2

2 Klima vor dem Kollaps?

Dass sich das Klima ändert, wissen wir eigentlich schon lange. Unzählige Eis- und Warmzeiten haben gezeigt, dass die Klimabedingungen auf der Erde ständigen Wechseln unterworfen sind. Für menschliche Zeithorizonte dauert ein Wechsel jedoch relativ lange. Etwa alle 100 000 Jahre kam es in der jüngeren Erdgeschichte zu Eiszeiten, die jeweils durch deutlich kürzere Warmzeiten unterbrochen waren. Unsere jetzige Warmzeit, das so genannte Holozän, begann vor etwa 11 700 Jahren. Da die letzten Warmzeiten im Schnitt nur rund 15 000 Jahren andauerten, müssten wir eigentlich unweigerlich auf die nächste Eiszeit zusteuern.

Die genauen Ursachen für den Wechsel zwischen Warm- und Eiszeiten lassen sich nur bedingt rekonstruieren. Natürliche Effekte wie Veränderungen der Sonnenaktivität, Änderungen der Erdbahngeometrie, Vulkanismus, Änderungen von Meeresströmungen sowie Verschiebung der Kontinentalplatten gelten als Hauptursachen von Klimaänderungen. Kommen mehrere Ursachen zusammen, sind auch recht abrupte Änderungen möglich. Das belegt die Klimageschichte der Erde. Insofern ist die in jüngster Zeit beobachtete Erderwärmung nichts Ungewöhnliches. Außergewöhnlich ist nur, dass vermutlich erstmals Lebewesen der Erde einen abrupten Klimawandel verursachen – nämlich wir Menschen.

2.1 Es ist warm geworden – Klimaveränderungen heute

2.1.1 Immer schneller schmilzt das Eis

Die Klimabedingungen der Erde sind seit einigen Tausend Jahren relativ konstant. Darauf hat sich unsere Zivilisation mit ihren Siedlungsgebieten und landwirtschaftlichen Flächen eingestellt. Heute dicht besiedelte Gebiete waren in den letzten Eiszeiten durch meterhohe Eispanzer bedeckt und während der heißesten Perioden der Klimageschichte wären unsere Küstenstädte metertief im Meer versunken. Kommt es zu starken Änderungen der Klimabedingungen, werden sie zweifellos das Gesicht der Erde und unsere heutigen Lebensbe-

dingungen stärker verändern als dies selbst das dramatischste geschichtliche Ereignis der letzten Jahrtausende vermocht hat.

Beobachtete Klimaveränderungen [IPC07, EEA10, NOAA13]

- Die globale Landoberflächentemperatur lag im Jahr 2012 bereits 0,9 Grad Celsius über dem Mittel von 1901 bis 2000.
- Die 2000er-Jahre waren die wärmste Dekade seit Beginn der Temperaturmessungen.
- Die Temperaturzunahme der letzten 50 Jahre ist doppelt so hoch wie die der letzten 100 Jahre. Die Erwärmung der Arktis erfolgte mehr als doppelt so schnell.
- Die Temperaturen der letzten 50 Jahre waren höher als jemals zuvor in den vergangenen 1300 Jahren.
- Weltweit schrumpfen die Gletscher sowie die Eisschilde auf Grönland und der Antarktis. Die Alpengletscher haben zwischen 1850 und 2010 bereits zwei Drittel ihres Volumens verloren.
- Die sommerliche arktische Meereisbedeckung ist von 7,5 Millionen Quadratkilometern im Jahr 1982 auf 3,5 Millionen Quadratkilometer im Jahr 2012 zurückgegangen.
- Der Meeresspiegel ist seit 1993 durchschnittlich um 3,1 Millimeter pro Jahr gestiegen, im 20. Jahrhundert insgesamt um 17 Zentimeter. Mehr als die Hälfte geht auf die thermische Ausdehnung der Meere zurück, etwa 25 Prozent auf Abschmelzen der Gebirgsgletscher und etwa 15 Prozent auf das Abschmelzen der arktischen Eisschilde.
- Die Häufigkeit von heftigen Niederschlägen hat zugenommen.
- Häufigkeit und Intensität von Dürren sind seit den 1970er-Jahren gestiegen.
- Die Häufigkeit von Temperaturextremen hat zugenommen.
- Die Intensität tropischer Wirbelstürme ist seit den 1970er-Jahren stärker geworden.

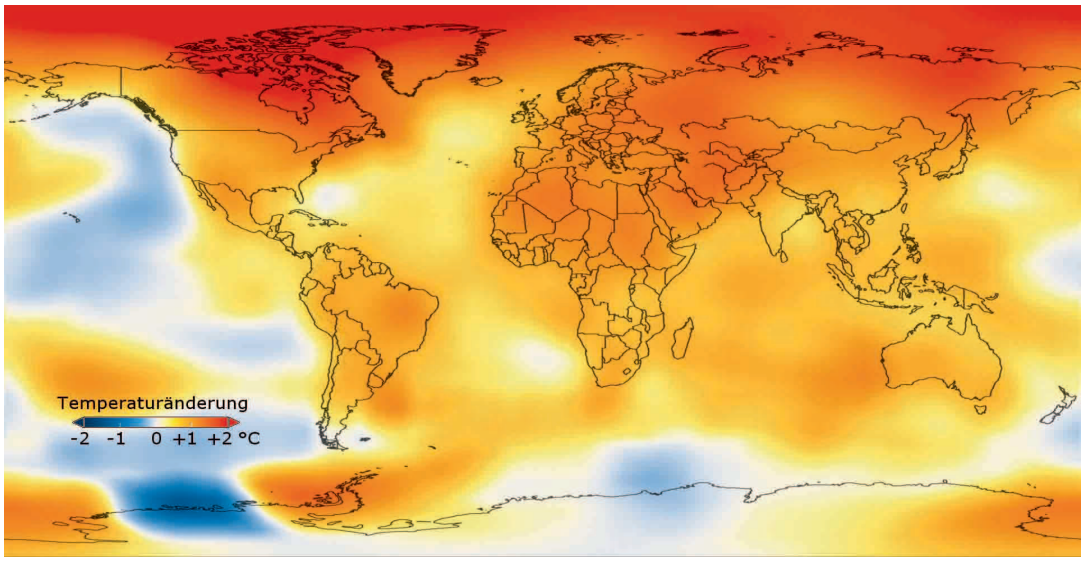

Abbildung 2.1 Temperaturänderung des Jahres 2012 im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 1951 bis 1980. Quelle: NASA, http://svs.gsfc.nasa.gov

In den letzten hundert Jahren hat sich die mittlere Temperatur der Erde um rund 1 Grad Celsius erhöht. Auf den ersten Blick sieht dies nicht viel aus. Die Erwärmung auf der Erde erfolgt jedoch nicht in allen Gebieten gleichmäßig und ist auch nicht über das Jahr konstant. Liegen die Temperaturen von 10 Monaten im normalen Bereich, können zwei Monate folgen, die bereits um mehr als 5 Grad Celsius über dem Mittel liegen. In einigen Regionen der Erde ist die Temperaturzunahme bereits jetzt schon im Jahresmittel größer als 2 Grad Celsius *(Abbildung 2.1)*.

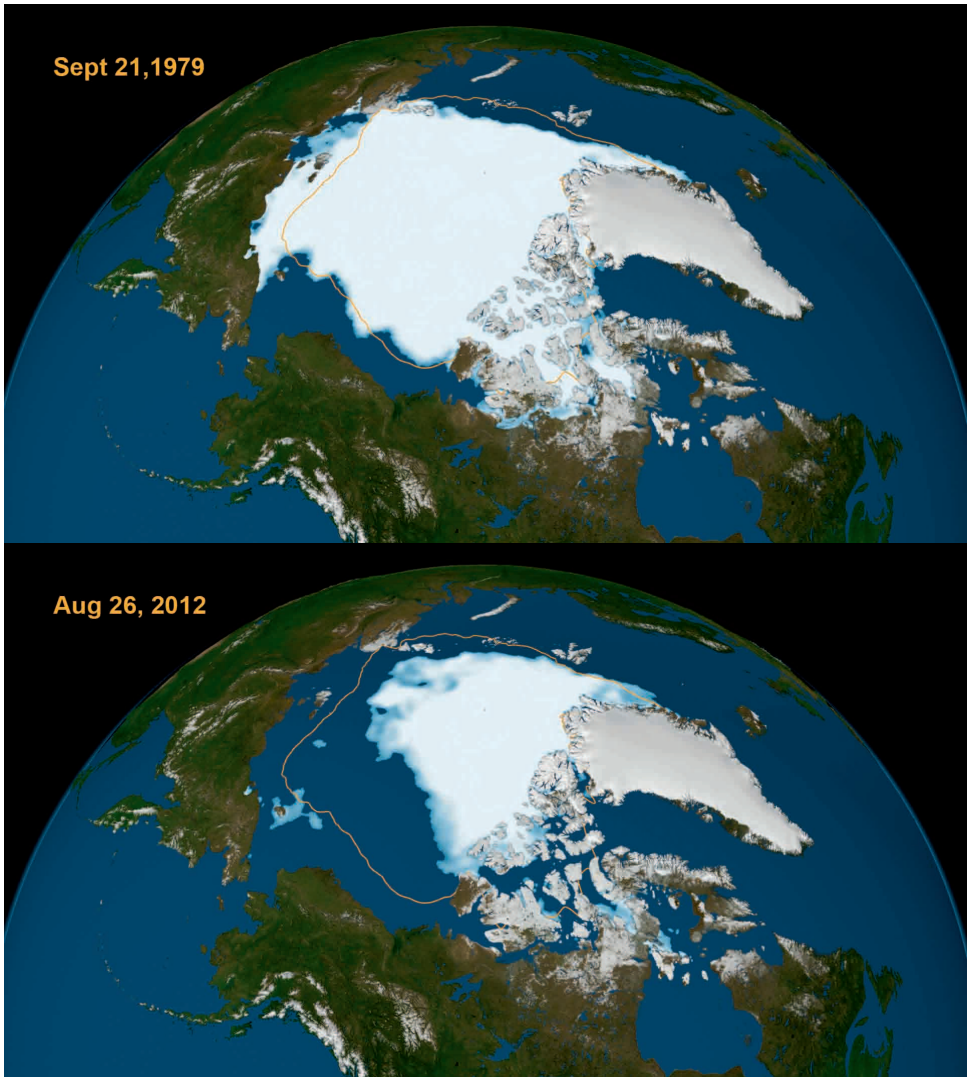

Abbildung 2.2 Sommerliche arktische Eisbedeckung für das Jahr 1979 (oben) und das Jahr 2012 (unten). Quelle: NASA, http://svs.gsfc.nasa.gov

Als Folge der Erwärmung dehnt sich das Wasser der Meere aus. Durch die Zunahme der Temperaturen schmelzen auch mehr und mehr arktisches Eis und das ewige Eis der Gletscher ab. Dadurch erhöht sich der Meeresspiegel weiter.

Die Temperaturen in der Polarregion steigen sogar noch schneller als im Rest der Welt. Die Eisbedeckung des Meers der Arktis ist innerhalb von 30 Jahren um über 50 Prozent zurückgegangen *(Abbildung 2.2)*. Neben den Eismassen der Arktis schmelzen auch viele Gletscher rasend schnell ab. Der größte Gletscher der Welt, der Bering-Gletscher in der Arktis Kanadas, ist während des letzten Jahrhunderts um mehr als 10 Kilometer geschrumpft. Von den Gebirgsgletschern in den Ostalpen ist bereits heute nur noch weniger als die Hälfte der Masse aus dem Jahr 1850 übrig.

2.1.2 Naturkatastrophen kommen häufiger

Mit den globalen Temperaturen nehmen auch die Wetterextreme zu. Größere Temperaturunterschiede verursachen heftigere Stürme, stärkere Regenfälle sowie häufigere Hochwasser und Überschwemmungen. Die Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft beobachtet schon seit langem besorgt die Zunahme großer Naturkatastrophen und Schäden. Sie muss nämlich im Schadensfall für einen Teil der versicherten Schäden aufkommen.

Die volkswirtschaftlichen und auch die versicherten Schäden sind seit den 1950er-Jahren stark gestiegen, wie *Abbildung 2.3* zeigt. Dabei umfasst die Grafik nur große Katastrophen. Kleinere lokale und mittlere Ereignisse sind hierin nicht enthalten. Der Anstieg hat zwei Ursachen: Durch den zunehmenden Wohlstand auf der Erde existieren einerseits im Fall einer Naturkatastrophe mehr Werte, die zerstört werden können. Andererseits haben aber auch Häufigkeit und Intensität von Naturkatastrophen stark zugenommen.

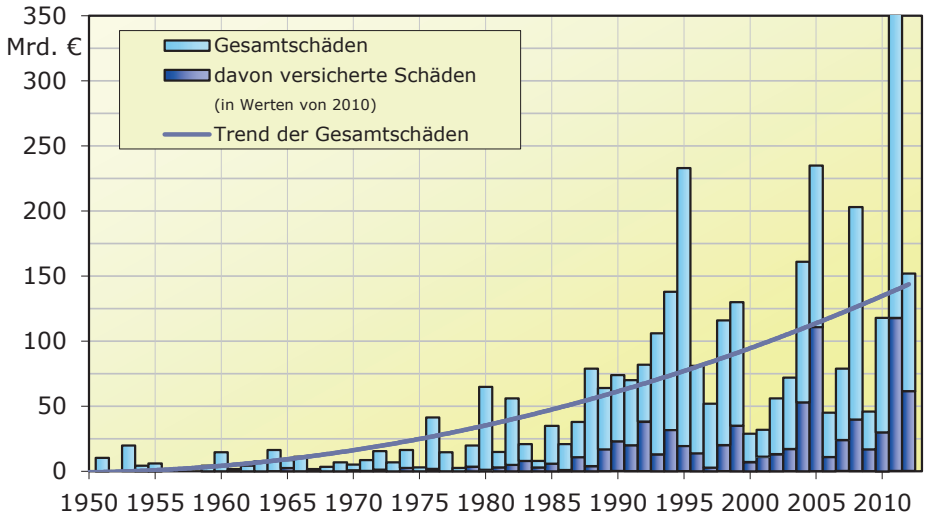

Abbildung 2.3 Gesamtschäden und versicherte Schäden durch große Naturkatastrophen weltweit. Daten: Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft [Mün13]

Alleine der Hurrikan Katrina, der im Jahr 2005 die US-amerikanische Stadt New Orleans verwüstete, richtete Schäden in einer Höhe von rund 125 Milliarden US-Dollar an und kostete 1300 Menschen das Leben *(s. auch Abbildung 2.4)*.

Abbildung 2.4 Schäden durch Hurrikans in den USA. Fotos: Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft

Beispiele großer Naturkatastrophen

- Winter 1990: Die Orkane Daria, Herta, Vivian und Wiebke töten 272 Menschen in Europa und richten Schäden von 12,8 Milliarden Euro an.
- 29.04.1991: Eine Sturmflut als Folge des tropischen Zyklons Gorky erfasst Bangladesh. 138 000 Menschen sterben. Die materiellen Schäden sind mit 3 Milliarden Euro in dem armen Land vergleichsweise gering.
- 26.12.1999: Orkan Lothar verwüstet große Gebiete in Europa. 110 Menschen sterben. Die Schäden betragen 11,5 Milliarden Euro.
- August 2002: Ungewöhnlich starke Regenfälle mit bis zu 400 Litern pro Quadratmeter sorgen für heftige Überschwemmungen in Deutschland und einigen Nachbarländern. In Europa verlieren 230 Menschen ihr Leben und es gibt Schäden von 18,5 Milliarden Euro.
- August 2003: Die größte Hitzewelle in Europa seit Beginn der Klimaaufzeichnungen fordert 70 000 Menschenleben und verursacht Schäden in der Höhe von 13 Milliarden Euro.
- August 2005: Hurrikan Katrina wütet in den USA und zerstört die Stadt New Orleans. 1322 Menschen sterben. Der bislang teuerste Sturm aller Zeiten verursacht Schäden von 125 Milliarden US-Dollar (rund 95 Milliarden Euro).
- 18. Januar 2007: Der Orkan Kyrill fegt über Europa hinweg. Die Deutsche Bahn stellte erstmals in der Geschichte den kompletten Zugverkehr in Deutschland ein.
- Sommer 2010: Pakistan kämpft wochenlang mit den schlimmsten Überschwemmungen in seiner Geschichte. Ein Fünftel des Landes versinkt in den Fluten. 6 Millionen Menschen werden obdachlos. Es gibt 1760 Todesopfer und Schäden in Höhe von 7 Milliarden Euro.
- Oktober 2010: Eine ungewöhnliche Dürre in Ostafrika versuracht dramatische Ernteausfälle. Rund 260 000 Menschen verhungern.
- Oktober 2012: Hurrikan Sandy verwüstet Teile der Karibik sowie der US-Ostküste und trifft auch New York hart. Insgesamt sterben 253 Menschen. Die Schäden betragen 66 Milliarden US-Dollar (rund 50 Milliarden Euro).
- Juni 2013: Elf Jahre nach der Jahrhundertflut von 2002 sorgen schon wieder extreme Niederschläge für massive Überschwemmungen und Rekordwasserstände in Deutschland, Österreich und Tschechien. Es gibt erneut Todesopfer und Milliardenschäden.

Auch in Deutschland haben die Extremereignisse zugenommen. Beispiele in jüngster Zeit waren im Jahr 2005/2006 der mildeste Winter seit Beginn der Klimaaufzeichnungen oder der Rekordhitzesommer im Jahr 2003. Durch große Hitzewellen sinken die Ernteerträge. Wegen der enormen Belastungen für den Körper und den Kreislauf steigt auch die Sterberate an. Im Sommer 2003 sind in Europa infolge der großen Hitze rund 70 000 Menschen mehr gestorben als in einem normalen Jahr. Schätzungsweise 7000 Hitzetote waren es allein in Deutschland.

Während momentan die finanziellen Schäden durch Naturkatastrophen zumindest in Deutschland noch überschaubar sind, rechnet man mit einem deutlichen Anstieg bis zum Ende des Jahrhunderts. Bei einer ungebremsten globalen Erwärmung um 4,5 Grad Celsius errechnete das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung DIW Gesamtkosten des Klimawandels alleine für Deutschland von rund 3000 Milliarden Euro bis zum Jahr 2100 [Kem07].

2.2 Schuldiger gesucht – Gründe für den Klimawandel

2.2.1 Der Treibhauseffekt

Ohne den schützenden Einfluss der Atmosphäre würden auf der Erde Temperaturen von etwa –18 Grad Celsius herrschen. Wir säßen dann auf einem Eisplaneten.

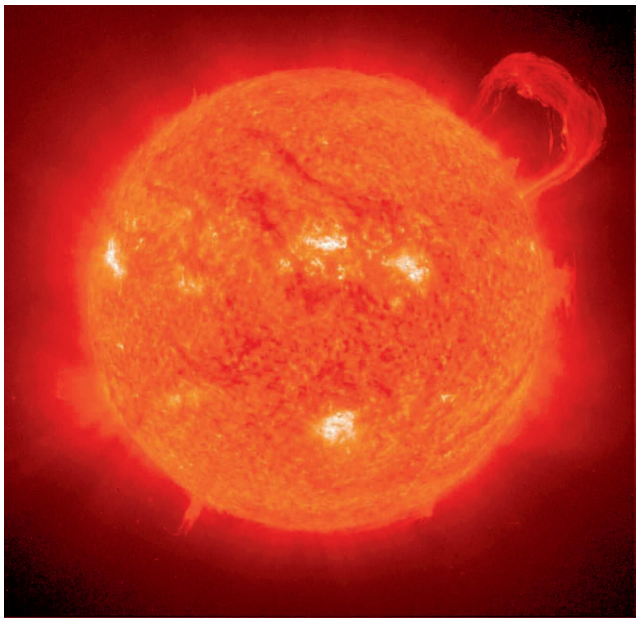

Abbildung 2.5 Veränderungen der Sonnenaktivität sind nur für einen kleinen Bruchteil der globalen Erwärmung verantwortlich. Bild: NASA

Verschiedene natürliche Spurengase in der Atmosphäre, wie Wasserdampf, Kohlendioxid oder Ozon verhindern, dass die Erde sämtliche eintreffende Sonnenenergie wieder ins

Weltall abgibt. Einen Teil strahlen diese Gase wie in einem Treibhaus zur Erde zurück. Dieser natürliche Treibhauseffekt ist die Grundlage für das Leben auf unserer Erde. Dadurch hat sich heute eine mittlere Temperatur von etwa +15 Grad Celsius eingestellt.

Bei den Spurengasen in der Atmosphäre hat sich in den letzten Jahrtausenden ein Gleichgewicht gebildet, welches das Leben in der Form, wie wir es heute kennen, erst ermöglichte. Gründe für den beobachteten Klimawandel wurden bereits viele diskutiert. Lange Zeit haben Skeptiker den Klimawandel an sich in Frage gestellt. Nachdem heute niemand mehr wirklich ernsthaft behaupten kann, dass es nicht wärmer geworden ist, versuchen einige nun die Schuld auf natürliche Effekte zu schieben: Beispielsweise auf die Sonnenaktivität. Sie war in den vergangenen Jahrzehnten vermutlich größer als in allen 8000 Jahren zuvor. Nachweislich hat sich tatsächlich die Strahlungsmenge, die die Erde erreicht, leicht erhöht. Wissenschaftler schließen aber aus, dass dies eine so starke Erwärmung verursachen kann. Bestenfalls ein Zehntel der beobachteten Temperaturzunahme geht auf die gestiegene Sonnenaktivität zurück.

Die plausibelste Ursache für die Erwärmung ist, dass sich durch menschliche Einflüsse die Anteile von Spurengasen signifikant verändert haben. Die Konzentration an Gasen, die nachweislich eine globale Erwärmung bewirken, hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Der Mensch verursacht also eine Verstärkung des natürlichen Treibhauseffekts. Dieser vom Menschen hervorgerufene Treibhauseffekt heißt auch anthropogener Treibhauseffekt *(Abbildung 2.8)*. Sehr neu ist diese Theorie allerdings nicht.

Atmen wir das Klima kaputt?

Beim Ausatmen enthält die Atemluft rund 4 Prozent an Kohlendioxid – etwa hundertmal mehr als beim Einatmen. Pro Jahr pustet jeder damit rund 350 Kilogramm an Kohlendioxid in die Atmosphäre. Wenn wir ein Lagerfeuer entzünden und dabei Holz verbrennen, setzen wir damit ebenfalls Kohlendioxid frei. Pflanzen, Tiere und Menschen sind jedoch in einem biogeochemischen Kreislauf eingebunden. Der Mensch nimmt Kohlenhydrate zu sich und atmet Sauerstoff ein. Beide Stoffe setzt er in Kohlendioxid um, das er wieder ausatmet.

Pflanzen binden wiederum dieses Kohlendioxid und liefern unsere Kohlenhydrate. Kohlenhydrate sind organische Verbindungen aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff und werden in Pflanzen durch Photosynthese aufgebaut. Getreide und Nudeln bestehen zum Beispiel zu 75 Prozent aus Kohlenhydraten. Der Weizen in der italienischen Spaghettinudel hat vielleicht sogar das Kohlendioxid in Kohlenhydrate umgewandelt, das wir im letzten Urlaub ausgeatmet haben.

Wenn eine Pflanze verbrennt, verrottet oder eben als Kohlenhydratlieferant endet, entsteht dabei genauso viel Kohlendioxid wie diese zuvor aus der Luft entnommen hat. Die natürlichen Kreisläufe sind also CO_2-neutral und verursachen keinen Anstieg der Konzentration. Das gilt aber nicht für die Urlaubsfahrt nach Italien und den Transport der Spaghettinudel nach Deutschland.

2.2.2 Hauptverdächtiger Kohlendioxid

Bereits im Jahr 1896 rechnete der schwedische Wissenschaftler und Nobelpreisträger Svante Arrhenius erstmals vor, dass eine Verdoppelung des Kohlendioxidgehalts (CO_2) der

Atmosphäre zu einer Temperaturerhöhung um 4 bis 6 Grad Celsius führen würde [Arr96]. Ein Zusammenhang der beobachteten Klimaerwärmung mit dem Kohlendioxidanstieg in Folge der Industrialisierung wurde in den 1930er-Jahren bereits diskutiert. Er war aber seinerzeit noch nicht eindeutig zu belegen.

Erst gegen Ende der 1950er-Jahre gelang der Nachweis, dass die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre ansteigt [Rah04]. Heute gilt als weitgehend bewiesen, dass die Zunahme der Kohlendioxidkonzentration die Hauptursache für die beobachtete Erwärmung ist.

Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration resultiert hauptsächlich aus der Nutzung fossiler Energien. Verbrennen wir fossile Energieträger, ist dies chemisch gesehen eine Oxidation. Bei dieser Reaktion wird Wärme frei. Wir nutzen also den Effekt, dass bei der Verbindung des Kohlenstoffs von Erdöl, Erdgas oder Kohle mit dem Sauerstoff aus der Luft Wärme entsteht. Als Abfallprodukt erhalten wir dabei Kohlendioxid, und das in enorm großen Mengen: derzeit jährlich über 30 Milliarden Tonnen. Jeder einzelne Einwohner der Erde erzeugt pro Jahr im Durchschnitt gut 4000 Kilogramm. Das entsprechende Kohlendioxid füllt einen Würfel mit einer Seitenlänge von 13 Metern oder rund 2 Millionen Einliterflaschen.

Die Emissionen in den einzelnen Ländern sind dabei genau wie der Energieverbrauch höchst unterschiedlich *(Tabelle 2.1)*. Während beispielsweise ein Mosambikaner gerade einmal 100 Kilogramm, also eine zehntel Tonne CO_2 pro Jahr auf die Waage bringt, fallen in China bereits gut 5 Tonnen pro Kopf an. In Deutschland sind es mehr als 9 Tonnen, in den USA rund 17 Tonnen. Würde man das Kohlendioxid, das die Deutschen pro Jahr erzeugen, über den Boden der gesamten Landesfläche verteilen, würde jeder Deutsche einen Meter tief im CO_2 versinken. Das Kohlendioxid Mosambiks über die Landesfläche von Mosambik verteilt würde den Boden hingegen nicht einmal einen Millimeter hoch bedecken.

Tabelle 2.1 Die zehn Länder der Erde mit den höchsten energiebedingten Kohlendioxidemissionen. Stand: Jahr 2010. Daten: IEA [IEA12]

Land	Mio. t CO_2	Mio. Einw.	t CO_2/ Einw.	Land	Mio. t CO_2	Mio. Einw.	t CO_2/ Einw.
1. China	7 270	1 338	5,43	6. Deutschland	762	82	9,32
2. USA	5 369	310	17,31	7. Südkorea	563	49	11,52
3. Indien	1 616	1 171	1,39	8. Kanada	537	34	15,73
4. Russland	1 581	142	11,16	9. Iran	509	74	6,88
5. Japan	1 143	127	8,97	10. Großbritannien	484	62	7,78
Welt	**30 326**	**6 825**	**4,44**	133. Mosambik	3	23	0,11

Dabei können wir noch gar nicht so lange mit absoluter Sicherheit sagen, dass sich der Anteil von Kohlendioxid in der Atmosphäre jährlich vergrößert. Erst seit dem Jahr 1958 misst das Observatorium Mauna Loa auf der Pazifikinsel Hawaii kontinuierlich die Kohlen-

dioxidkonzentrationen. Damals betrug die Konzentration 315,2 ppm, im Jahr darauf 315,8 ppm. Die Einheit ppm bedeutet dabei „parts per million“. Auf eine Million Teile Luft kamen also gerade einmal 315 Teile Kohlendioxid. Der kleine Anstieg im ersten Jahr hätte auch durch Messfehler oder natürliche Schwankungen verursacht werden können. Erst als in den Folgejahren die Werte stetig stiegen, war klar, dass der Anteil an Kohlendioxid zunimmt – und das mit wachsender Geschwindigkeit. Im Jahr 2012 stieg die CO_2-Konzentration bereits auf 394 ppm und riss 2013 zeitweise die 400-ppm-Marke.

Doch selbst die enormen Kohlendioxidemissionen bei der Verbrennung fossiler Energieträger sind im Vergleich zur riesigen Atmosphäre verschwindend gering. Außerdem wird ein Teil des Kohlendioxids von den Meeren und Pflanzen wieder absorbiert. Es stellt sich also die Frage, inwieweit unsere Emissionen überhaupt die Zusammensetzung der Atmosphäre verändern können.

Wenn wir bei der Nutzung fossiler Energieträger Stickstoff anstelle von Kohlendioxid erzeugen würden, wäre dies mit Sicherheit kein großes Problem. Denn unsere Luft besteht zu rund 78 Prozent aus Stickstoff, 21 Prozent aus Sauerstoff, aber nur zu einem Prozent aus anderen Gasen, von denen Kohlendioxid wiederum nur einen kleinen Teil ausmacht. Die Zusammensetzung der Luft war im Verlauf der Erdgeschichte keineswegs konstant. Aber über die letzten Jahrtausende hatte sich ein Gleichgewicht von weniger als 300 ppm eingestellt. Der Anteil von Kohlendioxid an der Atmosphäre war also geringer als 0,03 Prozent. Das ist aber auch der Grund, warum wir überhaupt relevante Veränderungen verursachen können. Kleine Mengen lassen sich nämlich vergleichsweise einfach erhöhen.

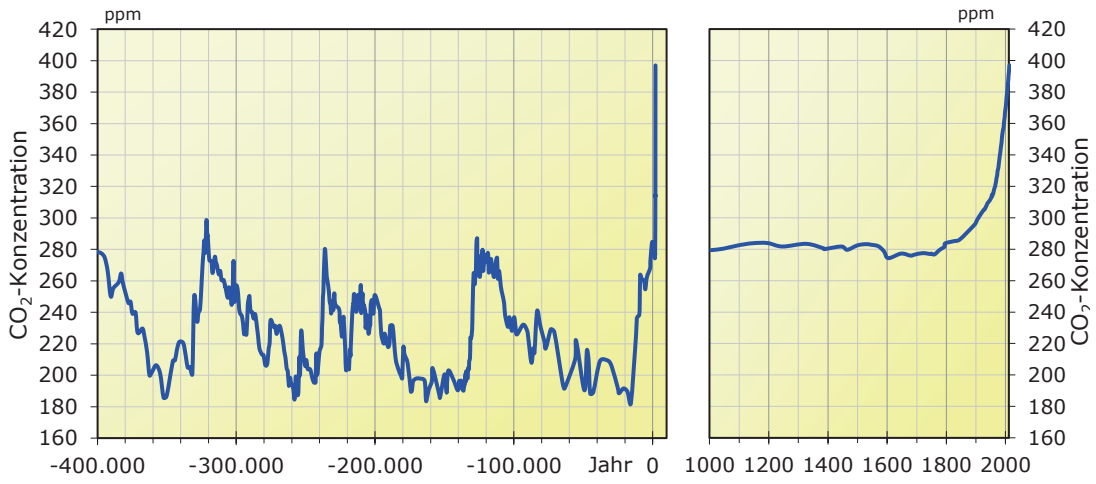

Abbildung 2.6 Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre über die letzten 400 000 Jahre und in jüngerer Vergangenheit. Daten: CDIAC, http://cdiac.ornl.gov

Um die Klimageschichte der letzten Jahrtausende untersuchen zu können, musste man sich einer anderen Idee bedienen. Die polaren und alpinen Eisschilde der Erde haben die Klimageschichte der Erde gespeichert. In den Regionen mit ewigem Eis gibt es jedes Jahr

Neuschnee auf die Eisflächen. Zwischen den Schneekristallen befindet sich dabei auch jede Menge Luft. Die jährlich hinzukommenden Schneemassen erhöhen den Druck auf den Altschnee und pressen ihn schließlich zu reinem Eis. Die Luft entweicht dabei jedoch nicht völlig, sondern bleibt in kleinen Bläschen im Eis eingeschlossen. Diese lassen sich heute mit moderner Analysetechnik untersuchen. Die Ablagerung von Schnee und das Entstehen von Eis wiederholen sich jährlich mit einer für die Wissenschaft erfreulichen Regelmäßigkeit. Man muss also nur ein Loch in das Eis bohren und Eis aus der Tiefe holen. Somit hat man einen Zeitzeugen der Vergangenheit. Je tiefer man kommt, desto länger kann man in die Geschichte zurückblicken.

Verschiedene Bohrkernuntersuchungen zeigten übereinstimmend, dass die Kohlendioxidkonzentration vor der Industrialisierung gerade einmal bei etwa 280 ppm gelegen hatte *(Abbildung 2.6)*. Auch die These, dass hohe Kohlendioxidkonzentrationen ein wiederkehrendes Phänomen seien, ließ sich widerlegen. Denn die Untersuchungen zeigten, dass der Kohlendioxidanteil in der Atmosphäre heute höher ist als zu irgendeinem Zeitpunkt der vergangenen 650 000 Jahre [IPC07].

Nachdem der Anstieg der Kohlendioxidemissionen endgültig bewiesen war, entwickelte man Klimamodelle, die den Zusammenhang zwischen Verbrennung fossiler Energieträger und der CO_2-Zunahme ermöglichten. Andere Quellen als die vom Menschen verursachten Emissionen kamen für einen derartigen Anstieg nicht in Frage. Die Modelle zeigen, dass sich die CO_2-Konzentration je nach Entwicklung des zukünftigen Verbrauchs an Kohle, Erdöl und Ergas sogar mehr als verdoppeln kann.

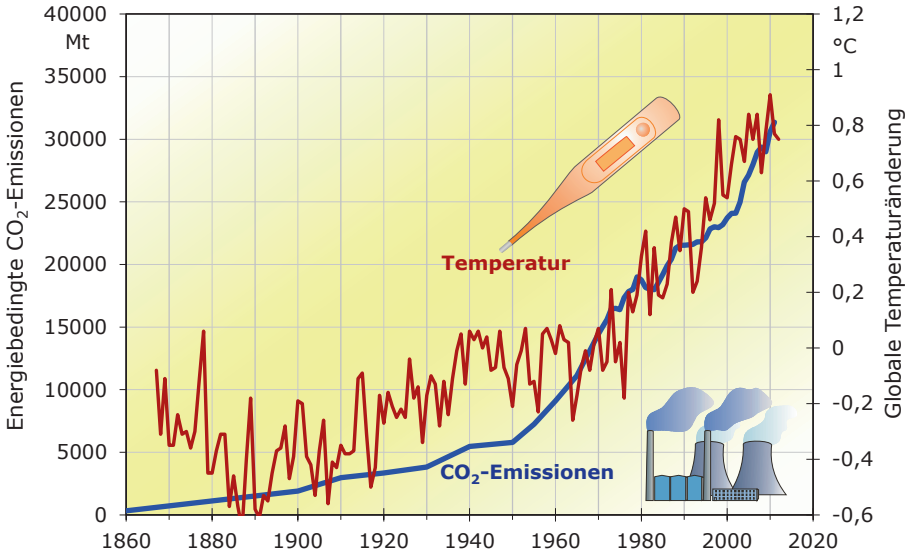

Abbildung 2.7 Verlauf der energiebedingten CO_2-Emissionen und der globalen Temperaturänderung seit dem Jahr 1860 im Vergleich zum Mittelwert von 1951 bis 1980