werden, weil er auf dem aktuellen und dem weiterhin zu erwartenden Anstieg der Treibhausgas-Konzentration beruht. Immerhin haben wir uns wegen der Zeitverzögerungen im Klimasystem

bereits mit der gegenwärtigen Treibhausgas-Konzentration eine zukünftige Erwärmung um 0,6 °C „eingekauft“, die damit in der gleichen Größenordnung wie der Trend der letzten 100 Jahre liegt.

## Wie kann man den zukünftigen Anstieg der anthropogenen Treibhausgase erfassen?

Um das entscheidende menschliche Handeln zu beschreiben, wurden zahlreiche unterschiedliche „Szenarien“ entwickelt. Diese Szenarien beinhalten ein Spektrum von Entwicklungsprognosen für alle Länder und Regionen der Erde. Zwangsläufig ergeben sich dabei erhebliche Unsicherheiten: Wie entwickelt sich das Wachstum der Weltbevölkerung, der zukünftige Pro-Kopf-Bedarf an Energie, Nahrung und Alltagsgütern, die Nutzung der Erdoberfläche durch Land- und Wasserwirtschaft und Waldrodung sowie der industrielle und technische Fortschritt? Setzen große Teile der Menschheit weiterhin ungebremst auf fossile Energieträger oder ist ein spürbares Umlenken zu erreichen? Eine knappe Zusammenfassung der „Familienstruktur der Szenarien“ findet sich auf S. 49 der Referenz 4\*. Aus jedem Szenario ergeben sich dementsprechend charakteristisch unterschiedliche anthropogene Emissionen.

\*<http://edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel/>  
Dort den Artikel „Klimamodellsimulationen“ öffnen.

Unvorhersehbar bleiben dennoch alle Entdeckungen und unerwartet erfolgreiche Entwicklungen, aber auch technische Katastrophen, Krisen, Kriege oder gesellschaftliche Revolutionen. Auch diese Ereignisse müssen neben der Sonnenaktivität und den Naturkatastrophen wie Erdbeben und dem Vulkanismus unberücksichtigt bleiben. Daraus folgen selbst beim Einsatz einer weit gefächerten Schar von sorgfältig ausgewählten unterschiedlichen Szenarien noch weitere Unsicherheiten, wenn wir z. B. bis zu 100 Jahre in die Zukunft blicken wollen.

Aus der Auswertung der Szenarien erhält man die zu erwartenden Emissionsraten für Spurengase und Aerosole. Deren zukünftige Konzentration in der Atmosphäre muss nun berechnet werden. Mit den Kenntnissen über die Klimawirksamkeit der Emissionen und über den Einfluss der veränderten Erdoberfläche durch Landwirtschaft, Bautätigkeit,

Bewaldung und Bewässerung muss nun das volle Wechselspiel aller Klimaprozesse auf der gesamten Erde, einschließlich der Ozeane und Tiefenströmungen, erfasst und modelliert werden.

Dabei sind die entscheidenden Auswirkungen von klimatischen Wechselwirkungen, Rückkopplungen und Schwellenwerten besonders zu berücksichtigen: Schnee-Eis-Albedo, Wasserdampf und Wolkenbildung, der Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre und möglicherweise großräumige Eisabschmelzungen oder die Veränderungen von Meeresströmungen. Eine dadurch ausgelöste unumkehrbare klimatische Eigendynamik (etwa eine „Klimakatastrophe“ in Form einer großen Eisschmelze) auf Grund menschlicher Aktivitäten wird ausdrücklich zugelassen und in die Modelle mit einbezogen (Siehe auch das Gespräch ab Seite 184 sowie „Kippelemente im Klimasystem“, Seite 144).

*Abb. 56: Die Spurengase in der hohen Atmosphäre werden mit Ballonflügen und nun auch mit einem speziellen Hochleistungsflugzeug untersucht. Die Geophysica, hier vor dem Start in Darwin, Australien, erreicht die extreme Höhe von 22 000 m. Die Geophysica kann kontrolliert die Wolkentürme der Tropengewitter ansteuern und vermessen. Das ist mit Ballons nicht möglich. Wissenschaftler des FZ Jülich konnten mit diesen Flügen nachweisen, dass es neben den Vulkanausbrüchen die sehr hoch reichenden Tropengewitter sind, die einen effektiven vertikalen Transport von Spurengasen bis in die Stratosphäre bewirken.*





In den großen Klimamodellen wird ein Netz aus kastenförmigen Elementen über die gesamte Erde gelegt, vgl. Tabelle 4. Zur Zeit besitzen die Gitternetze Maschenweiten von ca. 100 km bis zu 500 km und modellieren die Atmosphäre mit bis zu 56 übereinander liegenden Schichten. Die Ozeane werden ebenfalls modelliert und in bis zu 47 (!) Schichten zerlegt. Die Berechnungen „krabbeln“ nun Gitternetzpunkt für Gitternetzpunkt über die ganze Oberfläche und schreiten danach um einen Zeittakt in die Zukunft vor. Die Zeitschritte für die atmosphärischen Veränderungen sind typischerweise kürzer als eine Stunde, denn die atmosphärischen Bedingungen verändern sich relativ schnell. Weil die ozeanischen Variationen träger sind als die der Atmosphäre, werden sie mit einer Zeitauflösung von einigen Tagen modelliert. Jede Halbierung der Maschenweite erhöht zwar die räumliche Auflösung, bedingt aber eine Verachtfachung der Rechenzeit. Deshalb stoßen die Klimamodelle fast immer an die Grenzen selbst großer Rechenzentren.

Letztendlich ergibt sich als Resultat dieser aufwendigen Berechnungen eine statistische Aussage über die Langzeit-Entwicklung der mittleren globalen Temperatur: „Wenn ein bestimmtes Szenario die menschlichen Aktivitäten richtig vorhersagt, dann wird sich das Klima so entwickeln, dass die globale Temperatur vermutlich diesen Wert erreichen wird.“  
Erinnern wir uns noch, dass nur 4 bis 5 °C den Unterschied zwischen einer Kaltzeit und einer Warmzeit ausmachen? Deshalb kann ein recht unspektakulärer Temperaturanstieg tatsächlich eine hohe Brisanz entfalten und bereits „eine ganz andere Erde“ beschreiben.

Zehn der wichtigsten globalen Klimamodelle sind in der Tabelle 4 aufgeführt. Ihre Vorher-

sage für die Erwärmung bei einer Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration ist unabhängig von einem möglichen menschlichen Handlungsszenario und ist deshalb eine relativ vertrauenswürdige Zahl. Man erkennt, dass die Sofortreaktion der unteren Troposphäre, die so genannte transiente Klimasensitivität, wesentlich milder ausfällt als die Gleichgewichts-Sensitivität, weil sich die Trägheit (Wärmekapazität) der Eismassen und der Ozeane schnellen Temperaturwechseln eine Zeit lang entgegen stellt. Daraus erklärt sich auch die Erkenntnis, dass wir uns mit der derzeitigen CO<sub>2</sub>-Konzentration bereits eine weitere Erwärmung um 0,6 °C „eingekauft“ haben (Die aktuellen CO<sub>2</sub>-Daten und den erwarteten Anstieg des langfristigen Mittelwerts auf 388 ppm bis Dezember 2009 findet man unter [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends), vgl. Abb. 32).

Eine entscheidende Frage bleibt beim Betrachten der Tabelle 4 natürlich noch offen: Wann in der Zukunft wird eine Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu erwarten sein? Um das herauszufinden, muss auf die erwähnten Szenarien zurück gegriffen werden. Sie reichen vom „Alles so weiter wie bisher“ („business as usual, BAU“, Szenario A1FI) mit deutlichem Wirtschaftswachstum und steigendem Einsatz fossiler Energieträger bis zum Modell einer klimabewussten Weltbevölkerung mit sinkenden Emissionen (Szenario B1). Eine knappe Übersicht über die wichtigsten Szenarien findet sich in Ref. 4 („Klimamodellsimulationen“).

Die Datensätze der unterschiedlichen Szenarien werden in die Klimamodelle eingegeben, um die zukünftige Klimaentwicklung zu berechnen. Wie vom IPCC vorgeschlagen, nennen wir die Ergebnisse „Klima-Projektionen“. Wenn man die Klimamodelle auf vier

#### TAB. 4: CHARAKTERISIERUNG UND ERGEBNISSE DER WICHTIGSTEN GLOBALEN KLIMAMODELLE

Auswahl aus insgesamt 23 Modellen, die dem IPCC-Bericht 2007 zugrunde liegen.

Vertik. Schichten = Anzahl der atmosphärischen Schichten,

Top = Modell-Obergrenze,

KS (GG.) = Klimasensitivität (für verdoppelte CO<sub>2</sub>-Konz.) im Gleichgewicht, nachdem sich alle Klimasphären angeglichen haben,

KS (Trans.) = Klimasensitivität (für verdoppelte CO<sub>2</sub>-Konz.) transient, also die „Sofort-Reaktion“ der Lufttemperatur in der unteren Troposphäre.

Modell (Name)	Institution	Horizontale Auflösung	Vertik. Schicht.	Top (Grenze)	KS (GG.)	KS (Trans.)
CCSM3	NCAR, USA	~ 100 km	26	43 km	2,7 K	1,5 K
CGCM3.1	CCC, Kanada	~ 140 km	29	50 km	4,4 K	1,9 K
CSIRO-MK3.0	CSIRO, Australien	~ 140 km	18	37 km	3,1 K	1,4 K
ECHAM5/OM	MPIM, Hamburg	~ 140 km	31	30 km	3,4 K	2,2 K
GFDL-CM2.1	NOAA u.a., USA	~ 180 km	24	41 km	3,4 K	1,5 K
GISS-ER	GISS, USA	~ 360 km	20	65 km	2,7 K	1,5 K
INM-CM3.0	Inst. Num. Math., Russland	~ 360 km	21	30 km	2,1 K	1,6 K
IPSL-CM4	Inst. P.S. Laplace, Frankr.	~ 270 km	19	38 km	4,4 K	2,1 K
MIROC3.2	CCSR u.a., Japan	~ 80 km	56	40 km	4,0 K	2,1 K
UKMO-HadGEM1	Hadley Centre, UK	~ 140 km	38	39 km	4,4 K	1,9 K

NCAR: National Center for Atmospheric Research, CCC: Canadian Center for Climate Modelling and Analysis, CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Atmospheric Research, MPIM: Max-Planck-Institut für Meteorologie, NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, GISS: Goddard Institute for Space Studies, CCSR: Center for Climate System Response, Univ. of Tokyo

charakteristische so genannte Leitszenarien angewendet, wird ein ganzes Feld von Temperaturentwicklungen aufgespannt, und es ergibt sich die wichtige Abbildung 57.

In Anbetracht der menschlichen Lebensgewohnheiten und der Lebensdauer von Gebäuden, Industrieanlagen und Prozessen, der Verkehrssysteme und der Infrastruktur zeigen alle Projektionen auf der Basis der sehr unterschiedlichen Szenarien dennoch bis zum Jahr 2030 praktisch denselben Trend. Erst

in den späteren Jahrzehnten, in denen zuvor getroffene Entscheidungen und Maßnahmen allmählich klimawirksam werden können, öffnet sich die Schere zwischen den unterschiedlichen Szenarien immer weiter.

Niemand kann heute entscheiden, welche Projektion die Zukunft beschreibt. Auch unvorhersehbare soziale und technische Entwicklungen oder Erfindungen sowie Naturkatastrophen wie Vulkanausbrüche vergrößern die Unsicherheit der Projektionen zusätzlich.

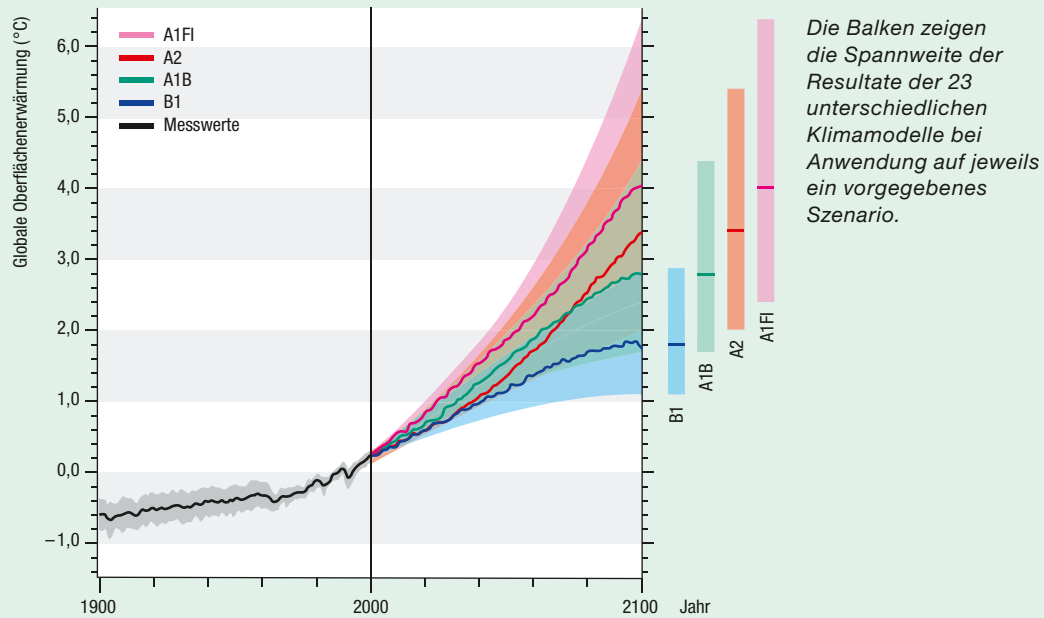


Abb. 57: Gemessener Anstieg der global gemittelten bodennahen Lufttemperaturen seit 1900 und Spannweite zahlreicher Klimamodell-Zukunftsprojektionen unter Verwendung von vier IPCC Leitszenarien. Das günstigste Szenario B1 beschreibt eine globalisierte und technisch hoch entwickelte Welt, in der die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen kaum noch ansteigen und ab 2050 sogar sinken, so dass sie 2100 nur die Hälfte der derzeitigen Werte betragen. Die darauf angewandten 23 Klimamodelle führen zu einem erwarteten Temperaturanstieg von ca. 1,1 – 2,9 °C. Dabei wird als Referenz der Temperaturmittelwert der Jahre 1980 – 1999 benutzt („Referenzjahr 1990“; Abb. nach IPCC).

Das Szenario A1FI (FI = fossil-intensiv) legt eine zügig wachsende Weltwirtschaft zu Grunde, die weiterhin vor allem die fossilen Energieträger nutzt. In diesem Fall steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2100 fast auf das Dreifache der heutigen Werte. Der dafür von den 23 Modellen für 2100 bestimmte Temperaturanstieg um ca. 2,4 – 6,4 °C mit einem besten Schätzwert von 4,0 °C muss als eine realistische Projektion betrachtet werden, denn die Emissionen folgen derzeit noch diesem Szenario.

Die Projektionen für den Anstieg des Meeresspiegels bis zum Jahr 2100 umfassen je nach Modell und Szenario eine Bandbreite von 18 bis zu 59 cm. Satellitenmessungen zeigen einen gegenwärtigen Anstieg von ca. 3,1 mm pro Jahr, das entspräche 31 cm in 100 Jahren. Vergleichen Sie aber bitte auch die Seiten 144, 147 und 189, denn es gibt auch bedrohlichere Prognosen.

**Die Abb. 57 stellt damit in kompakter Form den derzeitigen Wissensstand über die Temperaturentwicklung auf der Erde dar. Sie ist eines der „Schicksalsdiagramme“ unserer Erde und in ihrer Wichtigkeit vergleichbar mit der Darstellung des Wachstums der Weltbevölkerung oder der Zunahme des Welt-Energiebedarfs.**

**In welchem Bereich bewegen sich die Projektionen?**

Erinnern wir uns: Das Klima befindet sich gegenwärtig in einer Erwärmungsphase. Die ausgleichende Wirkung der Ozeane und Eismassen, ihre „thermische Trägheit“, stellt sich schnellen Temperaturänderungen entgegen und verdeckt die Stärke des derzeitigen Ungleichgewichts im Strahlungshaushalt der Atmosphäre (S. 79, 140). Tatsächlich haben wir noch mindestens einen Temperaturanstieg um weitere 0,6 °C zu erwarten – selbst wenn es gelänge, den gegenwärtigen Treibhauseffekt konstant zu halten, den CO<sub>2</sub>-Spiegel der Luft also bei 390 ppm „einzufrieren“.

Betrachten wir nun das **Szenario B1**: In ihm steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2040 nur noch gering an und fallen dann allmählich bis 2100 auf etwa die Hälfte der gegenwärtigen Emissionen. Parallel sinken auch die SO<sub>2</sub>-Emissionen. Diesem Szenario liegt ein schneller und tiefgreifender Umbau der globalisierten Wirtschaft zu mehr Dienstleistungen, weniger Rohstoff- und Energiebedarf und eine kostspielige, umfassende Erneuerung der globalen Energiewirtschaft zu ökologischer Nachhaltigkeit zu Grunde.

Die Weltbevölkerung wächst im Szenario B1 bis 2050 auf 9 Milliarden Menschen an, schrumpft dann aber wieder. In 2100 sollen wieder 7 Milliarden erreicht werden, was dem gegenwärtigen Stand entspräche. Auf dem extrem optimistischen Szenario B1 aufbauend berechnen die unterschiedlichen Klimamodelle einen Temperaturanstieg um 1,1 bis 2,9 °C, bezogen auf 1990. Der beste Schätzwert beträgt 1,8 °C.

Das **Szenario A1FI** nimmt ein kräftiges globales Wirtschaftswachstum mit intensiver Nutzung der fossilen Energieträger an. Die Bevölkerungsentwicklung sei so günstig wie im Szenario B1. Dennoch werden sich die

CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2040 verdoppeln und erreichen wegen des weiter wachsenden Wohlstandes im Jahr 2080 mit 28 Gt C/Jahr fast das Dreifache der gegenwärtigen Werte. Erst danach sinken sie langsam. Die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration würde demzufolge im Jahr 2100 fast 1000 ppm erreichen, was letztmalig in der Warmzeit vor 65 Mio. Jahren erreicht wurde (als die Saurier ausstarben). Der Abb. 57 ist ein Temperaturanstieg um ca. 4,0 °C (beste Schätzung) zu entnehmen. Die Bandbreite (Unsicherheit) der Projektionen reicht von 2,4 bis zu 6,4 °C.

Das **Szenario A1B** geht ebenfalls von einem kräftigen Wirtschaftswachstum aus, wobei allerdings die globale Energiewirtschaft in zunehmendem Maße auch auf regenerative Energien zurückgreifen kann. Die Bevölkerungsentwicklung entspricht Szenario B1 und A1FI. Als Resultat ergeben die Modelle Temperaturanstiege von 1,7 – 4,4 °C, mit einer besten Schätzung von 2,8 °C. Die Prognose für die Bevölkerungsentwicklung in den Szenarien B1, A1FI und A1B ist sehr optimistisch. Auch wesentlich ungünstigere Entwicklungen, wie etwa im Szenario A2, sind realistisch.

Das **Szenario A2** betrachtet eine sehr inhomogene, „fraktionierte“ Welt mit reichen und armen Ländern. In den Entwicklungsländern bleibt der Fortschritt schleppend, die Geburtenraten aber weiterhin hoch. Die Weltbevölkerung wächst demzufolge ständig an und erreicht 2100 sogar 15 Milliarden – das ist mehr als eine Verdoppelung. Die mangelnde „Globalisierung des Fortschritts“ führt zu ständig steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen, die im Jahr 2100 sogar die des A1FI-Szenarios übertreffen werden. Die Perspektiven dieses Szenarios erscheinen in vieler Hinsicht (soziale Konflikte, Kriege, Klimawandel) als besonders bedrohlich. Der Wertebereich für den Temperaturanstieg bis 2100 umfasst 2,0 bis 5,4 °C (beste Schätzung: 3,4 °C).

## KIPPELEMENTE IM KLIMASYSTEM

Man könnte hoffen, dass alle Klimazonen eine gewisse Eigenstabilität gegenüber Störungen besitzen. Das Bild von einer stabilen Erde ist bei den meisten Menschen gefühlsmäßig fest verankert. Allerdings könnte uns ein Ausflug in das Klima der Vergangenheit von dieser Wunschvorstellung schnellstens kurieren. Wenn nun der gegenwärtige Klimawandel dazu führt, dass die Entwicklung, insbesondere die Temperatur, bestimmte Schwellenwerte überschreitet, so werden mit Sicherheit erneut Vorgänge mit einer irreversiblen Eigendynamik ausgelöst.

Wie ist das zu verstehen? Es ist eine klimatisch stabile Situation, wenn im Frühling beim Ansteigen der Temperatur der Schnee abschmilzt, dann aber im nächsten Winter eine entsprechende Schneedecke neu entsteht. Im Jahresgang gibt es dabei zwar zwei Zustände (beschneit oder abgetaut), aber auch ein reversibles Hin und Her. Wenn aber Schwellenwerte, etwa die mittlere Temperatur, über- oder unterschritten werden, dann könnte ein Vorgang dominieren. Es käme in der Folge zu einer Selbstverstärkung und könnte für sehr lange Zeiträume kein Zurück mehr geben.

Ein prägnantes, aber noch hypothetisches Beispiel wäre das rapide Abschmelzen des 3000m dicken Eisschildes in Grönland. Wenn die Eismassen abschmelzen, verschiebt sich deren Oberfläche immer weiter in tiefere und damit wärmere Luftschichten, so dass der Schmelzvorgang zusätzlich beschleunigt wird (Derzeit wird dieser Effekt noch nicht beobachtet).

In der Klimageschichte des Eiszeitalters werden das Eintreten der Kaltzeiten und der besonders rasche Wechsel (das Umkippen) von einer Kaltzeit zu einer warmen Periode mit selbst-verstärkenden Prozessen erklärt, bei denen auch die CO<sub>2</sub>-Aufnahme oder Emission durch die Temperaturänderungen der Ozeane

beteiligt war (S. 156). Bei einer Erwärmung gibt der Ozean CO<sub>2</sub> ab und verstärkt damit den Treibhauseffekt, eine Abkühlung verläuft unter CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch die Meere.

Beispiele für mögliche Klima-Umkippvorgänge der Gegenwart:

- 1 **Eisbedeckung im Nordpolarmeer:**  
Je weiter die Eisflächen abnehmen, desto leichter erwärmt die Sonne das dunkle Wasser, so dass letztendlich der Nordpol für viele Monate im Jahr eisfrei bleiben wird. Dieser Prozess scheint voran zu schreiten.
- 2 **Abschmelzen der Alpengletscher:**  
Dieser Prozess schreitet mit Sicherheit kräftig voran. Eine gewisse Selbstverstärkung der Erwärmung tritt durch den Albedo-Effekt des dunklen, eisfreien Gesteins ein.
- 3 **Abschmelzen der grönländischen Gletscher:**  
Falls sich die dortige Temperatur im Mittel um 3 °C erhöht, befürchten einige Wissenschaftler ein Abschmelzen innerhalb von vielleicht 300 Jahren und ein Ansteigen des Meeresspiegels um etwa 7 m. Andere Kollegen rechnen mit wesentlich längeren Zeiträumen von einigen Jahrtausenden.
- 4 **Auftauen der Permafrost-Regionen der nördlichen Tundra:**  
Es ist unsicher, wann dieser Prozess ausgelöst werden könnte. Das frei werdende Methan und CO<sub>2</sub> würde eine weitere Erwärmung beschleunigen.

Weitere Beispiele finden sich in Ref. 1, Seite 457 und im Internet (Suchwort: climate change tipping points)

Bei einem Temperaturanstieg von 4,0 °C rechnet man mit einem Anstieg des Meeresspiegels um ca. 60 cm bis 2100. Vermutlich wird der Temperaturanstieg in den hohen Breiten generell höher ausfallen als am Äquator und sich auch stärker auf die Biosphäre auswirken. Die Ursache dafür liegt in den Schnee- und Eisflächen, die großflächig abtauen könnten und unter anderem eine verstärkte Erwärmung durch den Eis-Albedo-Effekt erwarten lassen. Zusätzlich gibt die nördliche Tundra Anlass zu besonderer Sorge, denn wenn die dortigen Permafrost-Regionen auftauen, wird obendrein viel Methan frei gesetzt, das wegen seines Treibhauspotentials die Erwärmung noch weiter beschleunigen wird. Die meisten Alpengletscher könnten in einigen Jahrzehnten verschwunden sein. Für das gesamte Nordpolarmeer (Arktis) erwartet man, dass die Eisbedeckung im Sommer nahezu völlig verloren geht. Wir erinnern uns, dass der Meeresspiegel davon nicht beeinflusst wird. Aber auch mindestens 1 % der Eismasse von Grönland würde bis zum Jahr 2100 abschmelzen und mit bis zu 10 cm zum Meeresspiegelanstieg beitragen. Die Eisbedeckung der Antarktis dagegen bleibt wegen der Durchschnittstemperatur von derzeit –30 °C in allen Modellrechnungen erhalten und wird vermutlich wegen des verstärkten Niederschlags aus der erwärmten See sogar noch anwachsen. Von Trockengebieten abgesehen, wäre wegen der erhöhten Verdunstung aus den Wasserflächen ein generell feuchteres Klima zu erwarten, vermutlich mit häufigeren Extremwetterlagen und Starkregen.

Die Unsicherheit der Projektionen für die mittlere globale Temperatur im Jahr 2100 umschließt damit eine Spannweite, die im ungünstigsten Fall einem Klimawechsel von unserer Warmzeit in ein „Supertreibhaus“ beschreiben

könnte. Das wäre äußerst bedrohlich, aber noch gibt es begründete Hoffnung auf eine wesentlich mildere Entwicklung. Bei unserem heutigen Wissen liegen die zahlreichen, oft vehement vertretenen Prognosen noch immer nahezu gleichberechtigt innerhalb eines Bereiches zwischen einer maximal erwarteten Erwärmung von über 6 °C und niedrigeren Temperaturen mit geringerem Schadenspotential. Wir verzichten deshalb hier auf die Diskussion der möglichen Auswirkungen eines Klimawandels von noch unbekannter Stärke und verweisen dafür auf die ausführlichen englischsprachigen Darstellungen der Arbeitsgruppen WG2 und WG3 des IPCC (S. 146), insbesondere die Technical Summaries (TS), sowie auf das ausführliche Kapitel 4 der Ref. 4 (in deutscher Sprache).

Es ist vor allem den Klimamodellrechnungen und dem IPCC zu danken, dass die Problematik eines anthropogenen Klimawandels inzwischen auch in der breiten Öffentlichkeit erkannt und diskutiert wird. Es ist bemerkenswert, dass die Fachwelt bereits vor dreißig Jahren die heutige Situation mit recht einfachen Berechnungen weitgehend korrekt vorhergesagt hat – damals ohne erkennbare Resonanz in der Öffentlichkeit.

Um eine möglicherweise sehr gefährliche Entwicklung zu vermeiden, gilt es trotz aller Unsicherheiten, die möglichen Handlungsoptionen zu erkennen, sie realistisch zu bewerten und zielgerecht umzusetzen. Wo stehen wir, was sollten wir tun und was können wir realistisch erreichen? Diese Fragen werden im nächsten Kapitel so sorgfältig und genau wie derzeit möglich beantwortet. Zwangsläufig gerät dabei der Energiebedarf einer noch immer anwachsenden Weltbevölkerung in das Zentrum unserer Betrachtungen.



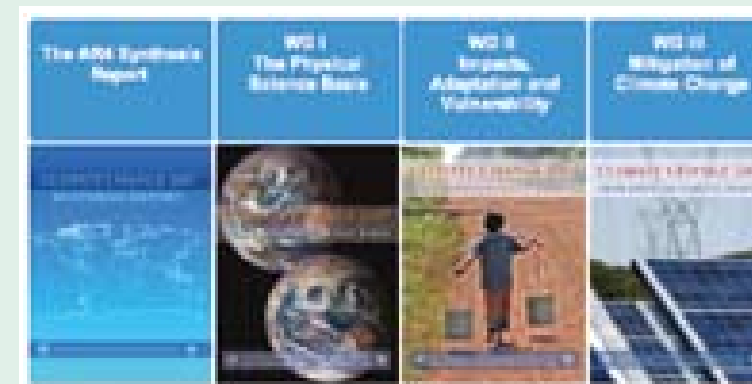
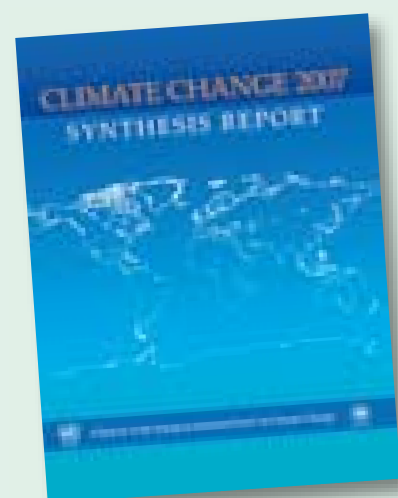
Das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, kurz „Welt-Klima-Rat“ genannt) wurde 1988 von der UNO ins Leben gerufen und genießt hohes Ansehen. Das IPCC wurde kollektiv geehrt durch den Friedens-Nobelpreis 2007. Es fasst die Ergebnisse von tausenden Fachpublikationen kompetenter Wissenschaftler zusammen, die sich der Vergangenheit und Zukunft des Klimas aus den unterschiedlichsten Perspektiven angenommen haben. In Abständen von wenigen Jahren wird der Stand des Wissens in sorgfältigen Berichten von drei Arbeitsgruppen („Working groups, WG“) niedergelegt. WG1 befasst sich mit dem Stand der Wissenschaft („Science“), WG2 mit den Auswirkungen des Klimawandels und mit Anpassungsstrategien („Impact, Adaptation and Vulnerability“), WG3 mit der Milderung des Klimawandels durch Reduktion der Emissionen aller Treibhausgase („Mitigation“).

Das IPCC verbindet damit rein wissenschaftliche Forschungsergebnisse mit den wünschenswerten politischen Konsequenzen.

Der neueste, vierte Bericht („AR4“, Fourth Assessment Report, 2007) ist im Internet über „www.ipcc.ch“ leicht zu erreichen. Er ist sehr gut gegliedert, umfasst aber wegen der Vielfalt der Szenarien und der möglichen klimatischen, wirtschaftlichen und sozialen Entwicklungen insgesamt fast 3000 Seiten und ist deswegen nur mühevoll zu lesen und zu interpretieren. Viel kompakter (jeweils 90 Seiten) und sehr empfehlenswert sind die rein wissenschaftlich orientierten drei „Technical Summaries (TS)“, die vorne in den Berichten der drei Arbeitsgruppen zu finden sind. Diese Texte sind in vielen Sprachen verfügbar, aber leider nicht in Deutsch. Außerdem gibt es noch weiter verkürzte „Sum-

maries for Policymakers“ von je 10 – 20 Seiten, bei deren Formulierung auch Politiker Einfluss genommen haben. Der Katalog der derzeitigen Emissionen und der möglichen Emissionsmindernden Maßnahmen im Summary der WG3 führt die gewaltige Dimension der Probleme eindrucksvoll vor Augen.

Das IPCC hat eine umfangreiche Hierarchie („Familienstruktur“) von Szenarien entwickelt, um eine breite Ausgangsbasis für die Klimamodellrechnungen zu liefern (beschrieben im „IPCC-SRES“, Special Report on Emission Scenarios sowie im Summary der WG2; außerdem in deutscher Sprache verfügbar auf Seite 49 der Ref. 4). Diese physikalisch-mathematische Modellierung des Klimas, ausgehend von Szenarien, ist gegenwärtig die einzige Methode, um mögliche zukünftige Entwicklungen aufzuzeigen: „Wenn-Dann-Projektionen“. Die physikalische und klimatologische Datenbasis und die Resultate werden im Report und im Technical Summary der WG1 dargestellt. Die WG2 diskutiert die zahllosen Konsequenzen



(Risiken, Klimafolgen). Allerdings bewirken die erwähnten Unsicherheiten in den Szenarien und die begrenzte Auflösung und Genauigkeit der Modellierung gewaltige Spannweiten in den Projektionen.

Alle Projektionen (Szenario plus Klimamodellrechnung) sind gleichberechtigt, aber bestenfalls nur ein einziges Resultat kann richtig sein – aber welches? Tatsächlich ist keines der SRES-Szenarien prinzipiell unrealistisch. Deshalb kann man keinesfalls durch Mittelung der Endergebnisse auf die wahrscheinlichste Vorhersage schließen.

Dazu ein Beispiel: Für 2100 wird auf Grund aller IPCC-Szenarien ein Anstieg des Meeresspiegels von maximal 0,6 m erwartet. Andere Wissenschaftler befürchten dagegen eine sich selbst verstärkende gewaltige Eisschmelze in Grönland mit einem Anstieg des Wasserspiegels um bis zu sieben Metern in 300 Jahren, also 2,3 m pro 100 Jahre. Eine Mittelwertbildung auf einen Kompromisswert von 1,5 m als „wahrscheinlichsten Meeresspiegelanstieg“ würde auf einem Denkfehler beruhen, denn das Klima der Erde mittelt keineswegs über unsere virtuellen Modellierungen. Wenn der erste Fall eintritt, könnte man vielleicht sogar auf eine gewisse Klimaverbesserung in Deutschland hoffen. Der zweite Fall dagegen beschreibt eine gewaltige globale Katastrophe mit schweren Überschwemmungen der tief liegenden Regi-

onen. Dabei würden im Endeffekt der Lebensraum und die Ernährungsbasis von vielleicht einer Milliarde (!) Menschen zerstört. Man mag sich die einschneidenden Konsequenzen dieser Klimaprojektion gar nicht ausmalen. Noch ist unser Wissen lückenhaft. Selbst wenn wir die größten Supercomputer einsetzen, ergeben sich große Unsicherheiten.

Dennoch sollten uns die Berichte des IPCC und die virtuelle Welt der bereits jetzt vorliegenden Zukunftsprojektionen intensiv motivieren, alle realen Möglichkeiten zu nutzen, damit das reale Klima möglichst keiner der Horrorvisionen folgt. Viele eindeutige Fakten liegen bereits auf dem Tisch, und die in den Projektionen aufgezeigten Risiken sind bedrohlich. Nur gibt es für die realen Entwicklungen auf der Erde keinen „Computer-Neustart“, um nach einem Katastrophenergebnis mit einem neuen Programm wieder ganz von vorne zu beginnen.



WMO

World Meteorological  
Organization



UNEP

United Nations  
Environmental Programme



# 6

## DIE GEGENWART

6.1 KÖNIG KOHLENSTOFF – ZU LAND, ZU WASSER UND IN DER LUFT .....	150
UNERSETZLICHER KOHLENSTOFF .....	154
DIE ROLLE DER GEWALTIGEN OZEANE .....	156
DAS IONENGLEICHGEWICHT IM MEERWASSER .....	160
DIE BILANZ DES KOHLENSTOFFS IN DER GEGENWART .....	162
6.2 REALITÄTEN DES ENERGIEBEDARFS UND DER ENERGIEVERSORGUNG .....	164
MONTREAL 1987 – EIN MEILENSTEIN FÜR DEN SCHUTZ DER ATMOSPHÄRE .....	166
VON RIO ÜBER KYOTO NACH KOPENHAGEN .....	168
6.3 ZUKÜNFTIGE ENERGIEVERSORGUNG UND EMISSIONSSZENARIEN .....	170
UMWELTSCHUTZ, VERMEIDUNGSKOSTEN UND MARKTWIRTSCHAFT .....	179

# KÖNIG KOHLENSTOFF – ZU LAND, ZU WASSER UND IN DER LUFT



Im letzten Kapitel haben wir das Klimageschehen im Industriezeitalter mit den modernsten Werkzeugen der Klimaforschung untersucht und sind abschließend mit den Projektionen für die Temperatur bis weit in die Zukunft vorgestoßen. Von den Szenarien und den Klimamodellen haben wir zur Kenntnis nehmen müssen, dass es im globalen Mittel mit Sicherheit wärmer wird. Nur das Ausmaß der Erwärmung ist mit Unsicherheiten behaftet, obwohl das bedrohliche „Schicksalsdiagramm“ auf Seite 142 bereits eine eindeutige Botschaft vermittelt. Natürlich fragen wir uns, ob die Annahmen in den Szenarien und die vorgestellten Resultate vielleicht fehlerhaft oder übertrieben und zu pessimistisch sein könnten.

Um hier Klarheit zu schaffen, wollen wir auf den folgenden Seiten versuchen, unsere Welt aus einer gemeinsamen Perspektive von Naturwissenschaft, Technik und Klimaforschung zu betrachten. Wie wir wissen, beruht auch unser eigener Wohlstand derzeit ganz wesentlich auf der Nutzung der fossilen Energieträger Öl, Kohle und Gas. Deshalb wurden diese Bodenschätze über lange Jahrzehnte als großartiges Geschenk der Natur betrachtet. Sie werden so intensiv genutzt, weil sie eine sehr hohe Energiedichte besitzen, gut transportiert und gespeichert werden können, noch immer reichlich verfügbar sind und weil ihr Preis letztendlich günstig ist. Überall, be-

sonders aber in den Industrieländern, wurde über viele Jahrzehnte mit hohem finanziellen Aufwand eine Infrastruktur etabliert, um diese Ressourcen in großem Umfang nutzen zu können. Noch sind diese Energieträger auf dem Weltmarkt preiswert. Auch die Schwellenländer mit ihren Bevölkerungsmilliarden sind auf sie angewiesen, wenn sie ihre Entwicklung vorantreiben und im internationalen Wettbewerb mithalten wollen. Auch deshalb wird seit Jahren ein ansteigender Verbrauch dieser Energieträger und eine zunehmende CO<sub>2</sub>-Emission gemessen, welche bisher leider dem ungünstigsten der IPCC-Szenarien (A1FI) entspricht.

Gegenwärtig wird die Suche nach leistungsfähigen und emissionsarmen Alternativen immer dringlicher. Es zeigt sich dabei, dass es zwar viele Alternativen gibt, diese aber meistens deutlich teurer und oft nicht ausreichend leistungsfähig oder bedarfsgerecht verfügbar sind.

Wie ist es möglich, dass der Kohlenstoff und seine Verbindungen so überragend wichtig und nahezu unersetzlich scheinen?

## EIN TIPP:

**Die Darstellungen des sechsten Kapitels sind besonders wichtig für das Verständnis der Gegenwart. Sie erläutern die wichtigsten Fakten der globalen Energieversorgung in möglichst einfacher Form.**

**Bitte schrecken Sie nicht vor den Zahlen und den wenigen chemischen Formeln zurück, sondern versuchen Sie zumindest, dem Gang der Argumente zu folgen.**

**Das große Bild der globalen Zusammenhänge ist relativ leicht zu verstehen und gewinnt in diesem Kapitel Schritt für Schritt an Klarheit. Dabei ergibt sich eine zuverlässige Faktenbasis, um auf die wichtigen Fragen nach Umfang, finanziellem Aufwand und tatsächlicher Wirksamkeit der wünschenswerten Emissionsminderungen eine Antwort zu finden.**

Nun – der Kohlenstoff ist tatsächlich mit so einmaligen Eigenschaften ausgestattet, dass er zum wundersamsten Element der Schöpfung wurde. Deshalb betrachten wir auf den nächsten Seiten die dominante Rolle des Kohlenstoffs in Chemie und Biologie. Im Anschluss tauchen wir noch einmal ab in die Tiefe der Ozeane, um Erstaunliches über diesen Teil des Kohlenstoffkreislaufs zu erfahren. Danach schlüpfen wir in die Rolle eines globalen Buchhalters, der sich um die Kohlenstoff-Bilanz zu kümmern hat. Dann werden die gegenwärtige Energieversorgung und ihre Entwicklungstendenzen betrachtet. Dabei können wir uns kurz fassen, denn

dieses Thema wurde in Referenz 2 sorgfältig und verständlich dargestellt.

Mit diesem Wissen ausgestattet, wenden wir uns einer Schlüsselfrage der Gegenwart zu: Welche realistischen Alternativen gibt es zur Verbrennung von fossilem Kohlenstoff und wie kann man zumindest die CO<sub>2</sub>-Emissionen mindern?

Letztendlich bietet dieses Kapitel eine solide Basis, um in der gegenwärtigen Diskussion über Energieversorgung, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Handlungsoptionen einen persönlichen Standpunkt zu finden.

## Das Leben und unsere Technik wären ohne Kohlenstoff unvorstellbar.

Wenn man im Chemie- oder Bio-Unterricht abstimmen würde, welche chemischen Elementen für das Leben am allerwichtigsten sind, so wird die Wahl neben H und O sehr schnell auf C fallen. Natürlich sind Wasserstoff und Sauerstoff unentbehrlich, denn ohne Wasser gibt es kein Leben. Aber bei genauerem Hinschauen erkennt man, dass der Kohlenstoff das wundersamste und mit über 1,5 Millionen verschiedenen Verbindungen das bei weitem vielfältigste Element des ganzen Periodensystems ist. So sind Kohlenstoffverbindungen zuständig für die biologische Strukturbildung, für alle biologischen Funktionen und für die Energiespeicherung in der lebendigen Welt. Die gesamte Biologie und die organische Chemie sind primär „Kohlenstoffchemie“.

Auch die großartigste und genialste Erfindung aller Zeiten, die Photosynthese, nutzt die verschiedenen Bindungszustände des Kohlenstoffs, um daraus energiereiche Verbindungen aufzubauen. Deshalb beruhen alle Lebensmittel und alle fossilen Energieträger auf Kohlenstoffverbindungen oder auf reinem Kohlenstoff. Bei ihrer Nutzung entsteht fast immer das stabile  $\text{CO}_2$ -Molekül als Abfall, als unvermeidliche „Asche“. Diese „Asche“ landet meistens direkt in der Atmosphäre. Ein Mensch atmet etwa 50 Gramm  $\text{CO}_2$  pro Stunde aus. Bei Tempo 100 pustet ein durchschnittlicher PKW pro Stunde rund 15 kg „Asche aus dem Auspuff“, denn jeder Liter Benzin verwandelt sich in 2,2 kg  $\text{CO}_2$ . Ein großes Kohlekraftwerk (1 GW el. Leistung) kann pro Stunde über 1000 t „ $\text{CO}_2$ -Asche“ in die Luft blasen.

## Wie entfernt die Natur das $\text{CO}_2$ wieder aus der Luft?

Vielleicht erinnern wir uns, dass auf der Erde, im Gegensatz zur Venus, ständig vier bedeutende natürliche Prozesse ablaufen:

- die Photosynthese,
- die Chemie der biologischen Kalkbildung (S. 160)
- die geologische Verwitterung, wie auf S. 92 dargestellt, und
- die Absorption von  $\text{CO}_2$  im kalten Wasser der Weltmeere. Darauf werden wir auf Seite 156 noch im Detail eingehen.

Die gegenwärtige Verteilung des Kohlenstoffs auf unserer Erde wurde schon auf Seite 114 gezeigt. Es lohnt sich an dieser Stelle, die sehr unterschiedlichen Kohlenstoffkreisläufe auf Seite 115 zu betrachten. Erinnern wir uns noch daran, dass die natürliche Verwitterung große Kohlenstoffmengen in Sedimenten bindet? Die Subduktion der Meeresböden unter die Kontinentalplatten und der Vulkanismus sorgen anschließend als „Geologischer Thermostat“ dafür, dass auf einer geologischen Zeitskala von sehr vielen Jahrtausenden immer flüssiges Wasser auf der Erde vorhanden bleibt.

Die entscheidende Rolle der Photosynthese für der Bildung einer Sauerstoffatmosphäre begann vor ca. 3 Milliarden Jahren. Nach wie vor bilden sich auf diese Weise aus  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und Lichtenergie Kohlenstoffhydrate wie Glukose oder Zellulose ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ )<sub>n</sub> sowie freier Sauerstoff. Derzeit sind etwa 600 Gt Kohlenstoff in den lebenden Pflanzen und Tieren gebunden. Durch Wachstum, Ernte, Verzehr, Atmung und Absterben wird ein Kohlenstoffkreislauf von fast 120 Gt/Jahr aufrecht

erhalten. Dieser gegenwärtige „Kreislauf des Lebens“ verändert den  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Luft nicht nachhaltig. Allerdings kann beim Verrotten von Wurzelmasse oder dem Verbrennen auch Kohlenstoff in Form von Humus oder Holzkohle in den Boden gelangen, so dass dort etwa 1500 Gt C gebunden sind. Es wird gegenwärtig dringend empfohlen, den Humus- und Holzkohlegehalt der Böden weiter zu erhöhen, um dort zusätzlichen Kohlenstoff zu binden und gleichzeitig die biologische Qualität der Böden zu verbessern. Statt dessen gelangt durch das Roden und Abbrennen von Wäldern leider viel zusätzlicher Kohlenstoff aus der Biomasse als  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre – wovon letztendlich nur ein gewisser Prozentsatz wieder in neu wachsenden Pflanzen gebunden wird, sofern ein neues Wachstum überhaupt erfolgen kann.

Ganz anders muss man den Kohlenstoff bewerten, den die Pflanzen vor Jahrmillionen der Atmosphäre entzogen haben. Vor 300 Millionen Jahren begann die Bildung der fossilen Energiespeicher, weil absterbende Pflanzen, Wälder und Meeresorganismen unter Luftabschluss und Wärme sich zu Kohle, Öl und Erdgas wandelten. Dabei wurde der beteiligte Kohlenstoff nachhaltig aus der Luft entfernt. Anschaulich gesprochen bildete der fossile Kohlenstoff zusammen mit dem Luftsauerstoff der Atmosphäre eine gewaltige „chemische Batterie“, die viel Energie freisetzt, wenn die beiden Komponenten (C und  $\text{O}_2$ ) miteinander reagieren können.

Könnte man mit zusätzlichen Maßnahmen noch mehr  $\text{CO}_2$  wieder aus der Luft abtrennen? Kann man die natürlichen Prozesse beschleunigen oder kann man in großem Stil technische Verfahren einsetzen?

Selbstverständlich denkt man sofort an das Anpflanzen von neuen Bäumen. Das ist wunderschön und immer richtig. Leider kann es den zusätzlichen „uralten“ Kohlenstoff aus den fossilen Lagern nicht für Jahrhunderte binden, weil sich die heutigen Bäume nicht mehr zu Kohle zurück verwandeln. Statt dessen werden sie irgendwann verbrannt oder sie verrotten. Nur zum allergeringsten Teil werden sie zu Baumaterial oder Papier verarbeitet, das möglicherweise längere Zeiten überdauern könnte. Dennoch bewirken neue Waldanpflanzungen, derzeit vor allem auf der Nordhalbkugel, dass vielleicht bis zu 1 Gt Kohlenstoff pro Jahr zumindest für viele Jahrzehnte gebunden wird. Hier gibt es allerdings erhebliche Unsicherheiten in der Bilanzierung.

Als eine großtechnische Alternative wird derzeit ein Verfahren erforscht, das mit CCS abgekürzt wird. CCS bedeutet Carbon Capture and Storage. Dabei soll das  $\text{CO}_2$  nach der Verbrennung aufgefangen und außerhalb der Atmosphäre endgelagert werden. Dazu gibt es unterschiedliche technische Prozessführungen (Ref. 2). Entweder verbrennt man Kohlenstoff in reinem Sauerstoff und bekommt direkt  $\text{CO}_2$  oder man muss ein Verfahren zur Abtrennung von  $\text{CO}_2$  aus dem Rauchgas (Abluft aus  $\text{N}_2$  und  $\text{CO}_2$ ) entwickeln. Beides ist technisch nicht ungewöhnlich schwierig, erfordert aber neue Kraftwerkstechnik und zusätzliche Energie für den Betrieb. Wenn das  $\text{CO}_2$  abgetrennt wird, fallen gewaltige Gas-mengen an. Jede Tonne Kohlenstoff ergibt 3,67 Tonnen  $\text{CO}_2$ -Gas, das sind 1900 m<sup>3</sup> Gas bei Atmosphärendruck. Das Gas muss anschließend verflüssigt und mit Pipelines zu entfernten Lagerstätten gepumpt werden. Dort soll es entweder in leere Erdgasfelder oder in tiefe Salzwasserschichten gepresst werden. Auch dafür wird sehr viel Energie

## UNERSETZLICHER KOHLENSTOFF

Einige Fakten zur Kohlenstoffchemie gehören zum Allgemeinwissen.

*C ist ein vierwertiges Element. Aus der gerichteten Natur der vier kovalenten Bindungen ergeben sich die vielfältigsten Strukturbildungsmöglichkeiten in der Biologie und in der Chemie. Alle Strukturen („Zellen“) der Pflanzen und Lebewesen werden durch Kohlenstoffverbindungen realisiert. Ein Kohlenstoffatom kann in Verbindungen nominell bis zu 4 Elektronen abgeben. Oder aber es werden kovalente Einfach- und Mehrfachbindungen mit bis zu vier Partnern aufgebaut. Daraus ergeben sich sehr unterschiedliche Konfigurationen. Unterschiedlich sind auch die jeweiligen Bindungsenergien.*

*Diese Konfigurationen sind für unser Thema relevant:*

### CO<sub>2</sub>

*C liegt nominell als 4+ vor, eine sehr stabile Verbindung, die „Asche“ jeder Verbrennung. Der Sauerstoff hat die 4 Außenelektronen des C überwiegend an sich gezogen: „Oxidation“. Nur 0,001 % des globalen Kohlenstoffs befindet sich als CO<sub>2</sub> in der Erdatmosphäre. (Dagegen liegt fast der gesamte Kohlenstoff der Venus als CO<sub>2</sub>-Gas in ihrer dichten und heißen Atmosphäre vor).*

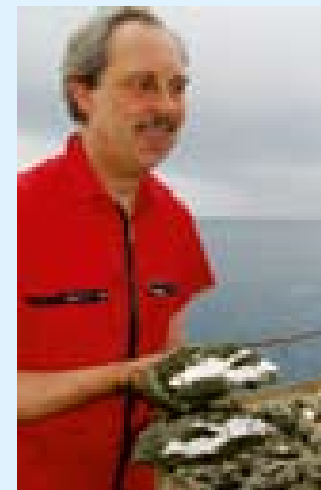
### CaCO<sub>3</sub>

*C liegt als 4+ vor, ebenfalls eine stabile Verbindung, Kalkstein. Fast der gesamte Kohlenstoff auf unserer Erde (99,93 %) liegt in Gesteinsform vor.*

### C

*C behält seine 4 Elektronen, Oxidationsstufe 0. Beispiele: Kohle, Graphit, Diamant*

*Diamant besitzt sehr stabile, gerichtete kovalente Bindungen und ist extrem hart.*



Prof. Dr. G. Bohrmann präsentiert Brocken von Gashydraten (www.rcom.marum.de)

### „-CH<sub>2</sub>O-“

*C ist hier überwiegend kovalent gebunden. Der Strukturbaustein „CH<sub>2</sub>O“ wird oft benutzt als sehr vereinfachte Merkformel für das Atomzahlverhältnis auch der langkettigen Kohlenstoffhydrate, wie etwa für Milchsäure (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>), Glukose (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), sowie Stärke oder Zellulose (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>. Viele Biomoleküle sind aus Glukose-Bausteinen zusammen gesetzt.*

### CH<sub>4</sub>

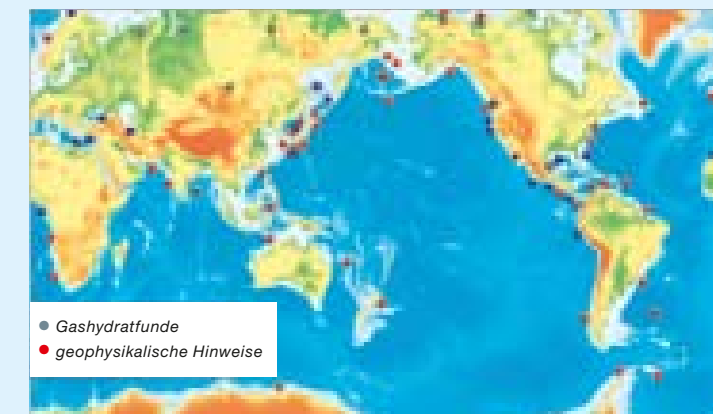
*Methan (Erdgas, Sumpfgas, Grubengas) ist die einfachste der zahlreichen „Kohlenwasserstoffverbindungen“ mit vier kovalenten Bindungen. Sehr hoher Heizwert bei der Verbrennung, weil die Endprodukte (CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O) sehr stabil sind. Wegen des höchsten Wasserstoffanteils unter allen Kohlenstoffverbindungen erzeugt CH<sub>4</sub> die geringste CO<sub>2</sub>-Belastung pro Heizwert unter den fossilen Energieträgern. Allerdings ist jedes freie CH<sub>4</sub>-Molekül in der Atmosphäre als Treibhausgas 30-mal wirksamer als ein CO<sub>2</sub>-Molekül, so dass alle Methanausgasungen, etwa aus Sümpfen oder den immer unter Wasser stehenden Reisfeldern als hochgefährlich für das Klima gelten. Freies Methan in der Atmosphäre wird erst im Laufe von etwa zehn Jahren unter Lichteinwirkung durch Oxidation zerlegt und damit unschädlich gemacht. Extrem kritisch wären auch mögliche massive CH<sub>4</sub>-Emissionen von erwärmten Methanhydratablagerungen aus Permafrost-Regionen der Tundra oder vom Meeresboden. Den erstaunlichen Eigenschaften von Methanhydrat („Brennendes Eis“)*

*ist ein spezielles Kapitel in Ref. 2 gewidmet. Es ist sicher, dass es weltweit überaus gewaltige Methanhydratlager gibt (S. 114). Heftige, sich selbst verstärkende unkontrollierte Methanfreisetzungen könnten für rasche Klimaerwärmungen in der Vergangenheit verantwortlich gewesen sein. Ein verantwortungsbewusster, sicherer Abbau von Methanhydrat als Energieträger ist derzeit technisch nicht möglich.*

*Die **Photosynthese** kann CO<sub>2</sub> in Glukose und Glukoseprodukte („-CH<sub>2</sub>O-“) umwandeln und damit Lichtenergie als chemische Energie für Nahrungsmittel oder Brennstoffe speichern.*

*Die **Verkohlung** von Zellulose unter Druck und Wärme entfernt H<sub>2</sub>O, so dass reiner Kohlenstoff entstehen kann. Reale, fossile Kohle enthält aber je nach Alter und Entstehung oft noch viel Wasser, dazu Methan („Grubengas“) und viele andere Verbindungen.*

*Bei der Bildung von Erdöl und Erdgas, ebenfalls unter Wärmeeinwirkung, entstehen kovalent gebundene **Kohlenwasserstoff-Ketten (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>)** mit hohem Wasserstoffanteil. Sie sind befreit vom Sauerstoff der organischen Ausgangsstoffe, und ihr spezifischer Heizwert (Energiegehalt) ist deshalb besonders hoch.*



Gashydrat-Vorkommen (G. Bohrmann)

benötigt. Im Wasser soll es sich dann lösen und dort für alle Zeiten verbleiben oder Mineralien (Ablagerungen) bilden. CCS kann aller Voraussicht nach nur bei großen Kohlekraftwerken sinnvoll sein, weil dort maximale CO<sub>2</sub>-Emissionen (1000 t CO<sub>2</sub> pro Stunde) anfallen. Dass beim Einsatz von CCS wegen des zusätzlichen Energiebedarfs für Abtrennung und Lagerung der Wirkungsgrad der Kraftwerke von derzeit optimalen ca. 45 % auf vielleicht 30% sinken wird, könnte man aus Umweltschutzgründen in Kauf nehmen, obwohl es energietechnisch äußerst schmerzlich ist. Schließlich kämpfen die Ingenieure beim Wirkungsgrad von Kraftwerken um jedes Zehntelprozent. Letztendlich am problematischsten bleibt jedoch die dauerhafte unterirdische Lagerung der gewaltigen CO<sub>2</sub>-Gasmengen. Wenn nämlich die unterirdischen Wasseradern das Gas später langsam wieder an die Atmosphäre abgeben sollten, was zur Zeit befürchtet wird, dann wäre dieser teure Prozess völlig kontraproduktiv. Zudem könnte man die Befürchtung hegen, dass sich große Mengen von austretendem CO<sub>2</sub> nicht schnell genug mit der Luft vermischen. CO<sub>2</sub> ist schwerer als Luft. In einer Senke könnte es sich bei Windstille ansammeln. Weil es in hoher Konzentration erstickend wirkt, kann es Lebewesen gefährlich werden (Diese Gefahr ist beim industriellen Umgang mit CO<sub>2</sub>, insbesondere bei CO<sub>2</sub>-Feuerlöschanlagen, tatsächlich zu beachten). CCS ist deshalb mit Sicherheit noch „Zukunftsmusik“ und muss als eine wichtige, aber noch ungelöste Aufgabe bewertet werden.

Auch die natürliche Verwitterung lagert ständig Kohlenstoff in Form von mineralischen Sedimenten im Boden ein, ist aber viel zu langsam, um die gegenwärtigen Emissionen auszugleichen.



# DIE ROLLE DER GEWALTIGEN OZEANE

Über 70 % der Erdoberfläche sind von den Meeren bedeckt. Da ist es kein Wunder, dass die Ozeane für das Klima eine entscheidende Rolle spielen. Die Bedeutung der warmen und kalten Meeresströmungen für den Wärmehaushalt wurde auf Seite 39 erwähnt. Dort wurde auch die wichtige Tiefenwasserbildung und ihre thermohaline Antriebskraft erläutert.

Wenn wir nun die überragend wichtige Kohlenstoffbilanz der Ozeane näher betrachten, müssen wir uns auf einige Überraschungen gefasst machen. Wir wissen ja, dass sich das Leben zuerst in den Meeren entwickelt hat. Wie umfangreich mag nunmehr die gesamte in den Ozeanen lebende Biomasse sein – alle Wasserpflanzen, Plankton, Krebse, Fische, Delphine und Wale zusammen?

Da müsste doch insgesamt deutlich mehr „lebendiger“ Kohlenstoff im Wasser zusammenkommen als die 600 Gt C in der Biomasse auf allen Kontinenten, denn schließlich ist das Leben an Land praktisch auf die Oberfläche beschränkt, während es in den Ozeanen viele Kilometer Wassertiefe zu besiedeln gibt.

Außerdem gibt es an Land die riesigen lebensfeindlichen Gebiete wie Wüstenflächen, Felsen und Gletscher und mit der Antarktis sogar einen kompletten Kontinent ganz ohne Pflanzen!

Leider führt uns diese Vermutung völlig in die Irre!

Im Vergleich zum Land sind die Meere nährstoffarm, zu dunkel, kalt und deshalb erschreckend unproduktiv und leer. Das Hauptproblem fast aller Meeresbewohner ist es, in der riesigen „Wasserwüste“ ausreichend Nahrung zu finden und dabei nicht selbst gefressen zu werden. Das Leben im Meer ist ziemlich gefährlich und durch Hunger gekennzeichnet. Obwohl viele Fischweibchen im Laufe ihres Lebens Millionen von Eiern legen, sind die Bestände nie explodiert, und heute nehmen sie wegen der Überfischung sogar ständig ab. Insgesamt befindet sich deshalb in den Ozeanen nur etwa 1 Gt „lebendiger“ Kohlenstoff, was 0,2 % der Landbiomasse entspricht.

Ganz anders allerdings sieht die Kohlenstoffbilanz aus, wenn man den „toten“ Kohlenstoff als im Wasser gelöstes Gas sowie in Form der Kalksedimente ( $\text{CaCO}_3$ ) betrachtet. Der größte Beitrag zu den  $\text{CaCO}_3$ -Sedimenten stammt aus der Silikatverwitterung. Zusätzlich sedimentiert auch festes  $\text{CaCO}_3$  mit den Kalkschalen abgestorbener Meeresbewohner zum Meeresgrund. Die heutigen Kreidefelsen sind dafür erstaunliche Zeugen. Auch „verstorbener“ Kohlenstoff aus der Biomasse sinkt ab zum Meeresboden – etwa in Form von Kot und toten Lebewesen. Allerdings müsste ein Taucher bei der Beobachtung dieser Vorgänge ein wenig Geduld mitbringen, denn die Sedimentationsgeschwindigkeit im tiefen Ozean beträgt wenige Millimeter in 1000 Jahren. Nur unter sehr speziellen Bedingungen konnte aus dem „verstorbenen“ Kohlenstoff Erdöl und Erdgas entstehen.

Der wichtigste Prozess für die Kohlenstoffbilanz der Meere liegt im Gasaustausch. Die Ozeane nehmen ständig riesige Mengen von Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf, denn  $\text{CO}_2$ -Gas ist gut in Wasser löslich. Je kälter das Wasser und je höher der Druck ist, desto höher wird die Löslichkeit. 5 °C kaltes Wasser kann doppelt so viel  $\text{CO}_2$  lösen wie Wasser bei 30 °C. Also nehmen die Ozeane dort, wo sich kaltes Tiefenwasser bildet,  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre mit in die Tiefe.

Das sind vor allem die kalten Regionen des Nordatlantik und der Antarktis.

**Weil nun das Tiefenwasser oft Jahrhunderte braucht, bis es sich mit wärmeren Wassermassen vermischt und wieder in Kontakt mit der Atmosphäre kommt, erweisen sich die Ozeane als eine riesige Vorratskammer für  $\text{CO}_2$ .**

Denken wir daran, dass die Ozeane im Mittel fast 4 km tief sind und dass nur eine Schicht von vielleicht 100 m Dicke im direkten Gasaustausch mit der Luft steht. Allerdings muss letztendlich in warmen Regionen auch wieder  $\text{CO}_2$  aus dem Wasser an die Atmosphäre abgegeben werden, so dass man für eine Gleichgewichtssituation eine jährliche Austauschmenge, ein ständiges Hin und Her zwischen Ozean und Atmosphäre, von etwa 90 Gt Kohlenstoff (in Form von 330 Gt  $\text{CO}_2$ ) pro Jahr abschätzt.

Die folgende Beobachtung ist für die Entwicklung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre von größter Bedeutung:

Dieser langfristige Gleichgewichtszustand zwischen Ozean und Luft wird durch den gegenwärtigen Anstieg der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Menge von 280 ppm (vorindustriell) auf derzeit >387 ppm (2010) deutlich gestört. Man schätzt, dass von den derzeitigen menschengemachten Emissionen, das sind derzeit etwa 10 Gt C pro Jahr, fast die Hälfte von den Ozeanen und der Biosphäre (Pflanzen) aufgenommen wird, wobei mindestens 2,5 Gt auf die Ozeane entfallen. Deshalb verbleiben derzeit „nur“ ca. 5 Gt C pro Jahr zusätzlich in der Atmosphäre. Diese 5 Gt C pro Jahr entsprechen einem weiteren Anstieg des  $\text{CO}_2$  in der Luft um 2 ppm/Jahr.

**Deshalb eröffnet sich aus dem ständigen Gasaustausch mit dem Ozean, gemeinsam mit den Pflanzen, wahrscheinlich die derzeit größte Chance für eine gewisse Stabilisierung des Weltklimas.**

Eine erstaunliche Behauptung!

Um diese überraschende Aussage zu verstehen, müssen wir uns die gegenwärtige Situation sorgfältig und etwas genauer vor Augen führen:

- Wie wir wissen, liegt der atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Level heute etwa 107 ppm über dem für viele Jahrtausende geltenden Wert von etwa 280 ppm.
- Deshalb ist das Austauschgleichgewicht zwischen Luft und Ozeanen (plus Biosphäre) derzeit nachhaltig gestört und die Aufnahme übersteigt die Abgabe netto jährlich um ca. 5 Gt C (in Form von 18 Gt  $\text{CO}_2$ ). Also: Aufnahme 95 Gt C, Abgabe an die Luft nur 90 Gt C).

### Wir machen nun ein superoptimistisches Gedankenexperiment.

Stellen wir uns vor, dass wir durch drastische Einsparungen, Effizienzverbesserungen und neue Techniken die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen halbieren könnten auf etwa 5 Gt C pro Jahr. Das ist zwar kurzfristig leider unmöglich und auch auf langer Zeitskala extrem schwer, aber nicht völlig absurd. Dann würden die Ozeane bei einem atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Pegel von angenommen 400 ppm vermutlich einige Jahrhunderte lang in jedem Jahr weiterhin mit derselben Rate CO<sub>2</sub> aufnehmen und in die Tiefsee abtransportieren können.

- Gleichzeitig aber bliebe die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft konstant auf einem erträglichen Level von etwa 400 ppm, denn die nunmehr halbierten Emissionen würden ja vollständig vom Meerwasser und der Biosphäre aufgenommen. Weil die CO<sub>2</sub>-Kapazität der Ozeane mit derzeit 36 000 Gt C so gewaltig ist und weil die überwiegenden Wassermassen sehr kalt sind und tief unterhalb der Atmosphäre lagern, würde nämlich der erhöhte CO<sub>2</sub>-Aufnahme für eine sehr lange Zeit noch keine erhöhte CO<sub>2</sub>-Abgabe vom Ozean an die Luft gegenüber stehen.
- Zweifellos ist diese Überlegung mit manchen Fragezeichen zu versehen. Besonders die drastische Absenkung der globalen Emissionen ist derzeit reines Wunschdenken, aber wir erkennen hier einen wesentlichen Aspekt: Tatsächlich könnte sich die CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch die Meere (plus einem nicht genau bekannten Anteil durch die Biosphäre) als der einzig machtvollste Prozess heraus stellen, der das weitere Ansteigen des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre einigermmaßen begrenzen könnte. Der

Kohlenstoffkreislauf der Biosphäre allein wird, etwa mit Hilfe von neu gepflanzten Bäumen, mit Sicherheit nie entscheidende zusätzliche Kohlenstoffmengen langfristig binden können. Auch die den Kohlenstoff bindenden geologischen Prozesse sind viel zu langsam im Vergleich zu den derzeitigen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

- **Es scheint, als befänden wir uns ohne den Beitrag der Ozeane tatsächlich in einer Situation, in der sich das fossile CO<sub>2</sub> immer weiter in der Atmosphäre ansammeln müsste. Vermutlich bieten die Ozeanen derzeit den leistungsfähigsten „Luftreinigungsprozess“, der tatsächlich Jahr für Jahr viele Milliarden Tonnen von überschüssigem CO<sub>2</sub> aus der Luft entfernen kann.**

### Am Schluss dieses Kapitels wollen wir uns noch einmal an eines der Rätsel der Eiszeiten erinnern: Wie passen die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft mit dem Temperaturgang im Detail zusammen?

In einer kalten Periode betrug der CO<sub>2</sub>-Level der Luft etwa 200 ppm, in den warmen Perioden etwa 280 ppm. Die Differenz von 80 ppm atmosphärischem CO<sub>2</sub> entspricht 175 Gt Kohlenstoff in der Luft (etwa 640 Gt CO<sub>2</sub>).

Diese Zahlen wollen wir in Relation setzen zu unseren heutigen Emissionen.

- Nur 175 Gt zusätzlicher Kohlenstoff in Form von CO<sub>2</sub> in der Luft entsprächen dem Unterschied zwischen einer Warmzeit und einer weitgehenden Vereisung. Bei der jetzigen Emissionsrate von 10 Gt C pro Jahr entspricht das nur 18 Jahresportionen – eine erschreckende und sehr verstörende Erkenntnis.

Wenn die Daten aus den Eisbohrkernen stimmen, wovon wir ausgehen können, und wenn die modernen Emissionsdaten stimmen, was mit Sicherheit der Fall ist, **dann haben wir gerade berechnet, dass innerhalb der Lebenszeit eines 18-jährigen Jugendlichen bereits so viel CO<sub>2</sub> anthropogen in die Luft emittiert wurde, wie es dem Wechsel von einer Eiszeit zu einer Warmzeit entsprochen hat.** Auch wenn die Ozeane plus Biosphäre davon die Hälfte wieder aufnehmen, so verlängert sich die Zeitspanne doch nur von 18 auf 36 Jahre – auch das ist extrem kurz.

Diese Beobachtung ist tatsächlich sehr schwer zu „verdauen“ und wird in ihren spürbaren Konsequenzen vermutlich am besten durch das Diagramm auf S. 142 veranschaulicht.

Nun wollen wir noch überlegen, woher das CO<sub>2</sub> damals, beim Wechsel von einer Vereisung zu einer Warmzeit, überhaupt kommen konnte.

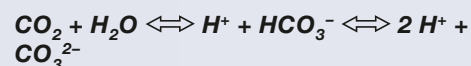
- 175 Gt Kohlenstoff entsprechen 29 % der derzeitigen Land-Biomasse. Das ist ein sehr hoher Anteil. Leider hilft diese Erkenntnis unserem Verständnis von den Eiszeiten nicht weiter, denn aus der Landbiomasse kann dieser Kohlenstoff nicht stammen. Im Gegenteil, in allen Warmzeiten wird es viel mehr Vegetation und Wälder als in den Kaltzeiten geben. Also wird in Warmzeiten mehr Kohlenstoff in den Pflanzen gebunden, und der CO<sub>2</sub>-Spiegel in der Luft müsste geringer sein. Die Messungen an den Eisbohrkernen zeigen aber einen höheren CO<sub>2</sub>-Spiegel in den Warmzeiten. Wir müssen also nach einer anderen leistungsfähigen Quelle für die 175 Gt Kohlenstoff suchen.

- 175 Gt Kohlenstoff entsprechen andererseits nur 0,4 % des gelösten Kohlenstoffs in den Ozeanen – das ist ein ziemlich winziger Anteil. Es scheint, als seien nur die Ozeane in der Lage, eine ausreichend leistungsfähige Quelle für zusätzliches CO<sub>2</sub> zu bieten, denn die beobachteten klimatischen Wechsel, insbesondere die Erwärmungen, verliefen immer relativ schnell. Ähnliche Argumente kann man auch für die Übergänge zur Vereisung anführen, denn dabei wird eine entsprechende CO<sub>2</sub>-Menge relativ zügig aus der Atmosphäre entfernt. Wie hat das im Detail funktioniert? Das ist noch unbekannt. Es gibt derzeit noch keine ausreichend fundierten Modelle für das zeitliche Verhalten des Gasaustausches zwischen Atmosphäre und Ozeanen, die diese an sich recht plausible Vermutung untermauern können. Kritiker dieser Hypothese erinnern daran, dass die relevanten Vorgänge in den Ozeanen vermutlich viel zu langsam ablaufen, weil die Ozeane mit ihren 1,35 Milliarden km<sup>3</sup> Wasserinhalt eine enorme Wärmekapazität und eine entsprechend große thermische Trägheit besitzen.

So bleibt noch sehr viel zu tun, um die entscheidende Rolle der Ozeane für den CO<sub>2</sub>-Austausch und die Entwicklung des Weltklimas im Detail zu entschlüsseln.

Wer seine Kenntnisse in physikalischer Chemie auffrischen will und keine Angst vor Pufferungskurven hat, kann in diesem Abschnitt lernen, dass der pH-Wert des Meerwassers in ähnlicher Weise abgepuffert ist wie im Blut und deshalb längst nicht so heftig auf eine CO<sub>2</sub>-Einleitung reagiert wie Süßwasser.

Zuerst betrachten wir aber Leitungswasser (pH = 7), das wir mit einer CO<sub>2</sub>-Patrone zu Sprudel verwandeln können, weil sich CO<sub>2</sub>-Gas sehr gut im Wasser löst. Mit den Wassermolekülen reagiert ein kleiner Teil der CO<sub>2</sub>-Moleküle zu einer schwachen Säure und ergibt einen pH von 4 bis 5:



Wir schreiben abgekürzt H<sup>+</sup> für die Bildung eines H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>-Ions. Die entstehenden H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>-Ionen sind für die saure Reaktion verantwortlich. Allerdings liegt im Sprudelwasser das Gleichgewicht sehr weit links, denn Sprudel ist nur schwach sauer. Immerhin hat sich der pH-Wert von 7 um bis zu 3 Einheiten verschoben. In unserem Trinksprudel gibt es viel gelöstes CO<sub>2</sub>-Gas (99%), relativ wenig Hydrogencarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) und fast keine Carbonat-Ionen (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>).

Weil die physikalische Chemie von CO<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>O so interessant ist, machen wir einen kleinen Ausflug in eine Tropfsteinhöhle. Dabei lernen wir ein überraschendes Paradox kennen:

Bei Einleiten von CO<sub>2</sub> in Süßwasser entsteht potentiell sofort neue Säure. Wenn aber dieser Prozess im Kalkgestein abläuft, wandeln sich wegen der Pufferung Carbonationen (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) zu Hydrogencarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) um. Kalkstein (CaCO<sub>3</sub>) wird im Kontakt mit Wasser auf diese Weise in lösliches Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> umgewandelt und allmählich aufgelöst. So haben sich die typischen Höhlen im Kalkgestein gebildet. Dabei

löst sich das CaCO<sub>3</sub> um so schneller auf, je mehr CO<sub>2</sub> vom Wasser aufgenommen wird: die Kohlensäure greift offensichtlich ihr eigenes Salz wieder an. Eine ungewöhnliche und bemerkenswerte Reaktion. Auf die ökologische Bedeutung dieser Rückreaktion vom Carbonat zum Hydrogencarbonat kommen wir noch zurück.

CaCO<sub>3</sub> wird erneut gebildet, wenn das CO<sub>2</sub> wieder ausgeschieden wird. Das geschieht sehr deutlich im Wasserkocher oder bei der Bildung von Tropfsteinen.

Bewegen wir uns nun vom Süßwasser ins Meer. Die Ozeane enthalten im Mittel 3,5 Gewichts-% Salze, vor allem als Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Sie bewirken, dass das Meerwasser immer schwach basisch ist. Dazu kommen verschiedene Ionen der „Kohlensäure“, so dass insgesamt eine basische Pufferlösung mit einem pH von 7,9 bis 8,5 entsteht.

Bei der Aufnahme von zusätzlichem CO<sub>2</sub> laufen im Meerwasser ähnliche Reaktionen wie beim Sprudel ab, aber die zu erwartende Säurebildung wird entscheidend gepuffert durch die vorhandenen Carbonat-Ionen und die Alkalinität der gelösten Salze (Jetzt wäre es an der Zeit, ein Chemiebuch aufzuschlagen und die Pufferungskurven der Kohlensäure zu betrachten). Man kann an den Pufferungskurven der Kohlensäure erkennen, dass das sehr basische CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (Carbonat) bei steigender H<sup>+</sup>-Konzentration Hydrogencarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) bildet. Das Einleiten von frischem CO<sub>2</sub> erzeugt zwar primär neue H<sup>+</sup>-Ionen. Aber zusammen mit der Pufferungsreaktion ergibt sich die folgende, auf den ersten Blick sehr ungewöhnliche Bilanzgleichung:



Danach scheinen beim Einleiten von frischem CO<sub>2</sub> in Meerwasser gar keine zusätzlichen

H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>-Ionen zu entstehen. Das wäre zwar allzu schön, denn dann würde das Meerwasser auch nicht saurer. Wenn man aber die Pufferungskurven genauer betrachtet, erkennt man, dass die Rückreaktion des Carbonats CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> zum Hydrogencarbonat HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> den pH-Wert optimal leider nur in einem Bereich von pH 9,5–11,5 stabilisieren kann, so dass die Pufferwirkung bei einem pH von 8 deutlich schwächer ausfällt.

Die gezeigten Ionenreaktionen von CO<sub>2</sub> mit Wasser sind für die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser entscheidend. In Form von CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> und CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> sind im Meerwasser normalerweise etwa 2,23 · 10<sup>-3</sup> mol C/kg gelöst.

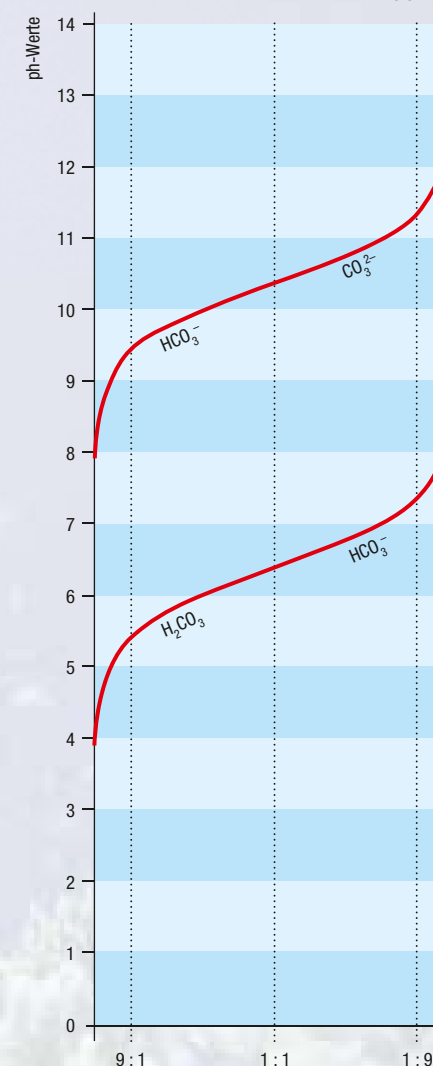
Damit erhalten wir eine wichtige Kennzahl für die globale Kohlenstoffbilanz:

Weil die Meere ca. 1,35 · 10<sup>21</sup> kg H<sub>2</sub>O enthalten, kommen wir insgesamt auf 36 000 Gt an gelöstem, anorganischem „toten“ Kohlenstoff (ohne die gewaltigen Sedimente).

Wenn sich nun weiterhin langfristig viel zusätzliches atmosphärisches CO<sub>2</sub> in den Ozeanen löst, so ist wegen der suboptimalen Pufferung leider eine Verschiebung des pH um -0,1 oder sogar mehr zu befürchten. Das Meer würde dadurch etwas weniger basisch. Dieser Vorgang wird oft bereits „Versauerung“ genannt. Man befürchtet, dass sich dadurch die Bedingungen für die Entwicklung und Stabilität der Kalkskelette der ozeanischen Lebewesen verschlechtern. Im schlimmsten Fall könnte das allmähliche Einsetzen der oben erläuterten Rückreaktion sogar dazu führen, dass die empfindlichsten der biologischen Carbonatgerüste (Kalkstrukturen) Hydrogencarbonat bilden und sich dabei auflösen. Dazu zählen kalkbildende Algen und vielleicht manche der wundervollen großen Korallenbänke. Nicht nur der Klimaschutz, auch der Schutz der Meereslebewesen verlangt deshalb nach einer Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

## PUFFERUNGSKURVE DER KOHLENSAURE

Abb. 58





# DIE BILANZ DES KOHLENSTOFFS IN DER GEGENWART

Die „verfügbare Energie“ spielt eine Schlüsselrolle für Technik und Wohlstand, aber auch für alle biologischen Lebensfunktionen. „Energie“ könnte man als eine universelle Währungseinheit der Natur bezeichnen, denn die verschiedenen Formen der Energie sind weitgehend in einander umwandelbar, wobei allerdings immer „Umtausch- und Wechselkursverluste“ auftreten. Unsere fossilen Energievorräte sind angesparte Sonnenenergie (Strahlungsenergie aus Kernenergie) in „Kohlenstoff-Währung“ (chemische Energie aus biologischen Prozessen). Für das „Kohlenstoff-Sparbuch“ der Erde ergibt sich derzeit eine zwiespältige Bilanz. Obwohl die Zeiten des billigen Öls nicht mehr lange andauern werden, so geht doch das Zeitalter des Kohlenstoffs deshalb nicht schnell zu Ende. Das Sparkonto ist noch nicht leer, denn das Öl kann durch das reichlich vorhandene

Gas leicht ersetzt werden. Glücklicherweise ist Erdgas wegen des höheren Anteils an Wasserstoff sogar der klimafreundlichste fossile Energieträger. Mit weitem Abstand am größten sind jedoch die Vorräte an Stein- und Braunkohle.

Einerseits könnte das die energiehungrige Menschheit begrüßen. Andererseits liegt darin bekanntlich die Gefahr für die Atmosphäre. Vor Jahrmillionen, als ein üppiger Pflanzenwuchs sehr viel CO<sub>2</sub> aus der Luft entnahm (später bildete sich daraus die Kohle), herrschte ein feucht-heißes Treibhausklima mit sehr hohem Kohlenstoffgehalt in der Atmosphäre (bis über 2000 ppm). Die Erde war damals ganz ohne Gletscher. Wenn wir diesen Kohlenstoff jetzt massenhaft verbrennen, bewegen wir uns wieder zurück in diese Richtung. Es gibt deshalb keinen Zweifel

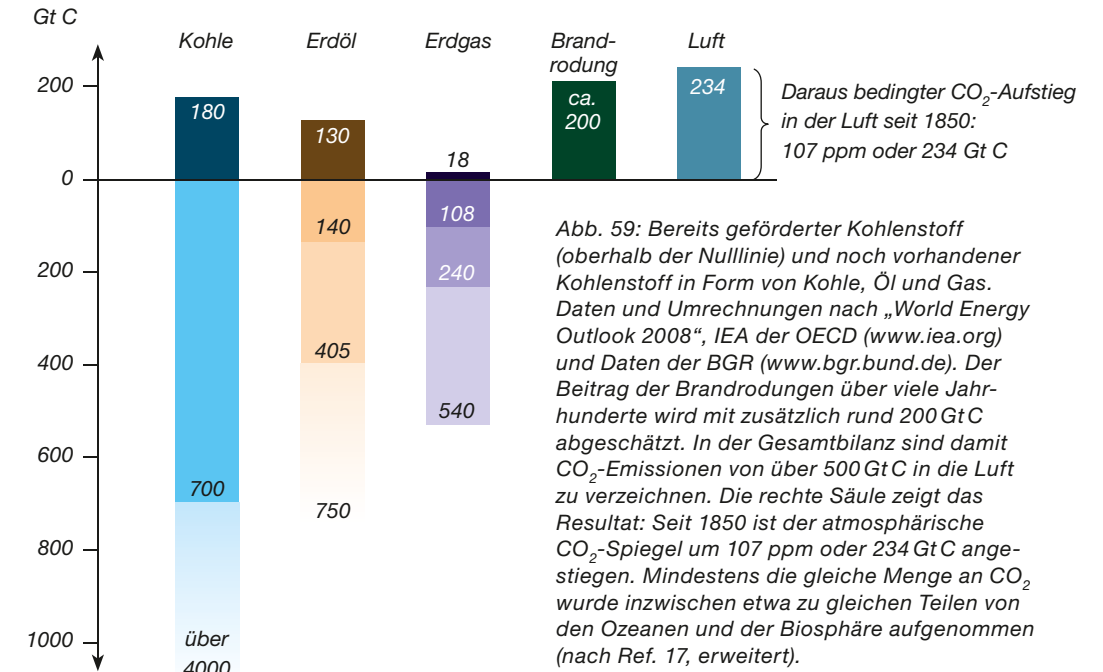
**TAB. 5: DER GLOBALE KOHLENSTOFFUMSATZ IN DEN ENERGIETRÄGERN**

Energieträger	Jahresförderung	sichere Reserven	schwierige Reserven	sichere Reichweite
Kohle	~ 3,5 Gt C	über 700 Gt C	über 4000 Gt C	Jahrhunderte
Öl	~ 3,4 Gt C	140 Gt C	405 – 750 Gt C	über 40 Jahre
Gas	~ 1,8 Gt C	108 Gt C	240 – 540 Gt C	über 60 Jahre

Die Summe der Jahresförderungen ergibt eine Emission von ca. 8,7 Gt C pro Jahr. Zusammen mit den Brandrodungen (1,3 – 2) Gt C erhält man eine **Gesamtemission von ca. 10 Gt C/Jahr**.

Diese Abschätzungen und Umrechnungen wurden benutzt:

**1 Barrel Rohöl:** 159 Liter ~ 116 kg Kohlenstoff, **1 m<sup>3</sup> Erdgas:** 0,84 kg ~ 0,6 kg Kohlenstoff, **1 kg Kohle:** ~ 0,6 kg Kohlenstoff, **1 kg CO<sub>2</sub>** ≈ 0,273 kg Kohlenstoff, **1 Gt** = 1 Milliarde Tonnen = 10<sup>9</sup> t = 10<sup>12</sup> kg



mehr daran, dass die Menschheit es leicht schaffen könnte, die Atmosphäre mit über 1000 ppm CO<sub>2</sub> anzureichern – was sicherlich eine Schreckensvision darstellt!

Machen wir also einen „Kassensturz“ und betrachten in Tab. 5 nüchtern die fossile Bilanz für 2010. Um das Kohlenstoffinventar vergleichen zu können, haben wir die Statistiken der Energie- und Rohstoffagenturen herangezogen. Die neuesten Daten sind aus dem Jahr 2007/2008, die CO<sub>2</sub>-Messungen vom Juni 2009 ([www.mlo.noaa.gov](http://www.mlo.noaa.gov)). Tonnen Kohle, Barrel Öl und Kubikmeter Gas rechnen wir direkt in Gigatonnen Kohlenstoff (Gt C) um.

Wir erhalten eine Gesamtemission von ca. 10 Gt C/Jahr. Weil 1 ppm CO<sub>2</sub> in der Luft 2,2 Gt C entspricht, müsste das atmosphärische CO<sub>2</sub> in jedem Jahr um 4,5 ppm ansteigen. Nur die große CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch die kalten Ozeane und ein nicht genau bekannter Anteil durch die Aufnahme in die Biosphäre begrenzen den gemessenen Anstieg derzeit auf rund 2 ppm/Jahr. Das Gesamt-CO<sub>2</sub> in

der Atmosphäre macht derzeit 387 ppm oder 846 Gt C in Form von 3100 Gt CO<sub>2</sub> aus.

Abb. 59 zeigt, dass die fossilen Reserven noch immer ein Vielfaches der atmosphärischen Kohlenstoffmenge betragen. Vom Standpunkt des Klimaschutzes muss man deshalb feststellen: Es gibt auf der Erde noch viel zu viel fossilen Kohlenstoff, den man in Zukunft verbrennen könnte. Darin liegt eine große Gefahr. Wir dürfen keinesfalls hoffen, dass sich das Klima in einer uns angenehmen Weise selbsttätig stabilisiert, weil die „fossilen Vorräte“ demnächst zu Ende gehen. Zusätzlich könnten die Ozeane ihr Verhalten bei einer weiteren Erwärmung sogar umkehren und wieder CO<sub>2</sub> abgeben. Dann hätten wir die Beiträge aus den Meeren zusätzlich zu befürchten, und das würde uns zurückversetzen in das Treibhausklima der Dinosaurierzeit.



# REALITÄTEN DES ENERGIEBEDARFS UND DER ENERGIEVERSORGUNG

Ganz ohne Frage möchten alle vernünftigen Menschen eine für uns lebenswerte Erde bewahren – mit einem angenehmen Klima und erfolgreicher Landwirtschaft, möglichst ohne zusätzliche Unwetter und Überflutungen als Folge der menschlichen Aktivitäten und der anthropogenen Emissionen.

Ist das zu schaffen?

Im Rückblick erkennt man, dass die Menschheit tatsächlich bereits bewiesen hat, dass sie auf bestimmten Gebieten unglaublich erfolgreich sein kann. Das könnte uns Mut machen:

- Die Medizin hat eine Vielzahl von Seuchen und Leiden erfolgreich bekämpft oder sogar völlig ausgerottet
- Die Technik hat das Leben (Alltag, Arbeit, Landwirtschaft) für viele Menschen enorm erleichtert
- Die Menschen konnten sich in nie gekannter Weise vermehren:  
1850: 1,2 Milliarden Menschen  
1950: 2,5 Milliarden  
2010: 6,9 Milliarden
- Landwirtschaft, Technik, Pflanzenschutz (Chemie) und Züchtung (auch die Gentechnik zählt dazu) haben die fast unvorstellbare Leistung vollbracht, diesen unglaublichen Bevölkerungszuwachs ohne entsprechende Vermehrung der Anbauflächen zu ernähren. Die Zahl der heute hungrigen Menschen beruht nicht auf einem

globalen Mangel an Lebensmitteln, sondern ist vor allem die Folge von Kriegen, Konflikten, Ausbeutung und Gewalttaten.

- Der Lebensstandard in Europa und Nordamerika, Japan, Australien und einigen weiteren hochentwickelten Ländern sowie in vielen Ölförderländern hat sich in nie zuvor gesehenem Maße verbessert.
- Allerdings gibt es derzeit über 5 Milliarden weitere Menschen, die sich einen derartigen Wohlstand erst noch erarbeiten wollen – überwiegend mit sehr viel Fleiß und Entbehrungen.

Die Konsequenzen für die globale Energieversorgung sind nahezu überwältigend, denn auch wenn die Industriestaaten zunehmend schonender mit fossilen Energieträgern umgehen, so verlangt das kräftige Wachstum in den sich entwickelnden Ländern (z. T. über 10 % pro Jahr) wegen ihrer viel größeren Bevölkerungszahl insgesamt eine Steigerung der Weltenergieversorgung um circa 1,7 % pro Jahr. Hinter dieser vielleicht gering erscheinenden Steigerung versteckt sich eine riesige technische Anstrengung und tatsächlich eine komplette Bedarfsverdoppelung in den 40 Jahren bis 2050.

In den hochentwickelten Ländern wird der Wohlstand derzeit durch einen Pro-Kopf-Bedarf an Primärenergieträgern von etwa 5 bis 10 kW Gesamtleistung ermöglicht. Darin

## PRIMÄRENERGIEBEDARF UND WOHLSTAND

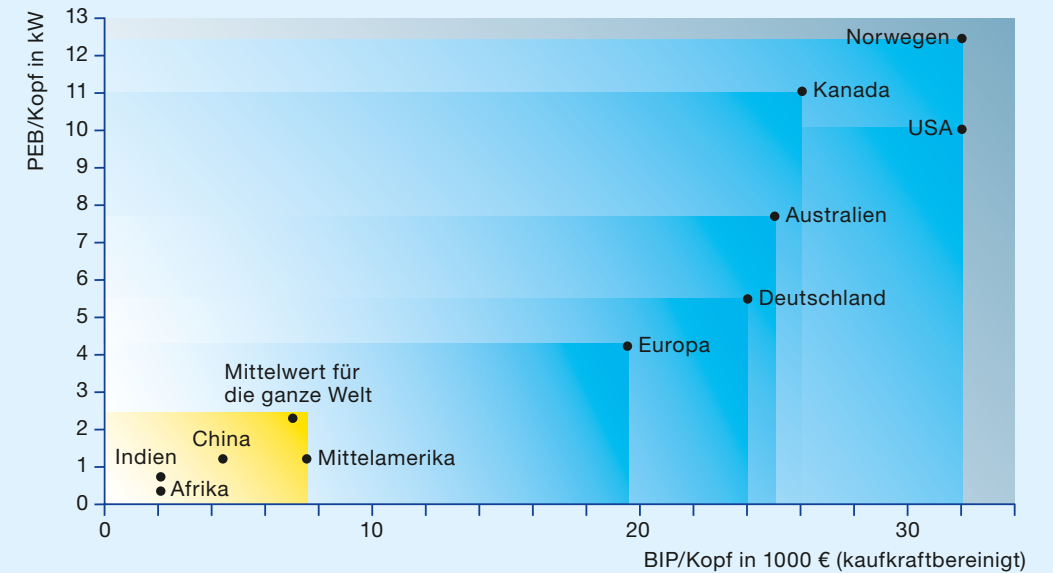


Abb. 60: Die vertikale Achse zeigt den Primärenergiebedarf pro Kopf in einigen Ländern. Horizontal ist die Produktivität („Brutto-Inlands-Produkt, BIP“) aufgetragen. Das BIP pro Kopf ist ein übliches Maß für den Wohlstand eines Landes. Über 5 Milliarden Menschen leben „in dem gelben Rechteck“ und möchten ihre Lebensbedingungen verbessern.

sind der gesamte private und industrielle Wärmebedarf, alle Treibstoffe und die elektrische Energie enthalten. China und Indien sowie viele arme Länder müssen sich zum Teil noch mit weniger als ca. 1 kW pro Kopf begnügen. Ihre Industrien befinden sich allerdings in einer höchst dynamischen Phase mit hohen Zuwachsraten. Genau wie die Industriestaaten benötigen sie dabei eine ausreichende Versorgung mit Treibstoffen, Elektrizität, Wärme und Rohstoffen. Dazu stehen ihnen keine anderen Techniken zur Verfügung als die, welche wir heute besitzen. Ob wir von Deutschland oder vom Rest der Welt sprechen – mit wenigen Ausnahmen wird etwa 80 % der Energieversorgung derzeit durch fossile Energieträger gedeckt, und das wird mit großer Wahrscheinlichkeit in den nächsten Jahrzehnten nicht drastisch geändert werden können. Als bedrohliche Konsequenz ergeben sich entsprechend hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Eine fast unabwiesbare Bedarfsverdoppelung bis 2050 könnte eine Verdopplung der jährlichen Emissionen bedeuten. Die Bereitstellung der zusätzlich benötigten Energie für die sich entwickelnden Nationen ohne eine Erhöhung der Emissionen stellt die derzeit entscheidende Herausforderung für die Ingenieure, Wissenschaftler und Techniker in aller Welt dar. Sie sind dabei auf die Unterstützung der Bevölkerung und der Politik angewiesen.

Schauen wir in einem knappen Überblick auf die gegenwärtige Situation.

**Kohle** ist relativ preiswert und weltweit besonders reichlich verfügbar. Deshalb werden global im Wochenrhythmus neue große Kohlekraftwerke in Betrieb genommen, und der Welt-Kohlebedarf wächst ständig. Die Zunahme des globalen Kohleverbrauchs wird überwiegend für die Stromerzeugung benötigt und ist zu

85 % durch den chinesischen und indischen Mehrbedarf für neue Kraftwerke bedingt. Allein im Jahr 2006 sind in China 174 Kraftwerksneubauten je 0,5 GW ans Netz gegangen.

**Erdöl** wird für den Treibstoffbedarf des Verkehrssektors noch lange entscheidend wichtig bleiben. Allerdings kann man Benzin und Diesel für Fahrzeugmotoren sehr leicht durch Erdgas ersetzen. Dagegen können Biokraftstoffe wegen des Wettbewerbs zum Ernährungssektor nur in sehr begrenztem Umfang produziert werden. Besonders wichtig werden deshalb moderne Biokraftstoffe der 2. Generation, die ausschließlich biologische Reststoffe nutzen.

**Erdgas** ist ein besonders umweltfreundlicher Energieträger mit der geringsten CO<sub>2</sub>-Emission pro Wärmeinheit (0,2 kg CO<sub>2</sub> für 1 kWh Wärme). Die Erdgasförderung wird in den nächsten Jahrzehnten immer wichtiger werden, weil Erdgas für Heizung, Verkehr und Kraftwerke eingesetzt werden kann.

**Strom** (genauer: elektrische Energie) ist die mit Abstand wertvollste Energieform. Strom hat sich längst als ein universeller Alleskönner überall unentbehrlich gemacht. Deswegen steigt der Strombedarf selbst in den hoch entwickelten Ländern wie Deutschland noch weiter an, obwohl dort der Primärenergiebedarf bereits abgesenkt werden konnte. Strom wird in vielen Industrieländern sogar ein zunehmend knappes Gut. Für die Entwicklung der Schwellenländer spielt die ausreichende und gesicherte Stromerzeugung eine Schlüsselrolle. Allerdings ist die Erzeugung von bedarfsangepasster und ausreichender Leistung an „sauberem Strom“ nicht einfach. Die Kohleverbrennung in 50 000 Kraftwerken weltweit liefert derzeit den Löwenanteil, ist aber relativ schmutzig. Staub- und SO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlagen sind nicht überall Standard, und vor allem kann die massenhaft anfallende „CO<sub>2</sub>-Asche“ (ca. 1 kg CO<sub>2</sub> pro kWh Strom) überhaupt noch nicht im großtechnischen Maßstab abgetrennt und „endgelagert“ werden. Wasser, Wind und Kernenergie sind zwar

emissionsfrei, aber die Wasserkraftwerke sind nicht mehr wesentlich vermehrbar. Auf den zahlreichen Windkraftparks ruht eine hohe Erwartung, weil sie bezahlbar sind. Allerdings liefern sie ihre Leistung unregelmäßig und nicht bedarfsgerecht, so dass sie spezielle Anforderungen an die Netze und an umfangreiche, schnell regelbare Ersatzkapazitäten (Gaskraftwerke) stellen. Die Photovoltaik ist wegen der extrem hohen Kosten derzeit noch ein Entwicklungs- und Nischenprojekt der Industrieländer.

Verantwortungsbewusste Fachleute sehen mit großer Sorge, dass die Zahl der Kernkraftwerke (436) weltweit noch immer sehr gering ist, obwohl inzwischen Hunderte von Neubauten in Planung sind. Nur Frankreich und die Schweiz stellen ihren Strom bereits fast CO<sub>2</sub>-frei mit Kernenergie und Wasserkraft her. Der deutsche Energiemix ist in Abb. 61 gezeigt.

## PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH IN DEUTSCHLAND 2008 NACH ENERGIETRÄGERN

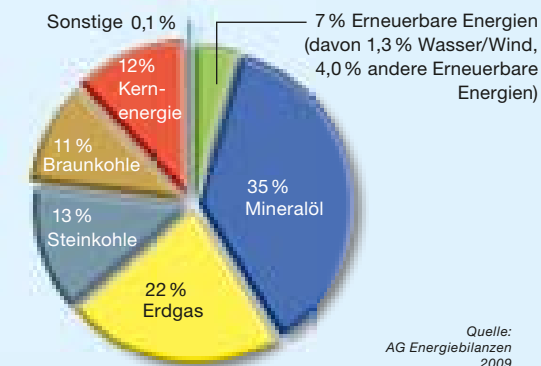


Abb. 61

Werfen wir noch einen kurzen Blick auf den Einsatz von Strom im Verkehrssektor: Aus Umweltschutzgründen wird in vielen Industriestaaten die Entwicklung von Elektroautos gefordert und vorangetrieben. Deren Batterien müssten dann aus dem Netz aufgeladen werden, und ein erheblicher Strombedarf müsste zusätzlich gedeckt werden. Derzeit verbraucht eine deutsche Durchschnittsfamilie etwa dreimal mehr Energie für ihr Auto (in Form von Kraftstoffen)

## MONTREAL 1987 – EIN MEILENSTEIN FÜR DEN SCHUTZ DER ATMOSPHÄRE

Die wissenschaftliche Erforschung der Atmosphäre konnte zeigen, dass die auf der Erde ganz ungefährlichen Halogenverbindungen (FCKWs) in der Stratosphäre unter UV-Be-strahlung Chloratome abspalten. Anschließend bewirken die freien Chloratome eine katalytische Zerlegung von Ozon-Molekülen (O<sub>3</sub>), wobei jedes Cl-Atom immer wieder neue O<sub>3</sub>-Moleküle angreift. Diese Reaktionen zerstören die Ozonschicht. Deshalb wurde im Jahr 1987 in Montreal ein internationales, völkerrechtliches Abkommen geschlossen,

das die Herstellung der FCKW-Verbindungen kontrolliert und ihren Einsatz unter Strafe stellt. Staaten, die sich nicht an dieses Abkommen hielten, hatten Sanktionen (Strafen) zu erwarten. Das Abkommen von Montreal war äußerst erfolgreich, und die Ozonschicht erholt sich seitdem. Politik, Naturwissenschaft und Technik konnten gemeinsam einen gangbaren Weg finden und gesetzlich verankern. Aber als letztendlich entscheidend für das Gelingen der Schutzmaßnahmen für die Ozonschicht erwiesen sich die erfolgreichen

Anstrengungen der Ingenieure und Techniker zur Herstellung und zum Einsatz alternativer Betriebsstoffe (chlorfreie Kältemittel) für Klimaanlageanlagen und Kühlschränke.

Eine analoge Vorgehensweise zur strikten internationalen Ächtung der Verbrennung von fossilem Kohlenstoff ist zur Zeit unmöglich, denn die Dimensionen der globalen Energieversorgung sind unvergleichlich gewaltiger als die der Klimaanlage-technik, und es gibt bei weitem noch nicht genug leistungsfähige Al-

ternativen als Ersatz für die fossilen Energieträger. Selbst das moderate Ziel, den Bedarf an fossilen Brennstoffen zu halbieren, scheint noch in weiter Ferne zu liegen. Deshalb ist derzeit ein sparsamer, ja sogar möglichst geiziger Einsatz von fossilem Kohlenstoff die beste Möglichkeit, um die Emissionen zu begrenzen. Hier gilt uneingeschränkt:

**GEIZ IST GEIL !**

als für ihre heimischen Elektrogeräte. Ein an der Steckdose „betanktes“ Elektroauto wäre aber noch nicht einmal ein Vorbild für den Umweltschutz, denn 58,2 % unseres Stroms (2008) kommt aus Kohle-Kraftwerken, wobei der Wirkungsgrad der Stromerzeugung unter 40 % liegt. Ein sparsamer Dieselmotor bietet derzeit in Deutschland eine deutlich bessere Energienutzungs- und Emissionsbilanz als ein Elektroauto. Auch die Deutsche Bahn benutzt Strom, der überwiegend unter hoher CO<sub>2</sub>-Emission erzeugt wird. Das wird allzu gern vergessen, wenn vom „Verkehr mit sauberem Strom“ gesprochen wird. In Frankreich, wo

der Strom überwiegend in Kernkraftwerken erzeugt wird, ergibt sich bereits eine wesentlich günstigere Umweltbilanz beim Einsatz von elektrischer Energie.

Leider ist auch die Speicherung von Strom in Batterien noch nicht befriedigend möglich. Noch immer sind Batterien schwer oder sehr teuer und besitzen nur eine begrenzte Lebensdauer. Das ist für Fahrzeuge ein großer Nachteil und ein wesentlicher Kostenfaktor. Ein einziger Liter Dieselmotorkraftstoff enthält mehr Energie als ein Bleiakku von 100 kg Gewicht (Mit einem Liter Diesel kann man leicht über

20 km weit fahren, mit der schweren Starterbatterie ist bereits nach wenigen Minuten Schluss). Auch der Übergang zu moderneren, teureren Akkus und der hohe Wirkungsgrad eines Elektromotors konnten dieses naturgesetzliche Handicap noch nicht überwinden. Wegen ihrer Energiedichte und Speicherkapazität bleiben die Kohlenwasserstoffe besonders geeignete Energieträger für den Verkehr. Im Flugverkehr sind sie voraussichtlich sogar unersetzlich. Auch deshalb ist die CO<sub>2</sub>-neutrale Produktion von synthetischem Kraftstoff eine interessante Vision für die fernere Zukunft (vgl. Ref. 2, S. 102).

## VON RIO ÜBER KYOTO NACH KOPENHAGEN

**1992:** Bei der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro wird das Rahmenübereinkommen der UN über Klimaänderungen (engl. Framework Convention on Climate Change, FCCC) beschlossen. Es sieht eine Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau vor, das „eine gefährliche Störung des Klimasystems verhindert“, enthält aber keinerlei quantitative und zeitliche Zielsetzungen. Jedoch ist es seit 1994 völkerrechtlich verbindlich.

**1995:** In Berlin beginnt die jährliche Reihe der Vertragstaatenkonferenzen (engl. Conference of Parties, COP), die zu Konkretisierungen des FCCC führen sollen.

**1997:** Bei der 3. Vertragstaatenkonferenz in Kyoto (COP3) einigen sich die wichtigsten Industriestaaten auf das Ziel, für eine Gruppe von Treibhausgasen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und

einige Fluor-haltige Gase) die weltweiten Emissionen bis spätestens 2012 um 5,2 % zu reduzieren (Referenzjahr: 1990). Nach einem differenzierten Länderschlüssel sollen dabei die EU 8 % (Deutschland 21 %, durch die Stilllegung veralteter Anlagen in den neuen Bundesländern weitgehend erreicht), Japan 6 % und die USA 7 % beitragen. Da die USA bald danach aus diesem „Kyoto-Protokoll“ ausgetreten sind und sich die Schwellenländer China und Indien sowie die Entwicklungsländer bisher nicht daran beteiligen, sind derzeit lediglich ca. 30 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch das Abkommen erfasst. Viele der „Kyoto-Staaten“ haben allerdings Schwierigkeiten, ihre Verpflichtungen zu erfüllen (vgl. Ref. 17).

Das Abkommen ist seit 2005 in Kraft. Derzeit sind ihm 188 Staaten beigetreten (Wikipedia: Kyoto-Protokoll).

**2003:** Der „Wissenschaftliche Beirat Globale Umweltveränderungen“ (WBGU) der deutschen Bundesregierung empfiehlt, das Kyoto-Protokoll zu verschärfen: Reduktion der Emission der „Kyoto-Gase“ um 20 % bis 2020. Bis 2050 hält er eine globale Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission um 45–60 % für angebracht. Diese Vorschläge werden teilweise von der EU aufgegriffen.

**2007:** Das IPCC (WG3, „Mitigation“) nennt für 2050 ein Reduktionsziel von 50–85 %.

**2009:** Von der nun schon 15. Vertragsstaatenkonferenz (COP15) in Kopenhagen wird eine wesentlich entschiedener und konsequenter Umweltpolitik im Sinn von IPCC und WBGU erhofft. Erfreulich ist, dass sich nun auch die USA wieder aktiv beteiligen wollen.

**ausreichend verfügbar**  
(bedarfsgerecht  
abrufbar)

**sicher**  
(ungefährlich bei  
Gewinnung und Einsatz)



**preiswert**  
(bezahlbar)

**umweltschonend**  
(bei Gewinnung  
und Einsatz)

Abb. 62: Es gibt derzeit keine Energietechnik, die alle vier Forderungen gleichzeitig befriedigen kann. Nur ein „Selbstversorger“ mit Brennholzwäldchen und eigenem Acker könnte sich noch in diesem magischen Quadrat konfliktfrei orientieren. Allerdings lebt der überwiegende Teil der Erdbevölkerung inzwischen in großen Ballungsräumen und Megastädten, so dass ein naturnaher Lebensstil kein praktikabler Lösungsvorschlag für die gegenwärtige Situation sein kann.

Insgesamt scheinen die politischen Weichen für eine globale Emissionsreduktion gestellt zu sein. Der politische Wille ist aber nicht leicht mit den technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten zur Deckung zu bringen. Derzeit sind die Ausgangssituationen und die Handlungsspielräume für die Nationen so extrem unterschiedlich, dass noch nicht zu erkennen ist, welches Emissionsszenario tatsächlich die Zukunft beschreiben könnte.

Aktuelle Informationen zu dem FCCC- oder Kyoto-Prozess sind über das Internet zugänglich: [www.unfccc.int](http://www.unfccc.int); [www.bmu.de](http://www.bmu.de); [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de).



# ZUKÜNFTIGE ENERGIEVERSORGUNG UND EMISSIONSSZENARIEN

Obwohl die Wünsche und größten Hoffnungen in der Energieforschung und -technik vor allem in Richtung Sonnenenergie gehen, wozu ja auch Wind und Wasser gehören, ist noch nirgendwo eine einzige, umfassende große Lösung zu erkennen, die den Einsatz der fossilen Energieträger oder der Kernenergie in den nächsten Jahrzehnten überflüssig machen könnte. Derzeit fehlt ein bahnbrechender technologischer Durchbruch, wie es zum Beispiel preiswerte Photovoltaik-Solarzellen zur Stromerzeugung in Verbindung mit preiswerten, kompakten und langlebigen Akkus für viele kWh wären. Deshalb müssen alle Forscher, Ingenieure, Techniker und Planer ermutigt werden, mit vielen, ganz unterschiedlichen Schritten den langen Weg zur

Minderung der Treibhausgas-Emissionen zu gehen. Die Überlegungen und Planungen zu den Energiesystemen der Zukunft sind so vielfältig, dass ihre Darstellung den Rahmen dieses Buches bei weitem überschreitet. Wir verweisen deshalb auf das Werkbuch zum Thema Energie (Ref. 2) mit zahlreichen

Literaturhinweisen, die auch im Internet zu finden sind ([www.energie-in-der-schule.de](http://www.energie-in-der-schule.de)).

Der beste Ansatz zur Lösung der Klima- und Energieprobleme wird im Zusammenwirken

von vielen unterschiedlichen Maßnahmen gesehen. Aber nicht alle Vorschläge sind in gleichem Maße effektiv, bezahlbar oder realistisch.

Steve Pacala und Robert Socolow, Wissenschaftler aus Princeton, USA, haben versucht, die vielfältigen Facetten des Problems und mögliche Lösungswege quantitativ mit Hilfe unterschiedlicher und überwiegend verfügbarer Technologien aufzuzeigen (Science, vol. 35, p. 968, 2004). Der Teufel steckt dabei keineswegs primär in den vielfältigen technischen Details, die alle im kleinen Maßstab lösbar sind, sondern vor allem in dem gewaltigen Umfang der notwendigen Investitionen und Maßnahmen.

Im ersten Schritt gehen wir von den bekannten Emissionen im Jahr 2008 aus und runden ab auf 8 Gt fossilen Kohlenstoff pro Jahr. Die Brandrodungen werden also nicht in diese Bilanz einbezogen. Anschließend prognostizieren wir ein sehr realistisches Referenzszenario: Wegen der Weltwirtschaftsentwicklung bei einem unveränderten Energiemix (80 % fossile Energieträger) erwarten wir eine Verdopplung der Emissionen bis etwa 2050 auf 16 Gt C pro Jahr. Eine Rezession oder eine globale Wirtschaftskrise würde diese langfristige Entwicklung nicht entscheidend verändern, sondern nur um sehr wenige Jahre hinauszögern.

Wir formulieren nun ein zuerst relativ bescheiden erscheinendes Ziel: Wir wollen die ständige Zunahme der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen stoppen!

Dazu fordern wir, die CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht ständig ansteigen lassen, sondern bei 8 Gt/Jahr einzufrieren, also zu deckeln!

In der Folge sollte dann die effektive Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre hoffentlich nicht mehr so schnell weiter ansteigen.

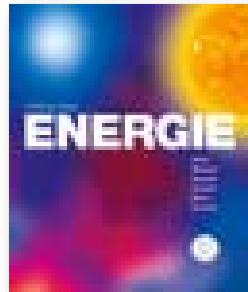
Unser gemeinsames und wirklich eher bescheidenes Ziel ist demnach eine globale Wirtschaftsentwicklung bei unveränderten Emissionen. Dabei müssen wir akzeptieren, dass die bevölkerungsreichen Schwellenländer ihre wirtschaftliche Entwicklung energisch voran treiben wollen. Auf diesem unabwiesbaren Entwicklungsbedarf fußt unser Referenzszenario, im Einklang mit fast allen Prognosen. In der Vergangenheit ist der Weltenergiebedarf jeweils um 1,5 – 2 % pro Jahr angewachsen, während das Wirtschaftswachstum sogar rund 3 % betrug. Ein jährliches Wachstum von 1,7 % bewirkt eine Verdopplung in 41 Jahren, ein schwächeres Wachstum verschiebt den Zeitpunkt der Verdopplung nur um wenige Jahre.

Bei unverändertem „Energiemix“ bedingt der in diesem Szenario prognostizierte Energiebedarf für das Jahr 2050 auch verdoppelte Kohlenstoff-Emissionen von nunmehr 16 Gt/Jahr. Dabei wird bereits stillschweigend vorausgesetzt, dass die verheerenden Brandrodungen der Tropenwälder endlich beendet werden.

Die Emissionen aus der Nutzung der fossilen Energieträger sollen nun durch vielfältige Maßnahmen soweit abgemildert werden, dass die Gesamtemissionen den Wert von 8 Gt nicht mehr überschreiten. Die dafür vorgeschlagenen Maßnahmen müssten möglichst bald beginnen und dem wachsenden Energiebedarf und dem Wirtschaftswachstum angepasst ständig erweitert werden, so dass ab etwa 2050 mindestens 8 Gt C pro Jahr im Vergleich zum Referenzszenario „eingespart“ werden können. In eine noch fernere Zukunft soll nicht mehr projiziert werden, denn schon der Blick 40 Jahre voraus ist ein unsicheres Unterfangen, weil niemand die Entwicklungen, Erfindungen und Entdeckungen der Zukunft vorhersagen kann.

Wir betrachten nun 16 beispielhafte Einzelmaßnahmen (Einzelszenarien), die jeweils eine Emissionsminderung um etwa 1 Gt C pro Jahr bewirken könnten. Wenn alle Szenarien nur zur Hälfte realisiert würden, hätte man bereits 8 Gt C eingespart – aber auch das könnte schwierig werden.

Man könnte sich nämlich zur Veranschaulichung vor Augen führen, dass der gesamte deutsche Beitrag etwa 2,5 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen ausmacht. Wenn man die globalen Emissionen begrenzen und den zunehmenden Energiebedarf emissionsfrei decken will, dann muss alle 18 Monate (verteilt über die ganze Erde) eine zusätzliche, brandneue „nicht-fossile Energiewirtschaft“ aufgebaut werden. Diese muss den gesamten derzeitigen deutschen Bedarf an Öl, Gas, Kohle durch emissionsfreie Technik ersetzen. Dieser Prozess muss sich im Rhythmus von 18 Monaten wiederholen. Jedes Mal muss die gesamte deutsche Industrie, die Infrastruktur für Verkehr und aller Wohnraum ganz neu er-





richtet werden – aber nun ganz und gar ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen!

Weil diese Problemlage ungewohnt und überwältigend ist, wiederholen wir die entscheidende Kernaussage noch einmal:

Etwa 8 dieser 16 vielfältigen und zum Teil sehr einschneidenden Maßnahmen sind notwendig, um den Anstieg (1,7 % pro Jahr) der Emissionen zu stoppen. Die Emissionen werden dadurch nur begrenzt, bleiben aber immer noch so hoch wie 2009. Wegen der CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch Ozeane und Biosphäre würde der jährliche CO<sub>2</sub>-Anstieg dann vermutlich weiterhin

bei 2 ppm/Jahr liegen, so dass man bis 2050 auf einen CO<sub>2</sub>-Spiegel von vielleicht „nur“ 470 ppm CO<sub>2</sub> in der Luft kommt. Die schlimmsten Befürchtungen der Klimaprojektionen könnten auf diese Weise vermutlich vermieden werden.

Jede der 16 Einzelmaßnahmen spart in jedem Jahr etwa 1 Gt C an Emissionen ein und müsste bis 2050 realisiert sein. Letztendlich ist natürlich die Gesamtsumme aller, auch der nur teilweise realisierten Beiträge, entscheidend und sollte 8 Gt erreichen. Es wird dabei immer die gesamte Erde betrachtet. Bitte beachten Sie die Referenzdaten auf S. 176.

### 1 VERKEHR

Derzeit gibt es ca. 500 Millionen Autos. 2050 rechnet man weltweit mit 2 Milliarden PKW. Diese dürfen dann nur noch etwa 4 Liter/100 km verbrauchen.

### 2 VERKEHR

Jedes dieser Autos sollte nur noch halb so viel wie derzeit benutzt werden. Zielvorgabe: max. 8000 km/Jahr. Statt dessen sind die öffentlichen Transportmittel und Telearbeitsplätze zu fördern, um den Berufsverkehr zu vermindern.



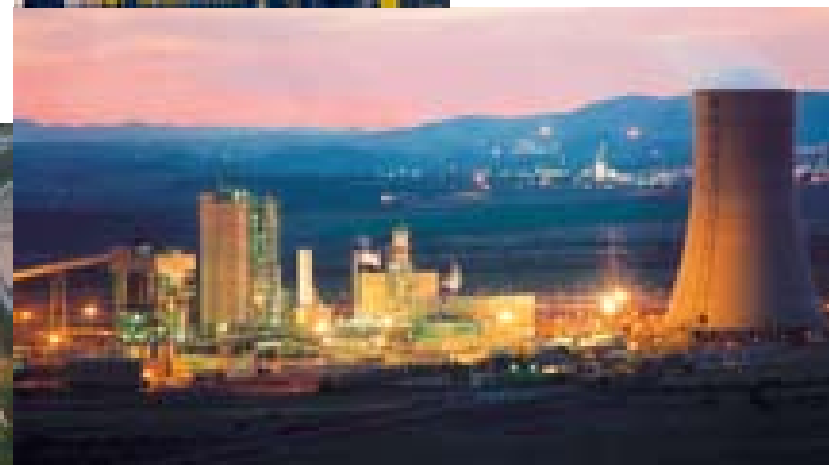
### 3 GEBÄUDE

Die Beheizung und Klimatisierung aller Gebäude sowie alle Hausgeräte müssten um 25 % effizienter werden: „Überall Wärme und Strom sparen!“ Bei diesem Vorschlag ergeben sich recht günstige Renditen für die Investitionen. Die Umsetzung wird sehr stark von den zu erwartenden Energiekosten motiviert.



### 4 GASKRAFTWERKE

880 Großkraftwerke (je 1 GW) werden mit Erdgas statt Kohle betrieben, denn Gaskraftwerke sind wesentlich CO<sub>2</sub>-ärmer. Das wertvolle Erdgas wird als „Klimaretter“ zunehmend begehrt, knapp und teurer werden. Es ist universell verwendbar und auch als Ersatz für Öl vorgesehen.



### ABKÜRZUNGEN:

#### CCS

Carbon Capture and Storage, d. h.: CO<sub>2</sub>-Abtrennung und unterirdische Verpressung, vgl. S. 153 und Ref. 2

#### CSP

Concentrating Solar Power, d. h.: Dampfkraftwerke werden mit Sonneneinstrahlung betrieben, vgl. Ref. 2

#### H<sub>2</sub>

Wasserstoff, als Energieträger eingesetzt.

#### PV

Photovoltaik, Solarzellen zur Stromerzeugung.

### 5 KRAFTWERKE

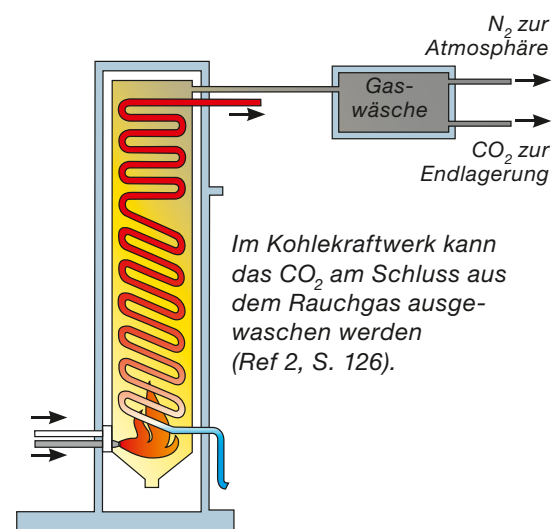
Verbesserung des Wirkungsgrades aller Kohlekraftwerke auf 60 %. Der derzeitige Wirkungsgrad liegt weltweit eher bei 30 %. Mit Hilfe neuer Werkstoffe wäre ein solcher Wirkungsgrad eventuell erreichbar, obwohl derzeit die modernsten Neubauten nur etwa 50 % erreichen können.

### 6 CCS

Das CO<sub>2</sub> von 440 modernen Kohlegroßkraftwerken (je 1 GW) wird abgeschieden und unterirdisch gespeichert. Derzeit (2010) sind zwei kleine CCS-Pilotanlagen in Deutschland in Betrieb. Eine kommerzielle Nutzung in einer Großanlage an einem Großkraftwerk ist durchaus vorstellbar, wurde aber weltweit noch nicht realisiert. Zur Endlagerung von CO<sub>2</sub> s. S. 154.

### 7 CCS UND H<sub>2</sub>

Eine Wasserstoffwirtschaft mit CO<sub>2</sub>-Endlagerung wird eingeführt. Benötigter Produktionsumfang: mindestens 500 Millionen t H<sub>2</sub> pro Jahr. Das ist mehr als das zehnfache aller derzeitigen Anlagen. Derzeit wird H<sub>2</sub> aus Erdgas gewonnen. Dabei entsteht sehr viel CO<sub>2</sub>. H<sub>2</sub> ist für den Verkehr vorgesehen. Ohne CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Endlagerung ist dieser Ansatz völlig kontraproduktiv.



**8 CCS UND SYNTHETISCHER KRAFTSTOFF AUS KOHLE**

Kohle soll in großem Stil zu Benzin hydriert und das massenhaft anfallende CO<sub>2</sub> abgetrennt und verpresst werden. Die Produktion von mehr als 1 Gt Benzin pro Jahr ist vorgesehen. Das ist, wenn überhaupt, nur für sehr kohlereiche Länder wie Südafrika sinnvoll, weil dort bereits heute Benzin konkurrenzfähig in großem Stil aus billiger Kohle hergestellt wird – allerdings unter extrem hoher CO<sub>2</sub>-Emission. Ohne CCS deshalb total kontraproduktiv.

**13 CSP**

440 CSP-Großkraftwerke je 1 GW sind im Sonnengürtel der Erde neu zu bauen. Eine zusätzliche Infrastruktur für die Gleichstrom-Hochspannungsübertragung zu den weit entfernten Verbrauchern, etwa von Afrika bis nach Europa, wird benötigt. Ein CSP-Großkraftwerk wurde bisher noch nicht errichtet.

**14 BIOSPRIT**

Etwa 1/6 der gesamten landwirtschaftlichen Anbaufläche müsste für Biosprit genutzt werden. Das bedeutet aber einen sehr starken Konflikt zur Lebensmittelproduktion, der noch wesentlich verschärft wird durch den weltweit ansteigenden Bedarf an Fleischprodukten. Heute wird diese noch im Jahr 2004 aufgelistete Möglichkeit strikt abgelehnt, denn heute (2010) leiden bereits über eine Milliarde Menschen an Unterernährung und Hunger. Nur moderne Biokraftstoffe der 2. Generation, die vor allem Abfälle nutzen, bleiben auch in Zukunft höchst wünschenswert. Welche Produktionsmengen dabei erreicht werden können, ist noch offen.

**9 WIND**

663 000 moderne, besonders große Windkraftanlagen (je 3 MW nominell) sind in windgünstigen Lagen, also möglichst nahe der Küste, neu zu errichten. Das sind 33-mal mehr Anlagen als es derzeit in Deutschland gibt.

**10 KERNENERGIE**

170 moderne Kernkraftwerke (Leistung etwa wie „Biblis“, zwei Blöcke mit je 1,3 GW) sind neu zu errichten. Dieser Ansatz wird weltweit als realistisch und kosteneffektiv eingeschätzt. Es werden derzeit die besonders sicheren Anlagen der 3. Generation gebaut.

**11 PV**

Ca. 840-mal so viele Anlagen, wie derzeit in Deutschland insgesamt vorhanden sind, müssen noch zusätzlich neu aufgebaut werden. Das ist ein extrem kostspieliger Vorschlag, siehe S. 177.

**15 WALD**

Sowohl: Totaler Stopp des Waldverlustes, der über 70 000 km<sup>2</sup>/Jahr ausmacht. Geschätzte Jahresbilanz heute: Über 120 000 km<sup>2</sup> Rodungen stehen Neuanpflanzungen von max. 50 000 km<sup>2</sup> gegenüber. Und gleichzeitig: Wiederaufforstung von 3 Millionen km<sup>2</sup> Waldfläche. Das ist die achtfache Fläche der gesamten Bundesrepublik. Diese gewaltige Fläche würde dann allerdings für viele Jahrzehnte ausreichen, um jährlich 1 Gt C in Form von Holz zu binden, bis sich viel später wieder ein Gleichgewicht aus Wachstum und Verrotten einstellt. Weil auch ein totaler Rodungsstopp notwendig wird, erscheint uns dieser Vorschlag als unrealistisch. Wertvolles Land wird immer knapper.

**12 WIND UND ELEKTROAUTOS**

Noch einmal über 1 Million Maxi-Windkraftanlagen (je 3 MW) sind nötig und werden installiert, um die Batterien von vielen Elektroautos aufzuladen.

**16 PFLUGTECHNIK**

Genereller, weltweiter Stopp des Tiefpflügens, um den Kohlenstoff des Humus im Boden zu erhalten. Zusätzlich sollte in großem Maßstab Holzkohle untergepflügt werden. Holzkohle bindet wertvolle Mineralien und speichert den Kohlenstoff für Jahrhunderte im Boden.

Wie kommt man zu den Zahlenwerten, die den 16 dargestellten Sparmöglichkeiten zu Grunde liegen?

Wir beginnen mit einer wichtigen Vorbemerkung: Die anschauliche, aber immer unpräzise Behauptung, eine Technik „erspare“ bestimmte CO<sub>2</sub>-Emissionen, benötigt zumindest eine Angabe darüber, was tatsächlich ersetzt wird.

Wir nehmen als Maß für eine zukünftig mögliche „Emissions-Ersparnis“ den Verzicht auf zukünftige Neubauten von hochmodernen Kohle-Großkraftwerken an. Wenn wir „alte Dreckschleudern“ als Maßstab wählen würden, könnten wir natürlich mit viel höheren Emissions-Ersparnissen glänzen. Beispiel: Bereits 400 000 (statt 663 000) neue Maxi-Windkraftanlagen ersparen 1 Gt C pro Jahr, wenn sie uralte Kohlekraftwerke ersetzen. Aus diesem Grund ist der Umfang einer „Ersparnis“ fast immer eine sehr willkürliche Größe, die leicht manipuliert werden kann. Alle Verkäufer lieben es, die schlechteste Alternative zum Vergleich heranzuziehen.

**Eine korrekte Argumentation geht von einem zu deckenden Mehrbedarf an Energie aus und vergleicht Neubauten unterschiedlicher, hochwertiger Technik.**

Für die **Verfügbarkeit** der Kohle-, Gas- und Kernkraftwerke setzen wir einen typischen Wert von 95 % an. Für die weiteren Verfügbarkeiten gilt im deutschen Jahresmittel:

**Windstrom:** bis zu 21 % der installierten Kapazität (Nennleistung) wegen der wind-schwachen Zeiten,

**Photovoltaik:** nur etwa 10 % der Nennleistung („peak power“) wegen der schwankenden Beleuchtungsstärke durch Sonnenstand, Wolken und Nachtzeiten.

### Referenzwerte

1 modernes **Kohlekraftwerk** mit einem sehr gutem Wirkungsgrad von 46 % emittiert 1 kg CO<sub>2</sub> für jede erzeugte kWh an elektrischer Energie. Es emittiert bei einer Leistung von 1 GW pro Stunde 273 t C oder  $2,4 \cdot 10^6$  t C pro Jahr.

Somit emittieren 440 Kohle-Großkraftwerke (je 1 GW, 95 % verfügbar) 1 Gt C pro Jahr. Sie liefern rechnerisch 418 GW an das Netz. (Kosten für 1 Kohlekraftwerk (1 GW): ca. 1 Milliarde Euro; 440 Kraftwerke also 440 Milliarden Euro)

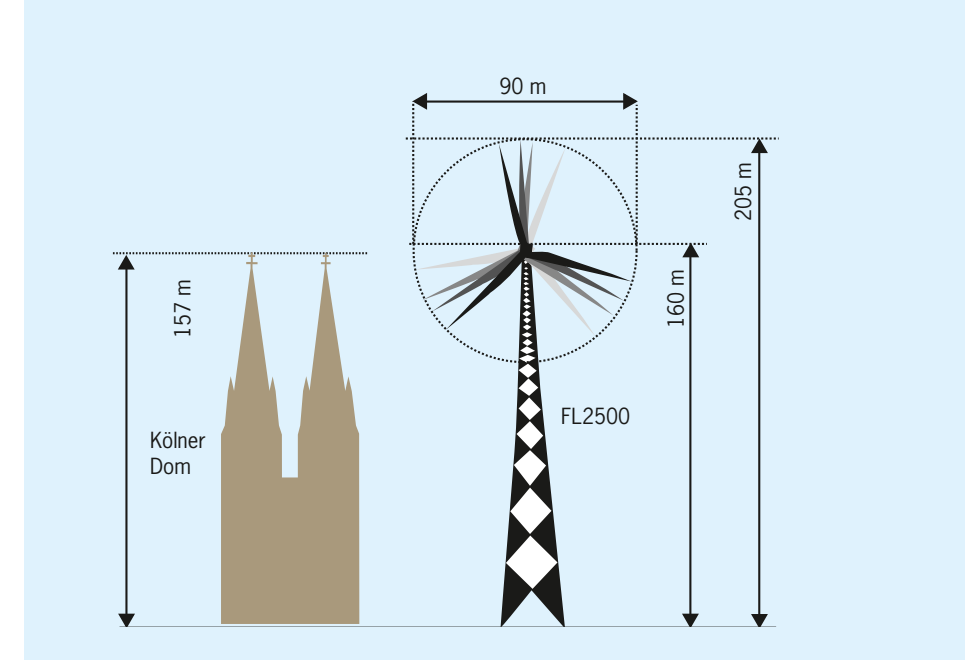
1 modernes **Kernkraftwerk** mit 2 Blöcken à 1,3 GW (vergleichbar mit „Biblis“) liefert 2,6 GW elektrische Leistung. 170 Kernkraftwerke (2,6 GW, 95 % verfügbar) erzeugen 418 GW und „ersparen“ 1 Gt C pro Jahr.

KKW-Kosten für 1 GW: ca. 2 Milliarden Euro; 170 große KKW mit 418 GW: 884 Milliarden Euro. Die Kosten für Wiederaufarbeitung und Endlagerung können wir derzeit wegen anhaltender gesellschaftlicher und politischer Widerstände in Deutschland nicht beziffern.

1 moderne große **Windkraftanlage** (3 MW, max. Höhe der Rotorblattspitze: 150 m) liefert im Jahr 0,63 MWJahre an „Strom“, das sind 21 % der Nennkapazität, und kostet ca. 3 Millionen Euro.

663 000 Windräder (3 MW Nennleistung) liefern im Jahr 418 GWJahre „Strom“, die nominelle Ersparnis beträgt dann 1 Gt C. Das sind

Die derzeit höchste Windkraftanlage (FL 2500) steht nördlich von Cottbus. Ihr Turm hat eine Nabenhöhe von 160 m und übertrifft damit die 157 m der Türme des Kölner Doms. Der Rotor mit 90 m Durchmesser erreicht eine Höhe von 205 m und überstreicht eine Fläche von 6300 m<sup>2</sup> – das entspricht tatsächlich einem „senkrecht in dieser Höhe aufgespannten Fußballfeld“!



33-mal mehr Windtürme als derzeit insgesamt in Deutschland aufgestellt sind (derzeit 19 000, alles wesentlich kleinere Anlagen). Investitionskosten für 663 000 Anlagen (3 MW): etwa 2000 Milliarden Euro.

ABER: Wegen der Flautenzeiten müssen zusätzlich schnell reagierende Gaskraftwerke entsprechender Leistung gebaut werden. Das erhöht die Kosten wesentlich und führt obendrein zu erheblichen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

**1 Photovoltaik(PV)-Dachanlage** von 100 m<sup>2</sup> gibt maximal 10 kW elektrische Leistung ab (Kosten: ca. 50 000 Euro). In Deutschland (2008) sind Photovoltaik-Solarzellen für ca. 5 GW Spitzenleistung installiert, die naturgemäß nur bei voller Sonneneinstrahlung erreicht werden kann. Sie liefern zusammen etwa 0,5 GW-Jahre an elektrischer Energie – das entspricht einer 10 %-Nutzkapazität. Die Summe der Installationskosten beträgt bisher insgesamt ca. 25 Milliarden Euro. Erst das 840-fache der gesamten deutschen installierten PV-Kapazität erspart 1 Gt C (und würde unglaubliche 20 000 Milliarden Euro kosten, vgl. Ref. 2, S. 96). ABER: Auch hier müssen entsprechende Ersatzkraftwerke (Gaskraftwerke) für dunkle

Stunden zusätzlich gebaut werden. Wegen der a priori bereits extrem hohen Kosten von PV-Anlagen steigt der Gesamtpreis dadurch nur noch unwesentlich. Allerdings bedingen die notwendigen Ersatzkraftwerke vermutlich wiederum CO<sub>2</sub>-Emissionen.

**Gaskraftwerke** sind so teuer wie Kohlekraftwerke gleicher Leistung, emittieren aber nur etwa die Hälfte an CO<sub>2</sub> pro erzeugter kWh elektrischer Energie.

Man erkennt die gewaltigen Unterschiede in den Investitionskosten, die durch die Brennstoffkosten derzeit nicht kompensiert werden, obwohl Sonne und Wind kostenlos sind.

Der jährliche Brennstoffbedarf eines Kernkraftwerks von 2,6 GW beträgt 50 t angereichertes Uran, was mit rund 6,2 Millionen t Kohlebedarf für Kohlekraftwerke und anschließender Emission von 6,2 Millionen t C verglichen werden muss.

1 kg CO<sub>2</sub> entspricht 0,273 kg Kohlenstoff;  
1 Jahr = 8760 Stunden;  
1 GWJahr = 8,76 TWh.

### Können wir die Einsparung von 8 Gt Kohlenstoff pro Jahr erreichen?

Technisch und quantitativ denkende Leser sind durch die Zahlen vermutlich erschreckt oder zumindest ernüchtert worden, denn Physik und Mathematik sind eindeutig: Eine leicht erreichbare, perfekte Lösung ist nicht zu erkennen, auch wenn es noch weitere, andersartige Sparmöglichkeiten gibt als die 16 Hauptpunkte auf unserer Liste. Denken wir an die Nutzung von Geothermie (Erdwärme), die Kernfusion (noch im Entwicklungsstadium) und besonders alle nur denkbaren Möglichkeiten zum sparsamen Umgang mit Energie und Rohstoffen. Auch die vorsichtige Nutzung und das Recycling von Gebrauchsgütern sind wichtig, denn in jedem Produkt steckt ein verborgener Anteil von Energie, die zuvor für die Ausgangsmaterialien, die Produktion und den Transport aufgewendet werden musste. Immerhin sollen ja bis 2050 mindestens Einsparungen von 8 Gt C pro Jahr erreicht werden. Intelligenz, Sorgfalt und Sparsamkeit sind deshalb allorten nachdrücklich gefordert.

Nun sind die vielen Zahlen nicht jedermanns Sache. Wer von den Daten irritiert und verunsichert wurde, der könnte sich die Problematik des Energiebedarfs der ständig anwachsenden und aufstrebenden Erdbevölkerung vielleicht so veranschaulichen:

Wenn ganz Deutschland von heute ab vollständig und für immer auf Benzin, Öl, Gas und Kohle verzichten würde, was natürlich einen katastrophalen Zusammenbruch der Versorgung und sicherlich sogar eine große Hungersnot bedeuten würde, so würde der derzeitige Anstieg des CO<sub>2</sub> in der Luft nur um ca. 18 Monate verzögert – mehr wäre durch dieses gewaltige Opfer nicht gewonnen, denn

Deutschland ist mit 1,2 % der Weltbevölkerung eben nur ein sehr kleiner Teil der Welt.

Dennoch zeigt diese Liste mit großer Klarheit, dass wir sehr genau darauf achten sollten, wie wir unsere begrenzten Mittel für zukünftige Investitionen möglichst sinnvoll und zielführend einsetzen. Verbesserungen durch Forschung und Entwicklung sind allenthalben möglich und angesichts des Umfangs der zukünftig notwendigen Investitionen auch besonders erfolgversprechend.

Mit Sicherheit können wir in Deutschland dem Klima der Erde keinen besseren Dienst erweisen, als optimale (Energie-) Technik zu entwickeln und die aufstrebenden Länder mit ihren Bevölkerungsmilliarden damit zu beliefern. In diesen Ländern wird letztendlich über die Zukunft des Klimas entschieden werden.

Dass unsere Produkte zu möglichst günstigen, konkurrenzfähigen Preisen angeboten werden müssen, ist offensichtlich, und es erscheint geradezu geboten, den Export von CO<sub>2</sub>-sparender Technologie nach Kräften zu fördern und zu erleichtern. Das gilt für die Massenproduktion einfacher Solarcooker für ländliche Regionen ebenso wie für neue Transport- und Verkehrssysteme oder Großkraftwerke für die ständig wachsenden Megastädte.

Grundfalsch dagegen wäre es, alle energieintensiven Industrien aus Deutschland zu verbannen, um mit der nationalen CO<sub>2</sub>-Bilanz protzen zu können. Die entsprechenden Produktionen würden in Länder mit geringeren Umweltstandards verlagert, und dem globalen

Klima würde damit vermutlich nur geschadet – von den Folgen für unsere Wirtschaft abgesehen. Hierin liegt eine gewisse Gefahr des von der Politik neu etablierten europäischen Handels mit CO<sub>2</sub>-Emissionsrechten.

Die vielfältigen Warnungen vor dem globalen „Klimaproblem“ sind ein wichtiger Weckruf.

Dabei bleibt es aber eine oft vergessene und sehr unbequeme Wahrheit, dass unser Wohlstand ganz entscheidend auf einer zuverlässigen Energieversorgung beruht. Deren Zukunftsfähigkeit wird entscheidend durch Ausbildung, Forschung und Entwicklung gesichert. Deshalb müssen die besten Studenten und Absolventen motiviert werden, sich dieser Aufgaben anzunehmen. Die Liste der energierelevanten Themen und Herausforderungen ist lang, wichtig und spannend.

Ausbildung und Studium in Deutschland müssen mit Nachdruck auf die energierelevanten Themen ausgerichtet werden, denn ohne qualifiziertes Fachwissen sind die Fragen der Zukunft nicht zu lösen.

Jeder Ingenieur, der den Wirkungsgrad eines Kraftwerks auch nur um einen halben Prozentpunkt weiter verbessert, macht sich um die Atmosphäre, die Erde und unsere Zukunft nachhaltig verdient.

Das Spektrum der interessanten und zukunftssicheren Arbeitsplätze auf dem Energiesektor ist weit und sehr beeindruckend.

### Umweltschutz, Vermeidungskosten und Marktwirtschaft

Der Umweltschutz ist ein typischer Bereich, in dem es um den Erhalt und die Nutzung eines „gemeinsamen Gutes“ (Eigentum der Allgemeinheit) geht: Saubere Luft, sauberes Wasser, gesunde Flora und Fauna und eine schöne Landschaft sollen von allen genutzt und für alle erhalten werden. Häufig werden die berechtigten Bedürfnisse für Wohnungsbau, Industrie, Landwirtschaft und Verkehr (Straßen, Bahnlinien) damit konkurrieren. Hier müssen Staat und Gesellschaft mit Hilfe der Gesetzgebung regulierend eingreifen, denn Umweltschutz ist keine Ware, für die es eine Börse, einen Markt oder einen Marktpreis gibt.

Uns bewegt an dieser Stelle die Belastung oder Verschmutzung der Atmosphäre (ein gemeinsames Gut) durch vielfältige individuelle Emissionen. Wer Auto fährt, Zement kauft oder Strom nutzt, hat davon seinen direkten, persönlichen Nutzen, aber er trägt auch zwangsläufig zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen bei.

Wie kann man erreichen, dass möglichst viel CO<sub>2</sub> „eingespart“ wird, ohne dass man Autos, Zementfabriken und Kraftwerke allzu willkürlich mit hohen Steuern belegt? Wie kann man herausfinden, wie teuer oder rentabel es wäre, ein alternatives, CO<sub>2</sub>-minderndes Kraftwerk zu errichten und zu betreiben?

Überraschender Weise kann an dieser Stelle die „Intelligenz des Marktes“ tatsächlich für den Umweltschutz eingesetzt werden. Am Markt regeln Angebot und Nachfrage die Preise, und der Wettbewerb belohnt die effektivsten der Marktteilnehmer. Die günstigsten Produzenten und Verkäufer, aber auch die



klügsten Käufer und Verbraucher kommen dabei zum Zuge.

Wer fossilen Kohlenstoff einsparen will, kann das auf verschiedene Weise tun: sparsamer heizen, weniger Auto fahren, den Stromverbrauch drosseln. Er kann aber auch investieren, um sein Haus oder seine Fabrik zu modernisieren und dann mit geringerem Energieeinsatz auszukommen. Wie kann ein Privatmann oder ein Firmenchef optimal CO<sub>2</sub>-Emissionen vermeiden? Welche Investitionen werden sich rentieren, welche sind vergleichsweise viel zu teuer?

Ein Zementproduzent könnte Investitionen vornehmen, um 1 t CO<sub>2</sub> einzusparen. Auch ein Kraftwerksbetreiber, ein Chemiebetrieb, ein Verkehrsbetrieb, eine Fluggesellschaft oder ein Privatmann könnten entsprechende Maßnahmen durchführen. Der Effekt für die Atmosphäre wäre in jedem Fall derselbe. Im privaten Sektor wären manche Entscheidungen relativ schmerzlos (am Wochenende auf den PKW verzichten), andere aber wären sehr unangenehm (auf warmes Wasser oder den Strom vollständig verzichten). Im industriellen Sektor sind solche Überlegungen noch weitaus komplizierter. Die Firmen stehen im Wettbewerb. Die unternehmerischen Entscheidungen haben weit reichende Konsequenzen für Umsatz, Gewinn und Arbeitsplätze. Eine effektive Regelung durch Gesetze und Vorschriften kann es in diesem komplizierten wirtschaftlichen Spannungsfeld nicht geben – eine globale Planwirtschaft ist unvorstellbar und wäre auch kein gangbarer Weg. Statt dessen zielen die Planer auf die eingespielten Mechanismen der Marktwirtschaft: Wenn die Emissionen Geld kosten würden, so könnte derjenige Gewinne machen, der die höchsten

Emissionsreduktionen („CO<sub>2</sub>-Ersparnisse“) pro investiertem Euro erzielt.

Weil ein großer Markt immer über die effektivsten Mechanismen verfügt, um die kostengünstigsten Verfahren zu ermitteln, ist es prinzipiell eine geniale Idee, die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit einem Preis zu versehen und mit einem internationalen Markt zu verkoppeln.

Für notwendige Emissionen wird nun von allen Verursachern ein noch zu ermittelnder „Marktpreis“ verlangt, der an den Staat zu zahlen ist. Die Kosten für betriebsnotwendige Emissionen stehen damit gleichrangig neben den Rohstoffkosten und den Betriebskosten. Wer preiswert anbieten will, senkt seine Emissionen nach Möglichkeit und damit seine Kosten. Darüber hinaus aber, und das ist der Clou, kann er nicht benötigte Emissionsrechte verkaufen an solche Firmen, die dringend zusätzliche fossile Energieträger einsetzen müssen, um ihre Produktion aufrecht zu erhalten.

Dazu wurden die „Verschmutzungsrechte“ (EUA-Zertifikate – European Union Allowances) erfunden und 2005 eingeführt. Sie beinhalten amtliche Genehmigungen für CO<sub>2</sub>-Emissionen und können gekauft und verkauft, also frei gehandelt werden. Auf diese Weise soll sich für die Zertifikate ein Marktpreis einpendeln. Die Menge der erteilten Zertifikate wird begrenzt und soll im Laufe der Jahre verringert werden. Der Umfang der tatsächlichen Emissionen wird kontrolliert, Übertretungen werden hart bestraft. Die EUA für 1 t CO<sub>2</sub>-Emission kann beispielsweise 30 bis 50 Euro kosten. Wenn man das auf die Brenn-

stoffkosten umrechnet, erhöht sich dadurch der Preis für einen Liter Heizöl oder Diesel um 7 – 12 Cent. Der Zertifikatehandel umfasst inzwischen 45 % des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes der EU.

Wir fassen die erhofften Vorteile zusammen:

1. Die Firmen (Zement- und Stahlwerke, Elektrizitätswirtschaft, ...) werden versuchen, ihre Emissionen zu begrenzen, weil das für sie bares Geld bedeutet.
2. Leicht erzielbare CO<sub>2</sub>-Einsparungen an einer Stelle können schwer vermeidbare CO<sub>2</sub>-Emissionen an anderer Stelle kompensieren.
3. Insgesamt soll auf diese Weise maximal CO<sub>2</sub> mit dem geringsten Kapitaleinsatz eingespart werden.
4. Die Kosten (die jeweiligen „Grenzkosten“) der CO<sub>2</sub>-Einsparungen können am Marktpreis der Zertifikate abgelesen und damit objektiviert werden. Eine faire Kostenermittlung für die CO<sub>2</sub>-Emissionen ist nämlich auf eine andere Weise kaum möglich.
5. Im Gegensatz zu einer wesentlich einfacheren Kohlenstoff-Besteuerung werden ausschließlich die anfallenden Emissionen berücksichtigt. Das ist vom Gesichtspunkt der Logik völlig richtig, aber leider mit viel zusätzlicher Bürokratie verbunden. Allerdings verzichtet die Bürokratie dabei auf jede planwirtschaftliche Regulierung der Produktionsprozesse.
6. Wenn es allerdings zukünftig gelänge, den fossilen Kohlenstoff auch ohne Emissionen zu nutzen (CCS, S. 153), dann ist eine Emissionsbuchhaltung sogar wesentlich gerechter als eine Kohlenstoff-Besteuerung.

Bis zu diesem Punkt ist die Logik eines globalen Zertifikatehandels recht überzeugend.

Problematisch bleibt natürlich der Umfang der Zuteilungen und damit die Anzahl der am Markt verfügbaren Zertifikate. Zu viele Zertifikate lassen den Preis verfallen, zu wenige Zertifikate erdrosseln die Wirtschaft. Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Tatsache, dass es derzeit noch keinen globalen Markt für Verschmutzungsrechte gibt, sondern nur EU-weite Regelungen sowie viele berechnete Ausnahmen. Deshalb funktionieren die Marktmechanismen nur eingeschränkt, insbesondere auch, weil das Ziel ja eine globale Emissionsminderung sein muss. Eine mögliche und in gewissem Umfang wahrscheinliche Verlagerung von Emissionen aus Deutschland in Schwellenländer, in denen es noch gar keine Emissionsbegrenzung gibt und die obendrein viel geringere Umweltstandards haben, wäre natürlich besonders kontraproduktiv. Wenn unsere Zementwerke nach Nordafrika und unsere Chemieindustrie an den Golf auswandern, dann ist damit weder dem Klima noch unseren Arbeitsplätzen gedient. Es muss auch befürchtet werden, dass sich Länder mit besonders schwacher Wirtschaftskraft durch den Verkauf von zugekauften Zertifikaten nur eine neuartige Einnahmequelle verschaffen wollen. Die an diesem Themenkomplex interessierten Leser möchten wir auf die verständlichen Erläuterungen in Ref. 17 verweisen.

Auch der viel zitierte „Stern-Report“ aus dem Jahr 2006 (im Internet unter „Stern Report“ oder „Stern Review“ zu finden) fordert einen umfassenden, globalen Markt für Verschmutzungsrechte. In diesem Bericht wird ein gewaltiger Bogen bis in das Jahr 2100 geschlagen, und es werden wesentlich über die Verschmutzungszertifikate hinaus gehende ökonomische Folgerungen gezogen. Auf der

Basis der IPCC-Szenarien und Klimamodelle werden die Temperaturprojektionen diskutiert und die dadurch bedingten weltweiten Schäden mit ihren ökonomischen Konsequenzen abgeschätzt. Dazu zählen die zu erwartenden Schäden durch zusätzliche Stürme und Überschwemmungen, Ernteauffälle, Krankheiten und Todesfälle. Die finanzielle Bilanz all dieser anthropogen verursachten Schäden wird zum Weltsozialprodukt (WSP) in Beziehung gesetzt (Das Weltsozialprodukt ist der Gesamtwert der global produzierten Güter und Dienstleistungen und beträgt derzeit etwa 30 Billionen Euro pro Jahr, das sind 4300 Euro pro Jahr und Kopf der Weltbevölkerung). Wenn 1 % dieser Summe eingesetzt würde, das sind 300 Milliarden Euro pro Jahr, könnten effektive Emissions-Vermeidungsmaßnahmen realisiert werden. Damit könnte man von dem derzeit beobachteten, sehr ungünstigen A1FI-Szenario umsteuern zu einer viel günstigeren Entwicklung und die zu erwartende Schadensbilanz enorm verringern. Stern erwartet, dass der „ungebremste“ Klimawandel

Schäden und Kosten von 5 % bis zu 20 % des WSP verursachen wird. Wenn man aber heute reagiert und ab sofort 1 % des WSP in Klimaschutzmaßnahmen investiert, so berechnet Stern zukünftige finanzielle Ersparnisse von mindestens 4 % des WSP. Den Schäden von 5 % des WSP werden dabei die Investitionskosten in den Emissionsschutz von 1 % des WSP gegenüber gestellt.

Weil die Geldwerte der in ferner Zukunft erwarteten Schäden zwangsläufig auf weitgehenden Annahmen beruhen, sind die Zahlen des Reports mit hohen Unsicherheiten behaftet und entsprechend umstritten.

Unstrittig dagegen muss die Schlussfolgerung bleiben, dass wir heute den Energiebedarf und die Emissionen senken müssen, um die Folgekosten nicht ungebremst den zukünftigen Generationen aufzubürden.



Christian-D. Schönwiese

Lara Ludwigs

Sonja Gröntgen

Ernst Dreisigacker

Christoph Buchal

# DAS GESPRÄCH



Lara Ludwigs und Sonja Gröntgen, zwei Schülerinnen des Gymnasiums Haus Overbach in Jülich, und Dr. Ernst Dreisigacker, Geschäftsführer der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung in Hanau, sprechen mit dem Klimatologen Christian-Dietrich Schönwiese über seine persönlichen Erfahrungen und über seine Sicht der gegenwärtigen Situation der Klimaforschung.

### **Herr Professor Schönwiese, die Klimaforschung hat Hochkonjunktur. Wie oft halten Sie zur Zeit Vorträge über den Klimawandel?**

Im Durchschnitt einmal pro Woche.

### **Was ist die „Take-home-message“ Ihrer Vorträge?**

Mehreres:

- Das Klima zu verstehen ist alles andere als einfach.
- Klimawandel in Zeit und Raum gibt und gab es schon immer, aber je nach zeitlicher Größenordnung aus den unterschiedlichsten Gründen.
- Im Industriezeitalter dominiert der Klimafaktor Mensch.
- Daraus resultiert eine besondere Verantwortung für unser Tun.

### **Welche Fragen werden Ihnen am häufigsten gestellt?**

Meistens Verständnisfragen, wie zum Beispiel: „Wie kommt man zu globalen Mittelwerten der Temperatur?“ oder „Wie funktionieren Klimamodelle und wie verlässlich sind sie?“ oder „Welche Rolle spielen Sonnenaktivität und Golfstrom?“ Ich werde aber auch relativ häufig gefragt: „Was sollten wir tun?“

### **Und wie kommt man zu einer mittleren globalen Temperatur der Atmosphäre?**

Allgemein gesagt geht es um die Errechnung räumlicher Mittelwerte, und das ist in vielen wissenschaftlichen Disziplinen Routine. Sie werden durch jede Grafik-Software geliefert, die Isolinien, also Linien gleicher Werte, erzeugen kann. Ein alltägliches Beispiel sind die Isobaren, die Linien gleichen Luftdrucks auf der Wetterkarte. In der Klimatologie geht man so vor, dass man zuerst aus den räumlich unregelmäßig vorliegenden Messdaten durch Interpolation Daten erzeugt, die sich auf ein regelmäßiges Gitter beziehen. Solche Datengitter braucht man ständig auch für die Wetter- und Klimamodellrechnungen. Dann kann man in einem zweiten Schritt sehr einfach arithmetische Mittelwerte bilden. Wichtig ist dabei allerdings, dass die räumlichen Unter-

schiede ausreichend berücksichtigt werden. Da sie beispielsweise beim Niederschlag viel größer sind als bei der Temperatur, müssen beim Niederschlag sehr kleinräumige Gitter verwendet werden. Bei den Jahresdaten der Temperatur reichen in einigermaßen guter globaler Verteilung grob geschätzt 100 Stationen, was seit ungefähr 1850 gut erfüllt ist.

### **Temperatur, Niederschläge, Windverhältnisse und Luftdruck sind statistisch gut erfasst. Sie selbst sind Experte auf diesem Gebiet. Kann man auf dieser Grundlage auch Klimavorhersagen gewinnen?**

Allein auf der Grundlage der Klimadaten-Statistik der Vergangenheit kann das nicht gelingen. Man braucht dazu zusätzlich aufwändige physikalische Klimamodelle. Zudem sind „Klimavorhersagen“, ähnlich den „Wettervorhersagen“, prinzipiell nicht möglich, weil wir bei vielen natürlichen Einflüssen, zum Beispiel dem Vulkanismus, und auch beim Menschen nicht genau wissen, wie er sich in der Zukunft verhalten wird. Bei der Frage, wie sich der Klimafaktor „Mensch“ in Zukunft auswirken wird, geht man daher von alternativen Annahmen aus, den Szenarien. Dabei lässt man die natürlichen Klimavariationen ganz außer Acht und spricht von bedingten Klimaprojektionen. Die statistisch erfassten Messdaten werden als Anfangszustand für die Modellrechnungen benötigt.

### **Wir sind also auf die sehr komplexen Klimamodelle angewiesen, die der Laie als „Schwarze Kästen“ empfindet und denen er misstraut. Was steckt in den Schwarzen Kästen?**

Das ist eine durchaus problematische Frage. Selbst die direkt damit befassten Fachleute haben vor den großen Modellen erheblichen

Respekt, denn immerhin muss mit ihrer Hilfe das energetische und dynamische Geschehen auf der ganzen Erde nachgebildet werden.

Der dafür benötigte Aufwand ist gigantisch, wie man an den Rechenzeiten von mehreren Monaten pro Simulation erkennen kann – und das selbst auf den größten Rechenanlagen der Welt! Das gilt zumindest für die räumlich einigermaßen gut auflösenden gekoppelten globalen Atmosphäre-Ozean-Modelle. Im Kern bestehen sie aus physikalischen Gleichungssystemen, die alle wichtigen Zustandsgrößen erfassen und die Schritt für Schritt gelöst werden. Das kann für Klimaentwicklungen der Vergangenheit geschehen oder in Richtung Zukunft.

Man startet bei den bekannten messtechnisch erfassten Anfangszuständen. Die Berechnungen benutzen ein Daten- und Gitterpunktsystem von global derzeit circa 500 – 100 km Maschenweite und circa 20 – 50 „Schichten“ von der bodennahen Atmosphäre, der Troposphäre, bis hinauf zur Stratosphäre. Dabei sind diese Schichten eigentlich die Flächen gleichen Luftdrucks. Dazu kommt die Dynamik der tiefen Ozeane. Die gewaltigen Rechenzeiten gehen auch darauf zurück, dass es sich um Differentialgleichungen handelt, die iterativ, das heißt in schrittweiser Näherung gelöst werden müssen.

Obwohl alle diese Modelle zunächst im so genannten Kontrollexperiment daraufhin getestet werden, ob sie das derzeitige Klima korrekt wiedergeben, können sie die Klimavergangenheit oder die Zukunft immer nur näherungsweise abbilden. Im Einzelnen müssen ihre Vor- und Nachteile daher sehr genau gesehen und interpretiert werden.



**Wenn man die „Klimaprognosen“ betrachtet, erkennt man eine beträchtliche Unsicherheit. Das liegt natürlich an den Annahmen darüber, wie sich die Weltbevölkerung, die Wirtschaftsstrukturen und die Energieversorgung entwickeln werden. Aber: Kommt nicht auch weitere Unsicherheit, womöglich der größere Teil, daher, dass es so viele verschiedene Klimamodelle gibt? Wozu braucht man so viele konkurrierende Klimamodelle?**

Ganz offensichtlich ist vor allem das zukünftige menschliche Handeln entscheidend für den zu erwartenden Klimawandel. Die Entwicklung von Weltbevölkerung, Energiebedarf und Energiebereitstellung wird durch die unterschiedlichen Familien von Szenarien beschrieben. Das große Ausmaß dieser Unterschiede spiegelt unsere weitgehende Unkenntnis der Zukunft wider.

Aber auch die Klimamodelle sind unsicher. Wären sie perfekt, was sie übrigens nie sein werden, dann müssten sie alle für ein spezielles Szenario auch genau dieselbe Projektion liefern. Das ist offenbar nicht der Fall. Um nun die Modellunsicherheiten abschätzen zu können, ist es sinnvoll, mit physikalisch „unterschiedlich gestrickten“ Modellen zu arbeiten. So ist die Behandlung der Wolken, aber auch die räumliche Auflösung von Modell zu Modell unterschiedlich. In der Gewissheit, dass kein Modell perfekt ist, aber in der Hoffnung, dass die unterschiedlichen Ergebnisse für identische Szenarien die Wahrheit mit einschließen, benötigt man aus statistischen Gründen eine hinreichend große Anzahl von Modellen. Im letzten Bericht des IPCC waren das 23 Modellrechnungen für den erwarteten Anstieg der global gemittelten Lufttemperatur bis zum Jahr 2100. Gerade für die Zukunft geben Klimatologen daher nie genaue Zahlen, sondern stets nur Bandbreiten der Projektionen an.

Derzeit ist aber die Streuung der Projektionen durch die Verwendung der unterschiedlichen Modelle deutlich geringer als die Streuung durch die unterschiedlichen Szenarien.

**Alle Modelle reproduzieren den bereits erfolgten Temperaturanstieg seit Beginn der Industrialisierung, und sie sagen einen weiteren Anstieg in den nächsten Jahrzehnten voraus. Gibt es wissenschaftliche Methoden, mit denen man diesen berechneten Temperaturanstieg von natürlichen Fluktuationen unterscheiden und zweifelndfrei auf menschliche Aktivitäten zurückführen kann?**

Ja, und dafür gibt es zwei Wege.

Zum einen kann man mit Hilfe der üblichen aufwändigen physikalischen Klimamodelle auch die Effekte aller natürlichen Vorgänge simulieren, die neben dem Klimafaktor „Mensch“ von Bedeutung sind. Das sind vor allem die Sonnenaktivität und der Vulkanismus. Um das Zusammenwirken aller wichtigen menschlichen Einflüsse und der natürlichen Vorgänge zu simulieren, müssen diese Modelle jedoch drastisch vereinfacht werden. Schließlich dürfen wir nicht vergessen, dass zu den menschlichen Einflüssen nicht nur die Treibhausgase, sondern unter anderem auch Partikelemissionen, Landnutzung und Waldrodung zählen.

Der zweite Weg ist der statistische, der allein auf Beobachtungsdaten beruht. Man betrachtet die resultierende Wirkung und setzt sie in Beziehung zu den unterschiedlichen, bekannten Einflussgrößen wie Sonnenaktivität, Vulkanismus und Treibhausgase. Die dabei zumeist betrachtete Wirkungsgröße ist die Temperatur. Dadurch werden die Zusammenhänge zwischen den Ursachen,



die Einflussgrößen genannt werden, und den Wirkungen, wie Temperaturänderungen, formal abgeschätzt. Das geschieht mit Hilfe von Korrelations- und Regressionsrechnungen, noch besser aber mit Hilfe der so genannten neuronalen Netze, die eine relativ aufwändige statistische Alternative dazu darstellen.

Kommt man auf beiden Wegen, dem physikalischen und dem statistischen, zu ähnlichen Ergebnissen, kann man von einer gewissen gegenseitigen Verifikation sprechen. Und das ist zumindest bei der großräumig gemittelten Temperatur der Fall, natürlich immer in der Bandbreite der Modellunsicherheiten.

**Gibt es dieselbe Gewissheit auch im Fall der anderen wichtigen Größen Niederschläge und Wind?**

Leider nein! Zum einen sind die physikalischen Klimamodelle hinsichtlich der Niederschläge und des Windes viel unsicherer als bei der Temperatur. Zum anderen liefern die statistischen Modelle in diesen Fällen nicht genügend so genannte erklärte Varianz. Damit bezeichnet man die Treffsicherheit bei den statistisch reproduzierten Variationen der Zielgrößen Niederschlag und Wind. Anders gesagt: Ist diese Varianz relativ klein, dann ist der Unterschied zwischen den tatsächlich beobachteten und statistisch reproduzierten

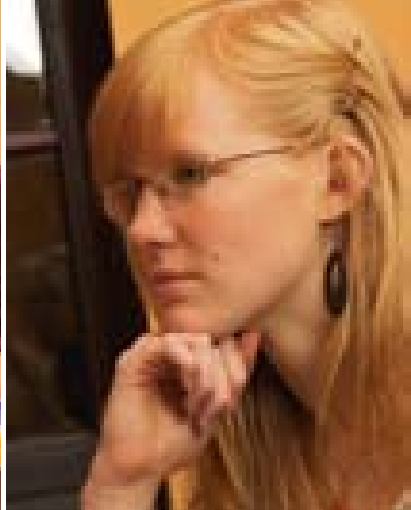
Variationen der Zielgrößen relativ groß. Man kann das auch so sehen: In diesen Fällen spielen chaotische Vorgänge eine relativ große Rolle. Das Verhalten der Temperatur ist dagegen langfristig-klimatologisch weitgehend determiniert und somit weniger vom Chaos-Problem betroffen.

**An welchen Stellen müssen die heutigen Klimamodelle weiter entwickelt und verfeinert werden?**

Im wesentlichen an vier Stellen:

- Zum einen müssen die physikalischen Prozesse noch besser erfasst werden. Das betrifft besonders die Wolken- und Niederschlagsbildung, Aerosolverteilung und Meereisbedeckung.
- Zum zweiten müssen neben Atmosphäre, Ozean und Erdoberfläche auch die Eisbedeckung und insbesondere die Vegetation in die Modellierung interaktiv einbezogen werden. Damit sind die wichtigen Wechselwirkungen, zum Beispiel zwischen Vegetation und Klima, gemeint.
- Zum dritten muss die räumliche Auflösung weiter erhöht werden. Damit die Rechenzeit nicht völlig aus dem Ruder läuft, kann man die interessierenden Regionen wie





Mitteleuropa mit feinerer Auflösung in die grobmaschigeren Globalmodelle einbetten. So erhält man die Regionalmodelle.

- Zum vierten brauchen wir mehr Erkenntnisse über die Modellunsicherheit. Das kann nicht nur durch unterschiedliche Berücksichtigung und Handhabung der physikalischen Prozesse und ihrer Wechselwirkungen geschehen, sondern auch dadurch, dass man die Modelle mit leicht variierenden Anfangsbedingungen starten lässt.

**Hitzerekorde, Starkregen mit Überschwemmungen und katastrophale Stürme häufen sich – zumindest in unserer Wahrnehmung. Sind das schon die Folgen des Klimawandels oder nur statistische Ausreißer?**

Der Begriff „Ausreißer“ wird insbesondere in der Messtechnik benutzt, wenn es sich um wenig vertrauenswürdige Daten oder gar Messfehler handelt. Man fragt sich dann, ob man solche Daten überhaupt berücksichtigen oder besser völlig ignorieren soll. In der Klimatologie ist dieser Begriff unüblich und der Fachbegriff „Extremwerte“ sinnvoller. Dabei handelt es sich um relativ große Abweichungen von den mittleren Werten, die aber

ganz sicher real sind. Daraus ergibt sich die wichtige Frage, ob sich solche Extremwerte schon in der Vergangenheit immer mehr gehäuft haben – als Folge oder in Verbindung mit dem Klimawandel – und ob ihre Eintrittswahrscheinlichkeit in Zukunft möglicherweise noch weiter zunimmt. Und tatsächlich gibt es in Verbindung mit den relativ langfristigen Trends des Klimas viele Indizien für häufigere bzw. intensivere Extremereignisse.

Dabei ist jedoch die Pauschalaussage „Das Klima wird extremer“ nicht angebracht. Wie so oft, muss sorgfältig differenziert werden. Offensichtlich ist beispielsweise, dass hierzulande milde Winter und Hitzesommer häufiger werden, Strengwinter und kühle Sommer dagegen seltener. Der Niederschlag neigt vielerorts, aber nicht überall und nicht in allen Jahreszeiten, dazu, dass sowohl mehr Dürre als auch mehr Starkniederschläge auftreten.

Beim Wind ist die Situation besonders unübersichtlich: Tropische Wirbelstürme scheinen intensiver zu werden, Winterstürme in Europa schlagen aber möglicherweise nur nördlichere Zugbahnen ein, und häufigere Tornados sind derzeit möglicherweise nur durch verbesserte Beobachtungstechniken vorgetäuscht.

**Zur Zeit sind die sogenannten Kippelemente in aller Munde, also klimarelevante Prozesse, die nach Überschreiten einer für jeden einzelnen dieser Prozesse charakteristischen Temperaturschwelle selbstverstärkend und irreversibel fortschreiten. Was kippt als erstes, und steht danach das globale Klima als Ganzes auf der Kippe?**

Die sommerliche Meereisbedeckung der Arktis hat wahrscheinlich ihren Kippunkt schon erreicht. Tatsächlich könnte das Eis im Nordmeer schon in einigen Jahrzehnten während der Sommermonate völlig verschwunden sein. Allerdings wird der Meeresspiegel dadurch nicht beeinflusst, denn das Meereis steht im Schwimmgleichgewicht mit dem Ozean.

Als nächstes kommt möglicherweise das Grönland-Eis an die Reihe, dessen Abschmelzen dann aber den Meeresspiegel um 7 Meter ansteigen lassen würde und somit auch globale Bedeutung hätte. Allerdings liegen die Vermutungen über die Geschwindigkeit dieses Vorgangs zwischen 300 Jahren und etlichen Jahrtausenden.

Somit gibt es nicht nur Unsicherheiten bezüglich der charakteristischen Temperaturschwellen, sondern auch der Reaktionszeiten. Das Globalklima steht dabei nicht auf der Kippe, wenn man von globalen Auswirkungen wie dem Meeresspiegelanstieg oder Rückkopplungen wie der Verstärkung des Temperatureffektes durch Methan-Freisetzung bei auftauendem Dauerfrostboden absieht.

**Und was ist mit den Alpen? Warum schrumpfen dort die Gletscher so rapide?**

Es gibt viele Reaktionen auf den Klimawandel, die nicht alle als Kippelemente aufgefasst werden. Bei den Alpengletschern könnte man das aber durchaus tun, denn sie haben im Mittel seit 1850 ungefähr die Hälfte ihres Volumens verloren. Und dieser Schwund setzt sich offenbar dramatisch fort. Die Ursache ist zweifellos der seit dieser Zeit beobachtete langfristige Temperaturanstieg. Das ist jedoch nicht überall so, da Gletscher auch von der Niederschlagstätigkeit gesteuert werden. Dort, wo der Effekt zunehmender Winterniederschläge überwiegt, findet man teilweise Gletscher, die vorstoßen, zum Beispiel in Skandinavien.

**Wie vertrauenswürdig sind heute regionale Klimavorhersagen, beispielsweise solche für Deutschland?**

Wie gesagt, „Klimavorhersagen“ gibt es nicht, sondern nur bedingte, auf alternativen Szenarien beruhende Projektionen. Das gilt global genauso wie regional. Noch schlimmer: Kleinräumig-regionale Aussagen – insbesondere wenn sie über die Temperatur hinausgehen – sind quantitativ noch viel unsicherer als großräumige. Wir betrachten deshalb in diesem Buch vor allem die globale Mitteltemperatur.

Dennoch ist für Deutschland, trotz der zum Teil widersprüchlichen Ergebnisse der regionalen Klimamodellrechnungen, in den nächsten Jahrzehnten vermutlich Folgendes zu erwarten: Weiterer Temperaturanstieg in allen Jahreszeiten, somit auch häufiger milde Winter und Hitzesommer, Niederschlagszunahme im Winter und vermutlich auch in den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst;

Niederschlagsabnahme dagegen im Sommer, keine wesentlichen Veränderungen beim Wind. Vor noch genaueren, quantitativen Aussagen sollte man sich jedoch angesichts der Unsicherheiten hüten.

**Kommen wir zu den Gegenmaßnahmen. Derzeit macht die Formel „Mitigation and Adaptation“ Karriere, also Vermeidung all dessen, was den Klimawandel beschleunigt, und Anpassung an die Folgen des bereits Unvermeidlichen. Eine knappe Formel für ein Jahrhundertprogramm für die gesamte Menschheit. Welche Anpassungsmaßnahme erscheint Ihnen am dringlichsten?**

Weder bei „Mitigation“ noch bei „Adaptation“ gibt es einen dringlichsten oder gar einzigen Weg, sondern immer ein ganzes Bündel von Maßnahmen.

Da wir uns hierzulande an häufigere und wohl auch intensivere Hitzewellen im Sommer anpassen müssen, gehört zu den notwendigen Anpassungsmaßnahmen die konsequente Klimatisierung insbesondere von Kliniken, Kinder- und Altersheimen. Weiterhin ist verstärkter Hochwasserschutz wichtig, nicht nur durch Dämme, sondern auch durch Erhaltung und Renaturierung von Poldern und Auenwäldern.

Besonders schwierig wird es sein, sich auf die Ausbreitung von Erkrankungen einzustellen, die bisher mehr oder weniger auf südlichere Regionen beschränkt waren und immer weiter nach Norden vordringen. Beispiele dafür sind Tropenkrankheiten wie die Malaria und einige von Zecken übertragene Krankheiten.

**Was halten Sie vom sogenannten Geo-engineering, den „Geo-Techniken“, also beispielsweise davon, Dächer und Straßen weiß zu streichen, künstliche Wolken über den Ozeanen zu erzeugen oder Schwefel in die Stratosphäre einzubringen?**

Wenig. Zum einen muss man sehen, mit welchem Aufwand wie viel tatsächlich erreicht werden kann. Da sind sicherlich Warmwasserbereiter oder Solarzellen zur Stromerzeugung auf den Dächern viel sinnvoller als ein weißer Dachanstrich. Der wichtigste Punkt aber ist, dass mit jeder Geoengineering-Maßnahme auch Nebenwirkungen verbunden sind. So wird zum Beispiel der Schwefel leider nicht in der Stratosphäre verbleiben und könnte schon nach wenigen Jahren zu ökologischen, eventuell auch gesundheitlichen Schäden führen. An der klimasensitiven Wolken-schraube zu drehen ist besonders gefährlich, zumal Wolken nicht dort bleiben, wo sie erzeugt oder beeinflusst wurden. Viel besser ist es, das Übel an der Wurzel zu packen – also die Emissionsminderung der Treibhausgase energisch voranzutreiben.

**Noch immer gibt es so genannte Klimaskeptiker, die der Klimaforschung die Seriosität absprechen. Wer sind diese Zweifler und wie ernst muss man sie nehmen?**

Dazu eine Vorbemerkung: Skepsis ist an sich nicht negativ. Deshalb nennt sie einer meiner Kollegen ganz drastisch „Klimaleugner“, aber auch über diese Wortschöpfung kann man sich streiten. Jedenfalls sind fast alle „Klimaskeptiker“ fachfremd und argumentieren daher auch fachfremd. Häufig machen sie dabei so gravierende grundsätzliche Fehler, dass man sie zwar auf ihre Fehler hinweisen sollte, ansonsten aber nicht ernst nehmen muss.



Dort, wo ein gewisses Maß an Kenntnissen erkennbar ist, muss sorgfältig differenziert werden. So ist es beispielsweise unsinnig, Klimamodell-Rechnungen generell zu misstrauen. Dagegen ist es sehr sinnvoll, ihre Stärken und Schwächen im Detail zu diskutieren. Man muss einfach anerkennen, dass sie der einzige Weg zu einem besseren Verständnis der so überaus komplizierten Klimaprozesse sind. Und schließlich sollte niemand versuchen, sich angesichts der Brisanz des Klimaproblems aus der Verantwortung zu stehlen.

Erwähnenswert ist dabei eine interessante Erkenntnis von Naomi Oreskes, einer amerikanischen Professorin für Wissenschaftsgeschichte, die sie im Jahr 2004 in der angesehenen Zeitschrift „Science“ veröffentlicht hat. Sie hat aus der riesigen Anzahl von Fachveröffentlichungen zum Thema Klimawandel, die alle in begutachteten Fachzeitschriften erschienen waren, nach dem Zufallsprinzip 928 ausgewählt und wollte wissen, wie viele der Fachwissenschaftler den anthropogenen Klimawandel bezweifeln. Ergebnis: Kein einziger. Die gesamte Fachwelt steht damit in krassstem Gegensatz zu den „Klimaskeptikern“.

**Ganz im Gegensatz zu den „Klimaskeptikern“ fordern einige Ihrer Kollegen in zum Teil dramatischer Rhetorik energische Maßnahmen, um ein Desaster zu vermeiden. Halten Sie das eher für angebracht?**

Meines Erachtens ist Panikmache genauso wenig angebracht wie Verharmlosung, wobei ich behaupte, dass überzogene Vokabeln wie „Klimakatastrophe“ bei den Wissenschaftlern eher selten sind. Doch auch bei nüchtern-sachlicher Betrachtung ist die Situation zweifellos so ernst, dass gehandelt werden muss.

Konkret: Die bisherigen politischen Zielsetzungen wie das Kyoto-Protokoll greifen viel zu kurz und müssen baldmöglichst wesentlich verschärft werden – und dies nicht nur wegen des Ausmaßes der menschlichen Eingriffe in das Klimageschehen, sondern auch der erheblichen Zeitverzögerung, mit der das Klimasystem reagiert.

Quintessenz: Wir müssen uns nicht nur mit effektiven Maßnahmen der Klima-Herausforderung stellen, wir haben auch nicht mehr viel Zeit dazu.

# LITERATUR

1. Ch.-D. Schönwiese  
**Klimatologie**  
Ulmer 2008, Uni-Lehrbuch, 472 Seiten
2. Ch. Buchal  
**Energie**  
Werkbuch für Schüler und Erwachsene  
WE Heraeus-Stiftung u.a. 2008, 162 Seiten  
(Bestellungen über MIC Köln, siehe Seite 2)
3. W. Roedel  
**Physik unserer Umwelt –  
Die Atmosphäre**  
Springer 2000, Uni-Lehrbuch, 498 Seiten
4. W. Endlicher, F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.)  
**Der Klimawandel**  
Deutsche Gesellschaft für Geographie  
u.a., 2007  
13 Beiträge, 134 Seiten, im internet  
verfügbar unter [http://edoc.hu-berlin.de/  
miscellanies/klimawandel/](http://edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel/)
5. U. Cubasch, D. Kasang  
**Anthropogener Klimawandel**  
Klett-Perthes 2000, (Schul-) Lehrbuch,  
128 Seiten
6. S. Rahmstorf, H.J. Schellnhuber  
**Der Klimawandel**  
Beck 2007, Taschenbuch,  
sehr verständlich, 144 Seiten
7. G. Walker, D. King  
**Ganz Heiss – Herausforderungen  
des Klimawandels**  
Berlin Verlag 2008, sehr verständlich,  
320 Seiten
8. S. Joussaume  
**Klima**  
Springer 1996, sehr anschauliche  
Einführung, 142 Seiten
9. K.- H. Ludwig  
**Eine kurze Geschichte des Klimas**  
Beck 2006, Taschenbuch,  
sehr verständlich, 216 Seiten
10. T.H. van Andel  
**New Views on an Old Planet**  
Cambridge 2007, engl. Uni-Lehrbuch,  
439 Seiten
11. D. Archer  
**Global Warming –  
Understanding the Forecast**  
Blackwell 2007, engl. Uni- Lehrbuch,  
194 Seiten
12. **Atmosphäre, Klima, Umwelt**  
Spektrum der Wissenschaft –  
Verständliche Forschung  
22 Beiträge, Spektrum d. Wiss. Verlag  
1990, 230 Seiten
13. H.Lesch, H. Zaun  
**Die kürzeste Geschichte allen Lebens**  
Piper 2008, sehr verständliche  
„Reportage“, 224 Seiten
14. G. Walker  
**Schneeball Erde**  
Berlin Verlag 2003, Taschenbuch,  
verständlich, breit erzählende wissen-  
schaftliche „Reportage“, 318 Seiten
15. M. Boetzkes, I. Schweitzer,  
J. Vespermann (Hrsg.)  
**EisZeit – Das Abenteuer der  
Naturbeherrschung**  
15 Beiträge, Thorbecke 1999,  
sehr verständlich, 283 Seiten
16. W. Behringer  
**Kulturgeschichte des Klimas  
von der Eiszeit bis zur  
globalen Erwärmung**  
Beck 2008, sehr verständlich,  
352 Seiten
17. H.-W. Sinn  
**Das grüne Paradoxon**  
Econ 2008, Umweltpolitik, verständlich,  
478 Seiten
18. M. Latif  
**Klimawandel und Klimadynamik**  
Ulmer 2009, Uni-Lehrbuch, 219 Seiten
19. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate  
Change, S. Solomon et al., eds.):  
**Climate Change 2007.  
The Physical Science Basis.**  
Cambridge University Press,  
Cambridge (2007), 996 pp.

Prof. Ch.-D. Schönwiese bietet auf seiner  
homepage zahlreiche Vorträge und Artikel an:  
<http://www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima>

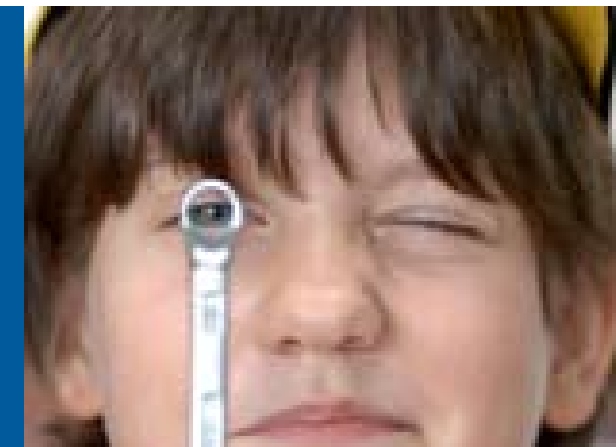
Ein erweitertes und kommentiertes  
Literaturverzeichnis findet sich unter  
[www.energie-in-der-schule.de](http://www.energie-in-der-schule.de)  
Viele themenbezogene Internet-Adressen  
finden sich auch in Ref. 1 und Ref. 4



## NETZWERK SCHÜLERLABORE IN DER HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT

Fast alle Helmholtz-Zentren bieten auch  
außerschulische Lernorte an, oft in Form von  
hochmodern ausgestatteten Schülerlaboren.

Weitere Informationen unter [www.helmholtz.de](http://www.helmholtz.de),  
durchklicken bis zum Netzwerk Schülerlabore.





# REGIONALE KLIMAÄNDERUNGEN

EIN FORSCHUNGSVERBUND DER  
HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT (HGF)



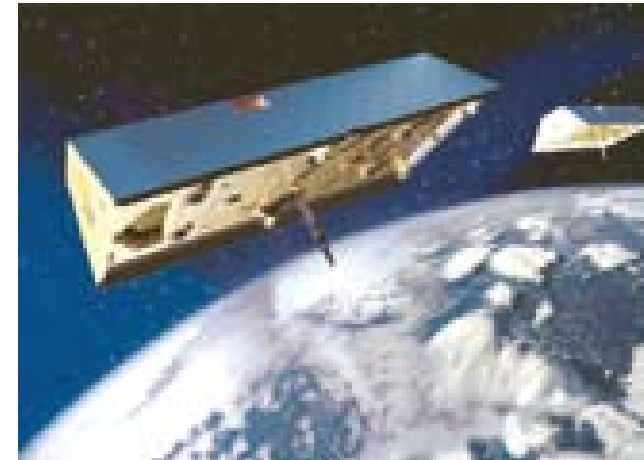
Klimaforschung ist eine weitgespannte und interdisziplinäre Aufgabe. Um die damit verbundenen großen Herausforderungen und die sehr unterschiedlichen Aufgaben optimal bearbeiten zu können, haben sich acht der in der Helmholtz-Gemeinschaft organisierten deutschen Großforschungszentren zu einem Klimaforschungsverbund zusammengeschlossen. Das Ziel des Verbundes ist die Auswertung der mit vielfältigen Methoden gewonnenen Daten, um dann mit Hilfe von optimierten Klimamodellen zu erwartende Entwicklungen zu erkennen und darauf aufbauend wichtige Entscheidungshilfen zu erarbeiten. Dabei geht es um die Anpassung (adaptation) an die Konsequenzen eines in gewissem Umfang wohl unvermeidlichen Temperaturanstiegs, aber natürlich auch um die Milderung (mitigation) des zu erwartenden Klimawandels.

Deshalb arbeiten in den Instituten der HGF zahlreiche Techniker, Ingenieure und Wissenschaftler der unterschiedlichsten Disziplinen gemeinsam an zahlreichen Experimenten zur Datenerfassung und an der theoretischen

Modellierung mit umfangreichen Computerprogrammen auf den leistungsfähigen Großrechnern der HGF. Die experimentellen Möglichkeiten der HGF sind besonders weit gespannt: Sonden an Ballonen und Flugzeugen untersuchen alle Schichten der Atmosphäre, Satelliten und Experimente in der Space Station ISS eröffnen sogar den Blick vom Weltraum aus. Das Forschungsschiff Polarstern ist auf allen Weltmeeren im Einsatz, und in der Antarktis wird auf der hochmodernen „Neumayer-Forschungsstation“ das ganze Jahr über bei Temperaturen oft unter  $-40\text{ °C}$  hart gearbeitet.

Auf diese Weise kann man die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Eis, Ozean und Landoberflächen sorgfältig erforschen und zunehmend klarer erkennen. Sie sind entscheidend, denn sie bestimmen die Details des Klimageschehens. Die globalen Klimamodelle haben uns in den vergangenen Jahren das Verständnis großräumiger natürlicher Klimaschwankungen ermöglicht und den menschlichen Einfluss auf das Klima gezeigt. Allerdings sind die konkreten Auswirkungen

Der europäische Satellit ENVISAT (gebaut von der ESA) umkreist seit Anfang 2002 die Erde in etwa 800 km Höhe. An Bord befinden sich verschiedene Instrumente zur Beobachtung der Erdoberfläche und der Atmosphäre, darunter das in Karlsruhe (KIT-IMK) entwickelte MIPAS-Gerät, welches Tag und Nacht die Ozonschicht und viele andere atmosphärische Spurengase misst ([www.ipe.fzk.de/projekt/mipas/welcome.html](http://www.ipe.fzk.de/projekt/mipas/welcome.html)). (Graphik: ESA)



Die beiden GRACE Satelliten beobachten das Schwerefeld der Erde seit 2002 mit so hoher Genauigkeit, dass selbst Schneebedeckung, Eisschmelze und Überschwemmungen (z.B. im Amazonasbecken) gemessen werden können (<http://op.gfz-potsdam.de/grace/>). (Graphik: Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

auf einzelne Regionen bisher nicht bekannt. Ob der Klimawandel beispielsweise dazu führen wird, dass die Sommer in verschiedenen Regionen Deutschlands trockener oder die Winter feuchter werden, muss noch offen bleiben, ist aber für die landwirtschaftliche Nutzung ganz entscheidend. Ebenso sind detaillierte regionale Szenarien zum Anstieg des Meeresspiegels eminent wichtig, um einen sicheren Küstenschutz zu ermöglichen.

Der Zeppelin NT ist mit seiner Nutzlast von 1000 kg besonders geeignet, um zahlreiche Messgeräte gleichzeitig aufzunehmen und in Höhen bis etwa 1000 m tragen. Dabei kann er Luftströmungen folgen oder stationäre Positionen einnehmen. In einer mehrtägigen Messfahrt über Süddeutschland konnte das regionale Höhenprofil der Hydroxyl-Radikale bestimmt werden. Die Hydroxyl-Radikale bauen zahlreiche atmosphärische Schadstoffe ab und wirken deshalb wie ein effektives Waschmittel für die Luft ([www.fz-juelich.de/projects/zeppelin/](http://www.fz-juelich.de/projects/zeppelin/)). (Forschungszentrum Jülich)



Mit dem neuen deutschen Forschungsflugzeug HALO (High Altitude and Long Range Observatory) werden für die Klimaforschung Messungen zur Dynamik und Chemie der Atmosphäre und zu Eigenschaften der Erde in Höhen bis 15.5 km und über Reichweiten bis 9000 km durchgeführt. HALO wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen (DLR) betrieben ([www.halo.dlr.de/](http://www.halo.dlr.de/)). (Foto: AeroArt)







Eine Forschergruppe untersucht eine Meereisscholle, an die der deutsche Forschungseisbrecher Polarstern im Winter 2006 in der Antarktis angelegt hat. Das Schiff hat eine Besatzung von max. 44 Personen und bietet zusätzlich Arbeitsmöglichkeiten für 50 Wissenschaftler und Techniker. Seit ihrer Indienstellung 1982 hat die Polarstern weit über dreißig Expeditionen in Arktis und Antarktis abgeschlossen. Sie wurde eigens für die Arbeit in den Polarmeeren konzipiert und ist gegenwärtig das leistungsfähigste Polarforschungsschiff der Welt (<http://www.awi.de/de/infrastruktur/schiffe/polarstern/>). (Foto: Peter Lemke)



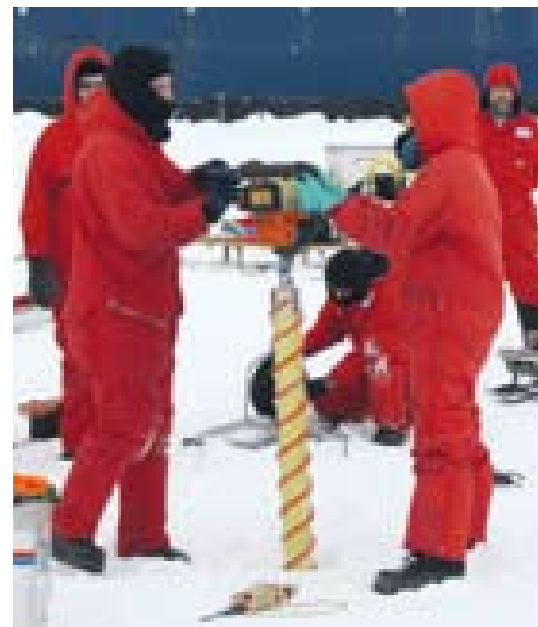
Als erste Forschungsstation in der Antarktis ist die Neumayer-Station III ein kombiniertes Gebäude für Forschung, Betrieb und Wohnen auf einer Plattform oberhalb der Schneeoberfläche, verbunden mit einer in den Schnee gebauten Garage. Mit Neumayer III werden insbesondere die Beobachtungen der beiden vorhergehenden, inzwischen im Schnee versunkenen und aufgegebenen Stationen fortgesetzt, mit denen seit 1982 wichtige Veränderungen der antarktischen Atmosphäre untersucht werden ([http://www.awi.de/de/infrastruktur/stationen/neumayer\\_station/](http://www.awi.de/de/infrastruktur/stationen/neumayer_station/)). (Foto: realnature.tv)

Unter der Leitung des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung (\*) arbeiten derzeit acht Forschungszentren gemeinsam an folgenden Fragestellungen:

- Wie hängt die Entwicklung unseres Klimas von der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre, Eis, Ozean und Landoberflächen ab und wie beeinflussen sich menschliche Einwirkungen und natürliche Klimaschwankungen?
- Wie groß sind die Verluste der kontinentalen Eismassen (insbesondere von Grönland) und wie reagiert der Meeresspiegel auf Schmelzwasser und Erwärmung?
- Wodurch werden die großen Änderungen im Meereis und in den Permafrost-Regionen der Arktis hervorgerufen und mit welchen Nah- und Fernwirkungen sind sie verbunden?

- Mit welchen Konsequenzen aus dem Klimawandel müssen Ökosysteme, Wasserressourcen oder Land- und Forstwirtschaft in Deutschland und im Alpenraum rechnen?
- Wie wird das regionale Klima durch Änderungen der Luftbestandteile beeinflusst?
- Wie werden sich Extremereignisse wie Stürme, Hochwasser und Dürren mit dem Klimawandel ändern?
- Wie können wir einen optimalen Weg der Milderung und Anpassung wählen?

\*) Projektleitung: Prof. Dr. Peter Lemke, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI), Tel.: 0471/4831-1751; E-Mail: Peter.Lemke@awi.de.



Wissenschaftler bohren einen Eiskern aus einer Meereisscholle, um physikalische Eigenschaften und das Vorkommen von Pflanzen und Tieren, z.B. von Algen und Ruderfußkrebse und ihre Überwinterungsstrategien zu untersuchen. Meereisschollen in der Antarktis sind im Winter typischerweise 1-2m dick und haben einen Durchmesser von bis zu mehreren Kilometern. (Foto: Peter Lemke)

Die Projektpartner des AWI sind:

- DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Köln,
- FZJ – Forschungszentrum Jülich,
- GFZ – Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum,
- GKSS – Forschungszentrum Geesthacht,
- HMGU – Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt,
- KIT – Karlsruher Institut für Technologie (Institut für Meteorologie und Klimaforschung),
- UFZ – Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig.

Für junge Menschen, die ihre berufliche Zukunft planen, bieten die verschiedenen

Forschungszentren der HGF ein besonders breites Spektrum von spannenden Herausforderungen und Möglichkeiten:

- Praktikumsplätze
- Ausbildung in handwerklichen Berufen
- Technische und ingenieurwissenschaftliche Aufgaben
- Bachelor- und Masterarbeiten oder Promotionen in den Naturwissenschaften, wie Physik, Chemie, Biologie, Medizin, Informatik, Mathematik u.v.a.

Unter [www.helmholtz.de](http://www.helmholtz.de) kann sich jeder leicht einen Überblick verschaffen, um sich danach über die einzelnen Zentren zu informieren. Dort findet man die Ansprechpartner, mit denen ein Kontakt oder Besuch vereinbart werden kann.

Im Observatorien-Netzwerk TERENO werden in mehreren Regionen Deutschlands Interaktionen von Wasser, Treibhausgasen und Energie zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre untersucht. Im Bild ist der 50 m hohe mikrometeorologische Turm im Höglwald bei Augsburg zu sehen. Dort betreibt das KIT (Institut für Atmosphärische Umweltforschung, IMK-IFU) unter anderem seit 1993 Messungen von Lachgas-Emissionen ( $N_2O$ ). Das  $N_2O$  ist ein extrem starkes Treibhausgas (S. 78), das von Bodenbakterien produziert wird. Diese Arbeiten haben zur Entwicklung eines  $N_2O$ -Emissionsmodelles geführt, das inzwischen global eingesetzt wird (<http://www.tereno.net/>). (Foto: IMK-IFU)



Gollub

Gollub

# INDEX

## A

A1F1-Szenario 140–143  
A1B-Szenario 142–143  
A2-Szenario 142–143  
Abstrahlung, Modellplanet 70–71  
– *siehe auch* Strahlung ...  
Adaptation 16, 146, 190  
Aerosol 123, 131, 190  
Agassiz, Louis 106  
Albedo 70–71, 77  
Albedo-Reflexion, durch Eis 90, 111, 144  
Alpen, Reaktion auf Klimawandel 137, 189  
Alpengletscher, Abschmelzen 137, 144, 189  
Antarktis  
– Eisschilde 117  
– in Erdgeschichte 99, 101  
– anthropogene Emissionen 18, 78, 186  
– in Vergangenheit 129–131  
– Kohlenstoffinventar der Erde 114–115, 162–163  
– zukünftige 138–145  
anthropogener Temperaturanstieg 130, 131, 138–143, 186  
Antizyklone (Hochdruckgebiet) 54, 57, 62  
Äquatorregion, Entstehung von Tiefs 53–54  
Arrhenius, Svante 28  
Artenreichtum, und Biokatastrophen 100  
Atmosphäre  
– Belastung durch Bevölkerungswachstum 18, 143  
– CO<sub>2</sub>-Gehalt 44, 78, 79, 100, 143, 157, 163  
– „dritte“ 89  
– Energiebilanz *siehe* Treibhauseffekt, 17, 67–79  
– Energieströme 76  
– Gasaustausch mit Ozean 157–161, 185  
– Grundaussagen zur Physik der 40–65  
– Homogene 42–44  
– Masse der 44  
– mittlere globale Temperatur 77, 128, 184  
– Physik der 31–65  
– Schutz der 16, 166, 168–169  
– Temperatursgleich 68–69  
– Triebkräfte der 28–29  
– und Leben 86  
– vertikale Gliederung 47  
– „zweite“ 88  
– *siehe auch* Klima; Luft; Treibhauseffekt  
atmosphärische Triebkräfte, des Klimas 28–29

## B

B1-Szenario 142–143  
barometrische Höhenformel 45  
Berichte des IPCC 146–147  
Bevölkerungswachstum, Belastung der Atmosphäre 18, 143  
Biokatastrophen, in Erdgeschichte 94–97, 100  
Biosprit, Szenario 175

## C

C, chemisches Grundwissen 154  
CaCO<sub>3</sub> 154  
– im Meerwasser 160–161  
– *siehe auch* Kalkstein  
CCS (Carbon Capture and Storage) 153–154  
– Szenario 173–174  
CCSM3, Klimamodell 141  
CGCM3.1, Klimamodell 141  
CH<sub>2</sub>O ..., chemisches Grundwissen 155  
CH<sub>4</sub>  
– als Spurengas 78  
– chemisches Grundwissen 155  
CO<sub>2</sub>  
– als Spurengas 78  
– als wichtiger Parameter für Klimamodelle 140  
– auf Mars 85–86  
– auf Venus 85–86  
– Bildung in Photosynthese 90, 152  
– chemisches Grundwissen 154  
– Einsparungen 180–181  
– Emissionen 159–160, 163, 170–182  
– Entfernung aus Luft 152;  
*siehe auch* Kohlenstoffkreislauf  
– gebundenes 114–115  
– im anorganisch-geologischen Kohlenstoffkreislauf 92–93  
– in „dritter“ Atmosphäre 89  
– in „zweiter“ Atmosphäre 88  
– in Atmosphäre 44  
– in Atmosphäre (historisch) 79, 100, 163  
– in den Ozeanen 157–159  
– Ionengleichgewicht im Meerwasser 160–161  
– Umrechnungen der Mengen 115  
– Verknappung in Erdgeschichte 90  
CO<sub>2</sub> ... *siehe auch* Kohlenstoff  
Corioliskraft, und Windrichtung 55–60  
CSIRO-MK3.0, Klimamodell 141  
CSP (Concentrating Solar Power), Szenario 173, 175  
Cyanobakterien 89, 118

## D

Dampfdruck 53  
Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (D/O) 105, 112–113, 133  
Deutschland  
– Klimaprojektionen 189  
– Temperaturtrends 125  
– Verlässlichkeit von Klimavorhersagen 189  
– Wettertrends 126–127  
Devon, Klimaänderungen 104  
Dichte 43  
– von Luft *siehe* Luftdichte  
– von Wasser *siehe* Wasserdichte  
„dritte“ Atmosphäre 89  
Druck 43  
– von Luft *siehe* Luftdruck  
– von Wasser *siehe* Wasserdruck  
Druckgradient 57  
Druckkraft, und Windbewegung 56–57  
Dryas-Kälterückschlag 105, 112–113  
Dürre 124, 196  
dynamisches Tief (Zyklone) 54, 62

## E

ECHAM5/OM, Klimamodell 141  
e-Funktion 44–45  
Eis  
– als Klimaarchiv 109–110  
– Verdampfung 51  
Eis-Albedo-Reflexion 90, 111, 144  
Eisbedeckung, Nordpolarmeer 144  
Eisberge, Bildung 117  
Eisbohrungen 110, 196  
Eisschilde 116–117  
Eiszeitalter, Klimaänderungen 100, 104  
Eiszeiten  
– in jüngerer Erdgeschichte 111–113  
– kleine 134–137  
– Thesen von 106  
„Eiszeitpuzzle“ 111  
elektrische Energie  
– Probleme der Speicherung 168  
– wirtschaftliche Bedeutung 166  
Elektroantrieb, Szenario 174  
El Niño 131–133  
ENVISAT 195  
Emissionsrechte 180–181  
Emissionen  
– anthropogene *siehe* anthropogene Emissionen  
– von Treibhausgasen 78  
– *siehe auch* CO<sub>2</sub>

Emissionsszenarien 170–182  
Energiebedarf 164–167  
– der Menschheit 164–169  
Energiebilanz *siehe auch* Strahlungsbilanz  
– Atmosphäre *siehe* Treibhauseffekt  
Energieeinsparungen, Szenario 178–179  
Energieströme, in Atmosphäre 76  
Energieträger, fossile 162–163  
Energieversorgung  
– magisches Quadrat 169  
– zukünftige 170–182  
Eozän, Klimaänderungen 104  
Erdbahn, und Vereisungen 107–108  
Erdboden  
– Erwärmung durch Sonne 42  
– Wechselwirkung mit Luft 42  
Erde  
– als dynamischer Planet 12–19  
– Aufbau 83  
– Entstehung 82–83  
– Erwärmung der Oberfläche 72–74  
– Klimazonen 64–65  
– Kohlenstoffvorrat 114–115, 162–163  
– Temperatur im Inneren 83  
Erdgas *siehe* CH<sub>4</sub>  
– Kohlenstoffumsatz 162–163  
– wirtschaftliche Bedeutung 166  
Erdgeschichte 82–106  
– Zeitskala anschaulich 118–119  
Erdöl  
– Kohlenstoffumsatz 162–163  
– wirtschaftliche Bedeutung 166  
Erdrotation, und Windbewegung 55–57  
Erdumlauf um Sonne, und Jahreszeiten 32–33  
Erdzeitalter, Klimaänderungen 100, 104–105  
Erwärmung  
– Erdoberfläche 72  
– und Klimawandel 27  
Erwärmungsgürtel, globale 128  
Europa, Klima 36  
EU-Zertifikate, Umweltschutz 180–181  
Exponentialfunktion 44–45  
Extinktion 96, 100  
Extremwetterlagen 126, 196  
Exzentrizität, Erdbahn 107

## F

Faulgas *siehe* CH<sub>4</sub>  
FCCC (Framework Convention on Climate Change) 168–169  
FCKW-Verbindungen 166  
Festlandgletscher 116–117  
fließende Mittelwerte, Klimadatenauswertung 123  
Flutkatastrophen 14, 61, 128

fossile Energieträger  
– Auswirkung ihrer Nutzung auf Klima 143  
– Kohlenstoffumsatz 162–163

## G

Gasaustausch, Atmosphäre-Ozean 157–159, 185  
Gase  
– Komprimierung 44  
– *siehe auch* Luft  
Gasgesetz, allgemeines 43  
Gaskraftwerke, Szenario 173, 177  
GCM (General Circulation Model), *siehe* unter Klimamodelle, 141  
Gebäude, Szenario zur Beheizung 172  
Gebirge  
– Entstehung 101–102  
– und Luftmassenbewegung 61  
– unterseeische 36, 92  
Gedankenatmosphäre 42–44  
Gefrieren 51  
Geo-Engineering 190  
Geophysica, Spezialflugzeug 139  
geotripter Wind 57  
GFDL-CM2.1, Klimamodell 141  
Gigatonne, Umrechnung 115  
GISS-ER, Klimamodell 141  
Gitternetze, in Klimamodellen 140  
Glasscheibe, Modell für Strahlungsabsorption 72–76  
Gleichgewichte  
– flüssig-gasförmig 49  
– Ionen im Meerwasser 160  
– Kohlenstoff 114, 157  
– Strahlung 71–73, 79  
Gletscher  
– Abschmelzen 144  
– Bildung und Verhalten 106, 116–117  
– Reaktion auf Klimawandel 189  
globale Temperatur  
– in Erdgeschichte 100  
– mittlere *siehe* mittlere globale Temperatur  
Golfstrom  
– Bedeutung für Klima 36, 39  
– Entstehung 102  
GRACE 195  
Grönland, Abschmelzen der Gletscher 144

## H

H<sub>2</sub>, als Energieträger 173  
H<sub>2</sub>O, als Spurengas 78  
HÄLO 194  
Hadley Centre, UK, Klimamodell 141  
Helmholtz-Gemeinschaft 193–197  
Himalaya, Entstehung 101

Hitzesommer 2003 126  
Hoch, Windrichtung 57  
Hochdruckgebiet (Antizyklone), Entstehung 53–54  
Hochdrucklage 62  
Höhenwetterdaten, Ermittlung 24  
Holozän, Klimaänderungen 105, 113  
Homogene Atmosphäre 42–44  
Hurrikan, Entstehung 59  
Hydrogencarbonat, im Meerwasser 160–161

## I

ICAO Standard Atmosphäre 48  
Indien, Kontinentalverschiebung 101  
Infrarotstrahlung, Absorption 72  
INM-CM3.0, Klimamodell 141  
International Civil Aviation Organization (ICAO) 48  
IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)  
– Leitszenarien 142–143  
– Modellrechnungen 129  
– Übersicht über Berichte 146–147  
IPSL-CM4, Klimamodell 141  
Isobaren 57  
Isotopenanalyse 109–110  
ITCZ, ITK 54

## J

Jahreszeiten, Erdumlauf um Sonne 32–33  
Jetstreams 48, 64  
Jura, Klimaänderungen 104

## K

Kalben von Gletschern 117  
Kalkstein  
– Bildung auf Erde 88, 92  
– *siehe auch* CaCO<sub>3</sub>  
Kaltfront 63  
Kaltzeiten, Klimaänderungen 105  
Kambriische Explosion 94  
Kambrium, Klimaänderungen 104  
Känozoikum, Klimaänderungen 104  
Karbon  
– Klimaänderungen 104  
– Kohleentstehung 103  
Karbonatbildung  
– in Erdgeschichte 88, 92  
– *siehe auch* CaCO<sub>3</sub>  
Kernenergie, Szenario 174, 176  
Kippelemente 189  
– im Klimasystem 144  
Klima  
– als Statistik des Wetters 25–27  
– Assoziationen zum Wort 22



- Chance für Stabilisierung 157
- Geschichte 81–119
- grafische Darstellung 27
- lokales 23
- regionales 131, 194
- Rolle des Kohlenstoffs 150–163
- und atmosphärische Triebkräfte 28–29
- und Energie 164–169
- und Leben 86
- und Wetter 21–29
- Unterschied zum Wetter 26
- wissenschaftliche Definition 22–24
- *siehe auch* Atmosphäre
- Klimaänderungen, über Erdzeitalter 104
- Klimaarchiv, im Eis 109–110
- Klimadaten
  - jüngere 122–127
  - Statistik der 185
  - Verständnis der 128–137
  - *siehe auch* Wetterdaten
- Klimadiagramme 25
- Klimafaktoren 29
- „Klimakatastrophe“ 191
- Klimakonferenzen 168–169
- Klimamodelle 138–147, 185–188
  - als Grundlage von Vorhersagen 138, 142
  - Berechnungen des IPCC 130, 142
  - CO<sub>2</sub> als wichtiger Parameter 140–143
  - des IPCC 141–147
  - Hintergrund 185
  - konkurrierende 186
  - mit Gitternetzen 140
  - physikalische 28–29
  - Prüfung anhand von Daten der Vergangenheit 129–132
  - statistische 26
  - Weiterentwicklung 187
  - zur Erklärung des globalen Temperaturanstiegs 129–134
  - *siehe auch* Modelle
- Klimaprojektionen 138–147, 185–189
  - Abgrenzung von Vorhersagen 19
  - aus Szenarien und Modellrechnungen 138, 141–142, 147
  - bedingte 185
  - bei intensiver Nutzung fossiler Energieträger 143
  - Folgen der Erwärmung 52
  - für Deutschland 189
  - ökonomische Folgerungen 181
  - Unsicherheiten 143, 186
  - „Klimarauschen“ 123
- Klimaschutz, allgemeine Betrachtung 16

- Klimaschwankungen
  - am Beispiel von El Niño 132–133
  - in jüngerer Erdgeschichte 111–113
  - in naher Vergangenheit 134–137
- Klimaskeptiker 190
- Klimasystem, Kippelemente 144
- Klimawandel
  - durch Erwärmung 27
  - „gefühlter“ 23
  - Panikmache 191
  - Verlagerung der Tiefdruckgebiete 64, 188
- Klimawechsel, jahreszeitlicher 32–33
- Klimazonen 64–65
- Kohle
  - Entstehung 94, 103
  - Kohlenstoffumsatz 162–163
  - wirtschaftliche Bedeutung 165–166
- Kohlekraftwerke, Szenario 173, 176
- Kohlensäure, Pufferung 161
- Kohlenstoff
  - chemisches Grundwissen 154–155
  - Photosynthese 152
  - Rolle in Natur und Technik 150–163
  - und organische Chemie 152
  - *siehe auch* CO<sub>2</sub> ...
- Kohlenstoffbilanz, gegenwärtige 162–163
- Kohlenstoffdioxid *siehe* CO<sub>2</sub>
- Kohlenstoffhydrate, chemisches Grundwissen 155
- Kohlenstoffkreislauf
  - anorganisch-geologischer 88, 92–93
  - Eingriff durch Technik 153
  - natürlicher 152–153
  - Rolle der Ozeane 156–161
- Kohlenstoffvorrat, Erde 114–115, 162–163
- Kohlenwasserstoffe, chemisches Grundwissen 155
- Kondensation 51, 59, 61
- Kontinentalplatten 36, 98–99
  - *siehe auch* Plattentektonik
- Kontinentalverschiebung
  - in Erdgeschichte 99, 101–102
  - Theorie der 98
  - und Vereisungen 108
- Kreidezeit, Klimaänderungen 104
- Kreislauf, des Kohlenstoffs *siehe* Kohlenstoffkreislauf
- Kyoto-Protokoll 168–169

**L**

- Lachgas *siehe* N<sub>2</sub>O
- Landfläche, Anteil an Erdoberfläche 34–35, 98

- latente Wärme 50, 59
- Leben
  - Beginn 89
  - Kambrische Explosion 94
  - notwendige Voraussetzungen 86
- Lee 61
- Lemke, Peter 196
- Luft
  - Thermodynamik 43, 46
  - Wechselwirkung mit Erdboden 42
  - *siehe auch* Atmosphäre
- Luftdichte 43
  - Abhängigkeit von Höhe 44
- Luftdruck 43
  - Abhängigkeit von Höhe 42, 44–45, 48
- Luftdruckgradient, als „Wettermacher“ 62–64
- Luftmasse 46
- Lufttemperatur
  - Abhängigkeit von Höhe 43–44, 46, 48
  - und Klima 27
- Luv 61

**M**

- Marktwirtschaft, und Umweltschutz 179–182
- Mars, Klima 85
- Massensterben, von Tierarten 94–96, 100
- Meere
  - Verteilung, Aufbau, Eigenschaften 34–39
  - *siehe auch* Ozeane
- Meeresboden, und Plattentektonik 36, 87
- Meeresspiegel
  - Anstieg 117, 128, 142, 144, 147, 189
  - in Erdgeschichte 100
- Meeresströmungen 35–36
  - und Kontinentalverschiebung 102
  - Verteilung auf Erde 38–39
- Meerestemperatur, Auswirkung auf Niederschlagsmenge 52
- Meerwasser, Ionengleichgewicht 160
- Menschheit
  - Energiebedarf 164–169
  - Fortschritte 164
- Menschheitsgeschichte, Übersicht 95, 119
- Merkur, Klima 84
- Mesoklima 23
- Mesozoikum, Klimaänderungen 104
- Meteor-Einschlag, Auswirkung auf Klima 96–97
- Methan *siehe* CH<sub>4</sub>
  - chemisches Grundwissen 155
- Methanhydrat 155
- Mikroklima 23
- Milankovitch (Erdbahn) 107–108

- Milankovitch-Zyklen 111
- Miozän, Klimaänderungen 104
- MIROC3.2, Klimamodell 141
- Mitigation 16, 146, 190
- Mitteleuropa, Klimaschwankungen 134–137
- Mittelwerte, fließende 123
- mittlere globale Temperatur
  - Analyse 128–132
  - der Atmosphäre 184
  - IPCC-Leitszenarien 142
- mittlere Temperatur, Mitteleuropa 134
- Modelle
  - Energiebilanz der Erde 70–74, 77
  - für Strahlungsabsorption 72–76
  - Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean 159, 185
  - Treibhauseffekt 70–76
  - Zirkulationszelle 46
  - *siehe auch* Klimamodelle
- Modellierung, zentrale Herausforderung 129
- Modellplanet, Abstrahlung 70–71
- Mond, als Modellplanet ohne Lufthülle 70–71
- Montreal-Protokoll 48, 166

**N**

- N<sub>2</sub>O, als Spurengas 78, 197
- Naturkatastrophen 13–15, 96
- Naturschutz 15–16
- Neogen, Klimaänderungen 104–105
- Neptun, Klima 84
- Neumayer-Station 197
- Neuronales-Netz-Modell 131
- Niederschläge 186
  - Bildung 61
  - im Winter 125
- Niederschlagsmenge, bei Anstieg der Meerestemperatur 52
- Nordatlantik-Oszillation (NAO) 112, 133
- Nordatlantikstrom, Einfluss auf Klima in Europa 36
- Nordhalbkugel, Eisschilde 116–117
- Nordpolarmeer, Eisbedeckung 144

**O**

- O<sub>2</sub>, Bildung auf Erde 89–90
- O<sub>3</sub>
  - als Spurengas 78
  - Bedeutung für Atmosphäre 48
  - Bildung auf Erde 89
- Obliquität (Schiefe), Erdbahn 107
- Oligozän, Klimaänderungen 104
- Ordovizium, Klimaänderungen 104

- Ozeane
  - Anstieg der Oberflächentemperatur 79
  - Erwärmung durch Sonne 42
  - Gasaustausch mit Atmosphäre 157–159, 185
  - gelöstes CO<sub>2</sub> 114–115
  - Rolle im Kohlenstoffkreislauf 156–161
  - Wasserdichte 35–37
  - Wassertemperatur 34–36, 79, 100, 102
  - Wasserverdunstung 49
  - *siehe auch* Meere
- Ozon *siehe* O<sub>3</sub>

**P**

- Paläogen, Klimaänderungen 104
- Paläozen, Klimaänderungen 104
- Paläozoikum, Klimaänderungen 104
- Pangäa (Ganzerde), Superkontinent 98–99
- Partialdruck 53
- Passatwinde 54, 65
- Perm, Klimaänderungen 104
- Permafrost-Regionen, Auftauen 144, 155
- Pflugtechnik, Szenario 175
- Phasen, des Wassers 51
- Photosynthese
  - chemisches Grundwissen 90, 155
  - Ersterben 90–91
  - Formel 90
  - Kohlenstoffchemie 152
  - und „dritte“ Atmosphäre 89
- Photovoltaik *siehe* PV
- Physik der Atmosphäre 31–65
- Pilozän, Klimaänderungen 104–105
- Planeten, Entstehung 82–85
- Platten, tektonische 36
- Plattentektonik
  - Theorie der 98
  - und Meeresböden 36, 87
- Pleistozän, Klimaänderungen 104–105
- Polarfront 63
- Polarstern (Schiff) 196
- Präzession, Erdachse 107
- Primärenergiebedarf 164–167
- Projektionen *siehe* Klimaprojektionen
- Pufferungskurve, Kohlensäure 161
- PV (Photovoltaik), Szenario 173–174, 177

**R**

- REKLIM-Verbund 194–197

**S**

- Salzgehalt, Meerwasser 35–37
- Sand, Bildung auf Erde 88
- Sauerstoff *siehe* O<sub>2</sub>
- saurer Regen, in „zweiter“ Atmosphäre 88

- Saurier
  - Aussterben 96–97
  - Zeitalter der 95
- Schiefe (Obliquität), Erdbahn 107
- Schülerlabore 193
- Schutzmaßnahmen, für Mensch und Natur 15–16
- schwarzer Strahler 70
- Schwefel in der Stratosphäre 190
- Silur, Klimaänderungen 104
- „Snowball Earth“ 90–91, 119
- Sommerniederschlag 124
- Sonne
  - als Triebkraft des „Wettermotors“ 32–33
  - Erwärmung der Ozeane 42
  - Erwärmung des Erdbodens 42
- Sonneneinstrahlung
  - mittlere 70–71
  - Schwankungen 134–135
- Sonnenfleckenaktivität, schwankende 134
- Sonnenstrahlung, Absorption und Reflexion 72, 76
- Sonnensystem, Entstehung 82–85
- Special Report on Emission Scenarios (SRES), IPCC 144, 146–147
- Spurengase
  - Treibhauseffekt 78
  - Vermessung 139
- Standardatmosphäre *siehe* ICAO Standard Atmosphere
- Standardatmosphärendruck 43
- Statistik
  - allgemein 25–26, 188
  - von Wetter- und Klimadaten 24–27, 188
- Stern-Report 181–182
- Stickstoffdioxid *siehe* N<sub>2</sub>O
- Strahlungsabsorption, Modell 72
- Strahlungsbilanz
  - globale 73–74, 79
  - *siehe auch* Energiebilanz
- Stratosphäre 47–48, 123, 139, 190
- Strom *siehe* elektrische Energie
- Sturmfluten, historische 14, 136
- Sublimation 51
- Sumpfgas *siehe* CH<sub>4</sub>
- Superkontinent Pangäa 98–99
- Super-Treibhaus, im Trias 94
- Szenarien 138–147, 186
  - des IPCC 143–147
  - zu Emissionen 170–182

## T

- Tambora, Vulkanausbruch 123
- tektonische Platten 36, 87, 98
- Temperatur
  - Erdinneres 83
  - Erdoberfläche 74
  - mittlere globale 128–132, 184
  - Mond 71
  - Ozeane 34–36, 79, 100–102
  - *siehe auch* Lufttemperatur
- Temperaturänderungen, Vergleich von gemessenen Werten mit Modellwerten 130–131
- Temperatursgleich, in Atmosphäre 68–69
- Temperaturtrends
  - für Deutschland 125
  - globale 128, 142
- TERENO 197
- Tertiär, Klimaänderungen 104–105
- thermisches Tiefdruckgebiet, Entstehung 53–54
- Thermodynamik, der Luft 43, 46
- tibetatisches Plateau, Entstehung 101
- Tief
  - dynamisches 54, 62
  - thermisches 54
  - Windrichtung 56
- Tiefdruckgebiet (Zyklone)
  - ausgebildete 58
  - Entstehung 53–54
  - und Klimawandel 64
- Tierarten, Massensterben 94–96
- Tornado, Entstehung 60
- Treibhauseffekt 67–79
  - auf Mars 85–86
  - auf Venus 85–86
  - Energiebilanz (genaue Werte) 77–79
  - Energiebilanz (Modellbetrachtung) 70–74
  - im anorganisch-geologischen Kohlenstoffkreislauf 93
  - im Trias 94
  - in „zweiter“ Atmosphäre 88
  - Modellvorstellungen 70–76
  - „Snowball Earth“ 91
  - Spurengase 78
  - Temperaturausgleich in Atmosphäre 68–69
  - und Leben 86
- Trias
  - Klimaänderungen 104
  - Super-Treibhaus 94
  - Verteilung der Kontinente 98–100

## Triebkräfte

- allgemein 26
- der Atmosphäre 28–29
- des Klimas 28–29
- des Wetters 57
- Tropengewitter, Vermessung 139
- Tropopause 47
- Troposphäre 47–48
- Tundra, Auftauen der Permafrost-Regionen 144
- Turbulenzen, Entstehung 59
- Tyndall, John 28

## U

- Überschwemmung 14–16, 61, 124
- UKMO-HadGEM1, Klimamodell 141
- Umweltschutz, effektiver 179–182
- Unfallstatistik 25–26
- unterseeische Gebirge 36

## V

- Venus, Klima 84–85
- Verdampfungswärme 51
- Verdunklung, nach Meteoreinschlag 96–97
- Verdunstung, Wasser aus Ozeanen 49–50, 52
- Vereisungen
  - in Erdgeschichte 90–91
  - in jüngerer Erdgeschichte 111–113
  - Thesen von 106
  - und Erdbahnschwankungen 107–108
  - und Kontinentalverschiebung 108
- Verkehr, Szenario 172
- Verkohlung, chemisches Grundwissen 155
- Verschmutzungsrechte 180–181
- Vorhersagen *siehe* Klimaprojektionen
- Vulkanausbrüche, Auswirkung auf Klima 123, 130–131
- Vulkanismus, in Erdgeschichte 91

## W

- Wald, Szenario 175
- Wärme
  - als Triebkraft des „Wettermotors“ 32–33
  - als Triebkraft des Klimas 39
  - fühlbare 50
  - latente 50
  - *siehe auch* Sonne
- Wärmestrahlung, Absorption 72, 76
- Warmfront 63
- Wasser
  - als Spurengas 78
  - Bildung auf Erde 87
  - Phasen 51

- und Leben 86
- Verdunstung 49–50
- Zustände 50–51
- Wasserdampf 49–53
  - als Energiespeicher 50–51, 59
  - Partialdruck 52–53
- Wasserdichte 35–37, 43
  - Ozeane 35–37
- Wasserdruck 34, 43
- Wasserfläche, Anteil an Erdoberfläche 34–35, 98
- Wasserstoff, als Energieträger 173
- Wassertemperatur, Ozeane 34–36, 100–102
- Wegener, Alfred 98
- Weltbevölkerung 18, 143
- Welt-Klima-Rat *siehe* IPCC
- Weltsozialprodukt (WSP) 182
- Weltwirtschaftsentwicklung, und CO<sub>2</sub>-Emissionen 170
- West-Wind-Zone 62–65
- Wetter
  - extremes 51, 126
  - Triebkräfte 32–33, 57
  - und Klima 21–29
  - Unterschied zum Klima 26
  - West-Wind-Wetter 62–64
- Wetteraufzeichnung, historische 122–124
- Wetterdaten, Ermittlung 24
- Wettersphäre *siehe* Troposphäre
- Wettervorhersage 24
- Wind 186, 188
  - Entstehung 55–57
  - geostrophisch 57
  - geotriptischer 57
  - Verhalten 53
  - West-Wind-Wetter 62–64
- Windenergie, Szenario 174, 176
- Winterniederschläge, Veränderung 126, 127
- Wirbelbildung, Westwinddrift 62
- Wirbelstürme, Entstehung 57–59
- Wohlstand, und Energiebedarf 164–167

## Z

- Zeitskala, veranschaulicht 118–119
- Zeppelin NT 195
- Zirkulationszelle, atmosphärische 46, 54, 65
- „zweite“ Atmosphäre 88
- Zyklon, der (= tropischer Wirbelsturm) 57
- Zyklone, die (= Tiefdruckgebiet) 62



## Jeder Einzelne ...

kann durch den vorsichtigen und verantwortungsbewussten Umgang mit allen Schätzen der Erde, mit Land, Wasser und Luft, mit der Natur und den Rohstoffen und insbesondere auch durch den sparsamen Einsatz von Energie (Strom, Brennstoffen) seinen persönlichen Beitrag zum Schutz der Umwelt und der Atmosphäre leisten. Dazu zählen auch energiesparende Investitionen, vor allem beim Hausbau, bei Geräten und bei verbrauchsarmen Fahrzeugen.

## Darüber hinaus ...

kann eine kluge Berufswahl noch wesentlich weitergehende Möglichkeiten eröffnen, denn die Zukunft unserer Energieversorgung und damit auch die Bewahrung einer unbelasteten Atmosphäre wird ganz entscheidend vom Können und der Kreativität der Ingenieure, Wissenschaftler und Techniker abhängen. Diese Chance und Herausforderung müssen die klügsten Köpfe mit den besten Ideen erkennen und annehmen, um in allen Bereichen unseres Lebens energiesparende Maßnahmen zu ermöglichen, neue Technologien zu ersinnen und zu realisieren. Bei der Planung und Umsetzung zukunftsweisender Konzepte bedarf es immer auch der tatkräftigen Unterstützung von klugen Politikern, Ökonomen, Managern und einer problembewussten, wohl informierten Bevölkerung.



