

## 2. Die globale Erwärmung

Ändert der Mensch das Klima? Und wenn ja, wie rasch und wie stark? Diese Fragen sollen in diesem Kapitel diskutiert werden. Sie beschäftigen die Wissenschaft nicht erst in jüngster Zeit, sondern bereits seit über einem Jahrhundert. Mit «globaler Erwärmung» meinen wir hier eine Erwärmung der globalen Mitteltemperatur, nicht unbedingt eine Erwärmung überall auf der Erde. In diesem Kapitel werden wir nur die globale Mitteltemperatur betrachten; die regionalen Ausprägungen des Klimawandels werden in Kapitel 3 besprochen.

### ***Etwas Geschichte***

Schon 1824 beschrieb Jean-Baptiste Fourier, wie Spurengase in der Atmosphäre das Klima erwärmen.<sup>33</sup> In den 1860er Jahren beschäftigte sich der Physiker John Tyndall eingehend mit der Wirkung verschiedener Treibhausgase, insbesondere von Wasserdampf. Im Jahr 1896 rechnete der schwedische Nobelpreisträger Svante Arrhenius erstmals aus, dass eine Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre zu einer Temperaturerhöhung um 4 bis 6°C führen würde. In den 1930er Jahren wurde in der Fachliteratur ein Zusammenhang der damals beobachteten Klimaerwärmung mit dem Anstieg des CO<sub>2</sub> durch die Industrialisierung diskutiert; er war seinerzeit mangels Daten jedoch nicht zu belegen. Erst seit den 1950er Jahren wird die Gefahr einer anthropogenen (also vom Menschen verursachten) Erwärmung weithin ernst genommen. Im Rahmen des internationalen geophysikalischen Jahres (IGY) 1957/58 gelang der Nachweis, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre tatsächlich ansteigt; Isotopenanalysen zeigten zudem, dass der Anstieg durch Kohlenstoff aus der Nutzung fossiler Brennstoffe verursacht wurde – also vom Menschen. Die ersten Simulationsrechnungen mit

einem Atmosphärenmodell in den 1960er Jahren ergaben einen Temperaturanstieg von 2 °C bei angenommener Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration; ein weiteres Modell ergab etwas später einen Wert von 4 °C.

In den 1970er Jahren warnte mit der National Academy of Sciences der USA erstmals eine große Wissenschaftsorganisation vor der globalen Erwärmung.<sup>34</sup> Gleichzeitig gab es einige wenige Forscher, die sogar eine neue Eiszeit für möglich hielten, unter ihnen der bekannte US-Klimatologe Stephen Schneider. Das Thema wurde von den Medien begierig aufgegriffen; Schneiders Argumente überzeugten Fachleute jedoch kaum, und im Lichte weiterer eigener Forschungsergebnisse revidierte er bald selbst seine Auffassung.

Die National Academy schätzte damals die Wirkung einer CO<sub>2</sub>-Verdoppelung auf eine Zunahme der Temperatur um 1,5 bis 4,5 °C. Diese Unsicherheitsspanne gilt bis heute (siehe unten); sie konnte unabhängig bestätigt und abgesichert, aber leider bislang nicht wesentlich verkleinert werden – obwohl Werte am Rande dieser Spanne als zunehmend unwahrscheinlich gelten müssen.<sup>35</sup> Im Jahr 1990 erschien der erste Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change<sup>36</sup> (IPCC, mehr dazu in Kap. 4), der zweite und dritte Bericht<sup>37</sup> folgten 1996<sup>36</sup> und 2001.<sup>37</sup> In diesem Zeitraum haben sich die wissenschaftlichen Erkenntnisse derart erhärtet, dass inzwischen fast alle Klimatologen eine spürbare anthropogene Klimaerwärmung für erwiesen oder zumindest hochwahrscheinlich halten.<sup>38</sup>

### **Der Treibhauseffekt**

Der Grund für den befürchteten Temperaturanstieg als Folge des steigenden CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre liegt im so genannten Treibhauseffekt, der hier kurz erläutert werden soll.

Die mittlere Temperatur auf der Erde ergibt sich aus einem einfachen Strahlungsgleichgewicht (siehe Kap. 1). Einige Gase in der Atmosphäre greifen in die Strahlungsbilanz ein, indem sie zwar die ankommende Sonnenstrahlung passieren lassen, jedoch nicht die von der Erdoberfläche abgestrahlte langwellige

Wärmestrahlung. Dadurch kann Wärme von der Oberfläche nicht so leicht ins All abgestrahlt werden; es kommt zu einer Art «Wärmestau» in der Nähe der Erdoberfläche.

Anders formuliert: Die Oberfläche strahlt, wie jeder physikalische Körper, Wärme ab – je höher die Temperatur, desto mehr. Diese Wärmestrahlung entweicht aber nicht einfach ins Weltall, sondern wird unterwegs in der Atmosphäre absorbiert, und zwar von den Treibhausgasen (oder «klimawirksamen Gasen» – nicht zu verwechseln mit den «Treibgasen», die in Spraydosen Verwendung fanden und die Ozonschicht schädigen). Die wichtigsten dieser Gase sind Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan. Diese Gase strahlen die absorbierte Wärme wiederum in alle Richtungen gleichmäßig ab – einen Teil also auch zurück zur Erdoberfläche. Dadurch kommt an der Oberfläche mehr Strahlung an als ohne Treibhausgase: nämlich nicht nur die Sonnenstrahlung, sondern zusätzlich die von den Treibhausgasen abgestrahlte Wärmestrahlung. Ein Gleichgewicht kann sich erst wieder einstellen, wenn die Oberfläche zum Ausgleich auch mehr abstrahlt – also wenn sie wärmer ist. Dies ist der Treibhauseffekt (Abb. 2.1).

Der Treibhauseffekt ist ein ganz natürlicher Vorgang – Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan kommen von Natur aus seit jeher in der Atmosphäre vor. Der Treibhauseffekt ist sogar lebensnotwendig – ohne ihn wäre unser Planet völlig gefroren. Eine einfache Rechnung zeigt die Wirkung. Die ankommende Sonnenstrahlung pro Quadratmeter Erdoberfläche beträgt 342 Watt. Etwa 30 % davon werden reflektiert, es verbleiben 242 Watt/m<sup>2</sup>, die teils in der Atmosphäre, teils von Wasser- und Landflächen absorbiert werden. Ein Körper, der diese Strahlungsmenge abstrahlt, hat nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz der Physik eine Temperatur von  $-18^{\circ}\text{C}$ ; wenn die Erdoberfläche im Mittel diese Temperatur hätte, würde sie also gerade so viel abstrahlen, wie an Sonnenstrahlung ankommt. Tatsächlich beträgt die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche aber  $+15^{\circ}\text{C}$ . Die Differenz von 33 Grad wird vom Treibhauseffekt verursacht, der daher erst das lebensfreundliche Klima auf der Erde möglich macht. Der Grund zur Sorge über die globale

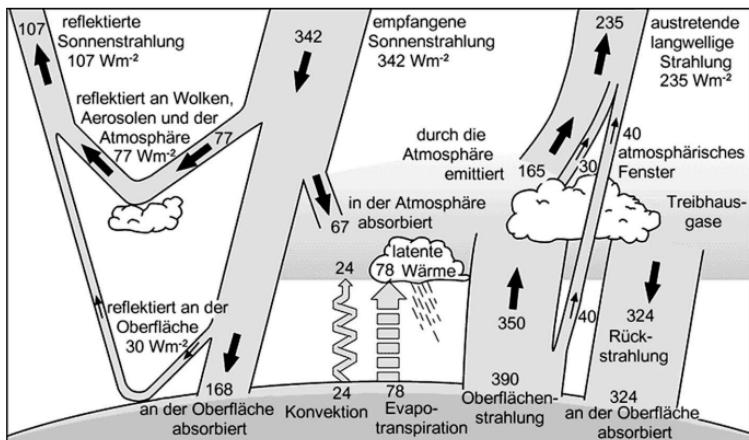


Abb. 2.1: Die Energiebilanz der Erde. Der natürliche Treibhauseffekt heizt die Oberfläche mit 324 Watt/m<sup>2</sup> auf. (Quelle: IPCC<sup>37</sup>)

Erwärmung liegt darin, dass der Mensch diesen Treibhauseffekt nun verstärkt. Da der Treibhauseffekt insgesamt für eine Temperaturdifferenz von 33 Grad verantwortlich ist, kann bereits eine prozentual geringe Verstärkung desselben zu einer Erwärmung um mehrere Grad führen.

Ein Vergleich mit unserem Nachbarplaneten Venus zeigt, welche Macht der Treibhauseffekt im Extremfall entfalten kann. Die Venus ist näher an der Sonne als wir – ihre Entfernung zur Sonne beträgt nur 72 % derjenigen der Erde. Daher ist die ankommende Sonnenstrahlung mit 645 Watt/m<sup>2</sup> fast doppelt so stark wie auf der Erde (die Strahlungsdichte nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab). Allerdings ist die Venus in eine dichte Wolkendecke gehüllt, die 80 % der Sonnenstrahlung reflektiert – auf der Erde beträgt dieser Anteil nur 30 % (siehe oben). Die auf der Venus *absorbierte* Sonnenenergie – die Differenz zwischen ankommender und reflektierter Strahlung – ist also mit 130 Watt/m<sup>2</sup> deutlich geringer als auf der Erde (242 Watt/m<sup>2</sup>). Man könnte daher erwarten, dass die Venusoberfläche kälter ist als die Erdoberfläche. Das Gegenteil ist jedoch der Fall: Auf der Venus herrschen siedend heiße 460°C.

Grund dafür ist ein extremer Treibhauseffekt: Die Atmosphäre der Venus besteht zu 96 % aus Kohlendioxid.

Wie konnte es dazu kommen? Wie in Kapitel 1 besprochen, begrenzt auf der Erde über Jahrtausende die Verwitterung von Gestein die CO<sub>2</sub>-Konzentration. Da auf der Venus das zur Verwitterung benötigte Wasser kaum vorhanden ist, kann der geschilderte Regelkreis, der auf der Erde zur langfristigen Stabilisierung von CO<sub>2</sub> und Klima führt, auf der Venus nicht funktionieren.<sup>8</sup>

### ***Der Anstieg der Treibhausgaskonzentration***

Von der Theorie nun zu den tatsächlichen, gemessenen Veränderungen auf unserer Erde. Direkte und kontinuierliche Messungen der Kohlendioxidkonzentration gibt es erst seit den 1950er Jahren, seit Charles Keeling eine Messreihe auf dem Mauna Loa in Hawaii begann. Diese berühmte Keeling-Kurve zeigt zum einen die jahreszeitlichen Schwankungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration: das Ein- und Ausatmen der Biosphäre im Jahresrhythmus. Zum anderen zeigt sie einen kontinuierlichen Aufwärtstrend. Inzwischen (2005) hat die CO<sub>2</sub>-Konzentration den Rekordwert von 380 ppm (also 0,038 %) erreicht (Abb. 2.2). Dies ist der höchste Wert seit mindestens 700 000 Jahren – so weit reichen die zuverlässigen Daten aus Eiskernen inzwischen zurück (siehe Kap. 1). Für den Zeitraum davor haben wir nur ungenauere Daten aus Sedimenten. Alles spricht jedoch dafür, dass man etliche Millionen Jahre in der Klimgeschichte zurückgehen muss – zurück in die Zeiten eines wesentlich wärmeren, eisfreien Erdklimas –, um ähnlich hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu finden.<sup>10</sup> Wir verursachen derzeit also Bedingungen, mit denen der Mensch es noch nie zu tun hatte, seit er den aufrechten Gang gelernt hat.

Dass es der Mensch ist, der diesen Anstieg des CO<sub>2</sub> verursacht, daran gibt es keinerlei Zweifel. Wir wissen, wie viele fossile Brennstoffe (Kohle, Erdöl und Erdgas) wir verbrennen und wie viel CO<sub>2</sub> dabei in die Atmosphäre gelangt – CO<sub>2</sub> ist das hauptsächliche Verbrennungsprodukt, keine kleine Verunreinigung in den Abgasen. Die jedes Jahr verbrannte Menge entspricht etwa

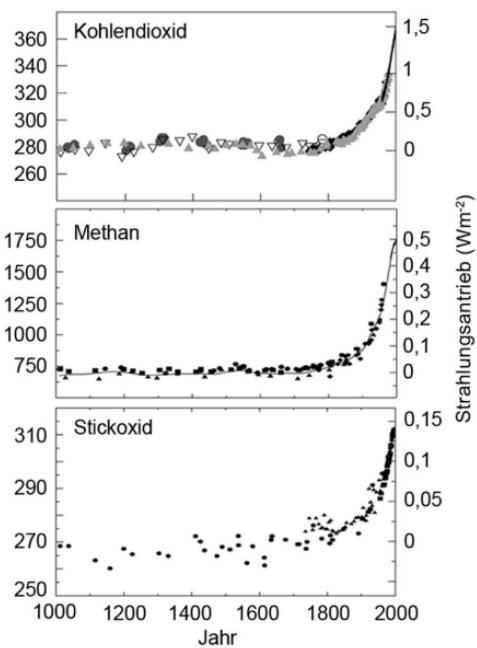


Abb. 2.2: Die Entwicklung der Konzentration wichtiger Treibhausgase in der Atmosphäre über die abgelaufenen tausend Jahre. Linke Skala: Konzentration in Teilen pro Million (ppmv) bzw. pro Milliarde (ppbv, für Methan). Rechte Skala: der dadurch verursachte zusätzliche Treibhauseffekt in  $\text{Watt}/\text{m}^2$ . (Quelle: IPCC<sup>37</sup>)

dem, was sich zur Zeit der Entstehung der Lagerstätten von Öl und Kohle in rund einer Million Jahre gebildet hat.

Nur etwa die Hälfte (56 %) des von uns in die Luft gegebenen  $\text{CO}_2$  befindet sich noch dort, die andere Hälfte wurde von den Ozeanen und von der Biosphäre aufgenommen. Fossiler Kohlenstoff hat eine besondere Isotopenzusammensetzung, dadurch konnte Hans Suess bereits in den 1950er Jahren nachweisen, dass das zunehmende  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre einen fossilen Ursprung hat.<sup>39</sup> Inzwischen ist auch die Zunahme des  $\text{CO}_2$  im Ozean durch rund 10 000 Messungen aus den Weltmeeren belegt – wir erhöhen also die  $\text{CO}_2$ -Konzentration nicht nur in der Luft, sondern auch im Wasser.<sup>40</sup> Dies führt übrigens zur Versauerung des Meerwassers und damit wahrscheinlich zu erheblichen Schäden an Korallenriffen und anderen Meeresorganismen, auch ohne jeden Klimawandel.<sup>41</sup>

Neben dem generellen Trend haben Wissenschaftler auch die beobachteten kleineren Schwankungen der  $\text{CO}_2$ -Konzentration

inzwischen immer besser verstanden. So machen sich etwa Vulkanausbrüche oder Änderungen der Meeresströmungen im Pazifik (El-Niño-Ereignisse) auch in der CO<sub>2</sub>-Konzentration bemerkbar, weil die Biosphäre jeweils mit verstärktem oder geringerem Wachstum reagiert.<sup>42</sup> Vereinfacht gesagt: Steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem Jahr weniger als normal, dann war es ein gutes Jahr für die Biosphäre. Und umgekehrt steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Jahren mit verbreiteter Dürre oder Waldbränden (z. B. 2002, 2003) besonders rasch an.

CO<sub>2</sub> ist jedoch nicht das einzige Treibhausgas. Auch die Konzentration anderer Gase wie Methan (CH<sub>4</sub>), FCKW und Distickstoffoxyd (N<sub>2</sub>O) ist durch menschliche Aktivitäten angestiegen. (Die von FCKW sinkt wieder, seitdem ihre Herstellung wegen ihrer zerstörerischen Wirkung auf die Ozonschicht weitgehend eingestellt wurde.) Auch diese Gase tragen zum Treibhauseffekt bei. Die Maßeinheit dafür ist der so genannte Strahlungsantrieb in Watt pro Quadratmeter – diese Kennzahl gibt an, wie stark der Strahlungshaushalt durch ein bestimmtes Gas (oder auch durch eine andere Ursache, etwa durch Änderung der Bewölkung oder der Sonnenaktivität) verändert wird. Die derzeit durch die anthropogenen klimawirksamen Gase verursachte Störung des Strahlungshaushaltes beträgt ~~2,7~~<sup>2,7</sup> Watt/m<sup>2</sup> (die Unsicherheit beträgt dabei  $\pm 15\%$ ). ~~60~~<sup>60</sup> % davon gehen auf das Konto des CO<sub>2</sub>, ~~40~~<sup>40</sup> % sind durch die anderen Gase verursacht.<sup>37</sup>

Das insgesamt wichtigste Treibhausgas ist der Wasserdampf. Es taucht in der obigen Diskussion nur deshalb nicht auf, weil der Mensch seine Konzentration nicht direkt verändern kann. Selbst wenn wir künftig vorwiegend Wasserstoff als Energieträger einsetzen würden, wären die Einflüsse der Wasserdampfemissionen auf das Klima minimal. Unvorstellbar große Mengen an Wasserdampf (mehr als  $4 \times 10^{14}$  Kubikmeter pro Jahr) verdunsten von den Ozeanen, bewegen sich in der Atmosphäre, kondensieren und fallen als Niederschläge wieder zu Boden. Dies ist die zwanzigfache Wassermenge der Ostsee. Innerhalb von zehn Tagen wird damit die gesamte Menge an Wasserdampf in der Atmosphäre ausgetauscht. Die Konzentration (im

globalen Mittel 0,25 %) schwankt deshalb sehr stark von Ort zu Ort und von Stunde zu Stunde – ganz im Gegensatz zu den oben diskutierten langlebigen Treibhausgasen, die sich während ihrer Lebensdauer um den ganzen Erdball verteilen und daher überall fast die gleiche Konzentration haben.

Seit jeher treiben Klimaforscher daher großen Aufwand, um den Wasserkreislauf immer besser zu verstehen und genauer in ihren Modellen zu erfassen – das ist nicht nur wegen der Treibhauswirkung des Wasserdampfes wichtig, sondern vor allem auch zur Berechnung der Niederschlagsverteilung.

Die Wasserdampfkonzentration hängt stark von der Temperatur ab. Warme Luft kann nach dem Clausius-Clapeyron-Gesetz der Physik mehr Wasserdampf halten. Daher erhöht der Mensch indirekt auch die Wasserdampfkonzentration der Atmosphäre, wenn er das Klima aufheizt. Dies ist eine klassische verstärkende Rückkopplung, da eine höhere Wasserdampfkonzentration wiederum die Erwärmung verstärkt.

### **Der Anstieg der Temperatur**

Messdaten aus aller Welt belegen, dass neben der Kohlendioxidkonzentration auch die mittlere Temperatur in den abgelaufenen hundert Jahren deutlich gestiegen ist – und zwar etwa in dem Maße, wie es nach unserem physikalischen Verständnis des Treibhauseffekts auch zu erwarten ist.

Dieser Anstieg der Temperatur ist durch eine Reihe voneinander unabhängiger Datensätze belegt. Die wichtigste Datenbasis sind die Messwerte der weltweiten Wetterstationen (Abb. 2.3, 2.4), die seit dem Jahr 1900 einen globalen Anstieg um 0,7 °C zeigen.<sup>37</sup> Dabei sind lokale Effekte, vor allem das Wachsen von Städten um Wetterstationen herum (der *urban heat island effect*), bereits herauskorrigiert. Dass diese Korrektur erfolgreich und vollständig ist, wurde kürzlich nochmals getestet, indem stürmische Tage mit windstillen Tagen verglichen wurden; nur bei Letzteren wäre der Wärmeinsel-Effekt spürbar. Beide zeigen jedoch genau den gleichen Erwärmungstrend.<sup>43</sup>

Ein anderer wichtiger Datensatz sind die Messungen der

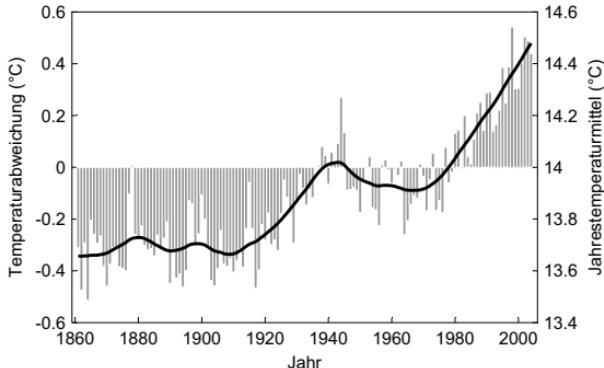


Abb. 2.3: Verlauf der global gemittelten Temperaturen 1861–2004<sup>44</sup> gemessen von Wetterstationen. Gezeigt sind jährliche Werte (graue Balken) sowie der über elf Jahre geglättete Verlauf (Kurve). (Quelle: Hadley Centre<sup>44</sup>)

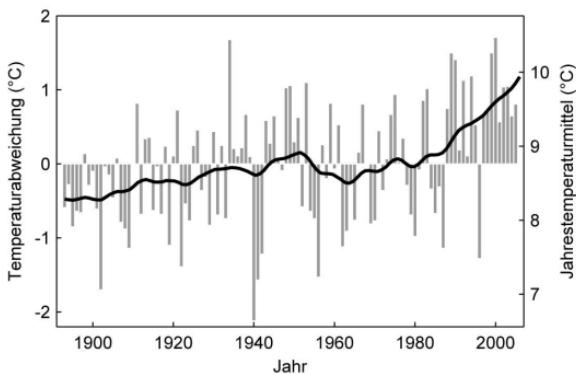


Abb. 2.4: Verlauf der Temperatur an der Wetterstation auf dem Potsdamer Telegrafenberg 1893–2005<sup>45</sup>, eine der längsten ununterbrochenen Messreihen der Erde. Gezeigt sind jährliche Werte (graue Balken) sowie der über elf Jahre geglättete Verlauf (Kurve). Der Erwärmungstrend ist hier etwas stärker als im globalen Mittel; außerdem sind die jährlichen Schwankungen erheblich größer, so wie es bei einer Einzelstation im Vergleich zum globalen Mittel zu erwarten ist. (Quelle: Sekularstation Potsdam<sup>45</sup>)

Meerestemperaturen, die von einem großen Netz von Schiffen durchgeführt werden. Diese zeigen einen Anstieg der Oberflächentemperatur der Meere, der ganz ähnlich verläuft wie über den Kontinenten.<sup>37</sup> Der Trend ist etwas schwächer, wie

man es auch aufgrund der thermischen Trägheit des Wassers erwartet.

Die globale Erwärmung wird auch durch Satellitenmessungen bestätigt, auch wenn die Messreihen erst Ende der 1970er Jahre beginnen. Um die Lufttemperatur zu bestimmen, nutzt man dabei die von den Sauerstoffmolekülen der Luft abgegebene Mikrowellenstrahlung (sog. MSU-Daten). Allerdings kann man so nicht die für uns Menschen vor allem interessanten oberflächennahen Temperaturen bestimmen, da der Satellit Strahlung aus der ganzen Luftsäule misst – teilweise sogar aus der Höhe der Stratosphäre, die sich (hauptsächlich aufgrund des Ozonschwundes) in den vergangenen Jahrzehnten um ca.  $2^{\circ}\text{C}$  abgekühlt hat.<sup>46</sup> Die Interpretation der Satellitendaten ist deshalb (und auch wegen der kurzen Lebensdauer und veränderlichen Bahn der Satelliten) schwierig, und verschiedene Arbeitsgruppen sind bei der Bestimmung des Erwärmungstrends für die unteren Kilometer der Atmosphäre zu recht unterschiedlichen Ergebnissen gekommen. Die Spanne reicht von  $0,12^{\circ}\text{C}$  bis  $0,26^{\circ}\text{C}$  Erwärmung pro Jahrzehnt (seit 1979).<sup>47</sup> Zum Vergleich: die Bodenmessungen (Abb. 2.3) ergeben für diesen Zeitraum  $0,17^{\circ}\text{C}$  pro Jahrzehnt.

Neben den Temperaturmessungen bestätigen auch eine Reihe von anderen Trends indirekt die Erwärmung, etwa der weltweite Gletscherschwund, das Schrumpfen des arktischen Meer-Eises, der Anstieg des Meeresspiegels, das im Jahreslauf zunehmend frühere Tauen und spätere Gefrieren von Flüssen und Seen und das frühere Austreiben von Bäumen. Solche Folgen der Erwärmung werden in Kapitel 3 diskutiert.

### ***Die Ursachen der Erwärmung***

Betrachten wir die Erwärmung im abgelaufenen Jahrhundert genauer (Abb. 2.3), so können wir drei Phasen unterscheiden. Bis 1940 gab es eine frühe Erwärmungsphase, danach stagnierten die Temperaturen bis in die 1970er Jahre, und seither gibt es einen neuen, bislang ungebrochenen Erwärmungstrend. Dass dieser Verlauf nicht dem Verlauf des  $\text{CO}_2$  gleicht (Abb. 2.2),

wurde in den Medien gelegentlich als Argument dafür vorgebracht, dass die Erwärmung nicht durch CO<sub>2</sub> verursacht wird. Diese Argumentation ist jedoch zu simpel. Es versteht sich von selbst, dass CO<sub>2</sub> nicht der einzige Einflussfaktor auf das Klima ist, sondern dass der tatsächliche Klimaverlauf sich aus der Überlagerung mehrerer Faktoren ergibt (siehe Kap. 1).

Doch wie kann man diese Faktoren und ihren jeweiligen Einfluss auseinander halten? In der Klimaforschung ist diese Frage im englischen Fachjargon als das *attribution problem* bekannt, also das Problem der (anteiligen) Zuweisung von Ursachen. Es gibt eine ganze Reihe von Ansätzen zu dessen Lösung. Auch wenn in der Regel dabei komplexe statistische Verfahren zur Anwendung kommen, lassen sich die drei Grundprinzipien der verschiedenen Methoden sehr einfach verstehen.

Das erste Prinzip beruht auf der Analyse des *zeitlichen Verlaufs* der Erwärmung sowie der dafür in Frage kommenden Ursachen, die auch «Antriebe» genannt werden. Die Idee ist damit die gleiche wie bei dem oben genannten zu simplen Argument – nur dass dabei die Kombination mehrerer möglicher Ursachen betrachtet wird, nicht nur eine einzige. Zu diesen Ursachen gehören neben der Treibhausgaskonzentration auch Veränderungen der Sonnenaktivität, der Aerosolkonzentration (Luftverschmutzung mit Partikeln, die aus Vulkanausbrüchen oder Abgasen stammen) und interne Schwankungen im System Ozean – Atmosphäre (als stochastische Komponente). Dabei braucht man die Stärke der gesuchten Einflüsse nicht zu kennen – ein wichtiger Vorteil mit Blick auf die Aerosole und die Sonnenaktivität, deren qualitativen Zeitverlauf man zwar relativ gut kennt, über deren Amplituden (also die Stärke der Schwankungen) es aber noch erhebliche Unsicherheit gibt. Im Ergebnis zeigt sich, dass zumindest der zweite Erwärmungsschub seit den 1970er Jahren nicht mit natürlichen Ursachen zu erklären ist. Mit anderen Worten: Wie groß der Einfluss natürlicher Störungen auf die Mitteltemperatur auch sein mag, sie können die Erwärmung der letzten 30 Jahre nicht herbeigeführt haben. Der Grund hierfür liegt letztlich darin, dass mögliche natürliche Ursachen einer Erwärmung (etwa die Sonnenaktivität) seit den

1940er Jahren keinen Trend aufweisen, sodass unabhängig von der Amplitude lediglich die Treibhausgase in Frage kommen.<sup>48</sup>

Das zweite Prinzip beruht auf der Analyse der *räumlichen Muster* der Erwärmung (Fingerabdruck-Methode),<sup>49</sup> die sich bei verschiedenen Ursachen unterscheiden. So fangen Treibhausgase die Wärme vor allem in Bodennähe ein und kühlen die obere Atmosphäre; bei Änderungen der Sonnenaktivität ist dies anders. Durch Modellsimulationen lassen sich die Muster berechnen und dann mit den beobachteten Erwärmungsmustern verglichen. Solche Studien wurden von vielen Forschergruppen mit unterschiedlichen Modellen und Datensätzen gemacht. Sie ergeben einhellig, dass der Einfluss der gestiegenen Treibhausgaskonzentration inzwischen dominant und mit seinem charakteristischen «Fingerabdruck» in den Messdaten nachweisbar ist.

Besonders aussagekräftig ist eine Kombination der beiden oben genannten Methoden. Eine solche Studie ergab Ende der 1990er Jahre ebenfalls, dass der Temperaturverlauf im 20. Jahrhundert nicht durch natürliche Ursachen erklärbar ist.<sup>50</sup> Die Erwärmung bis 1940 könnte sowohl durch eine Kombination von Treibhausgasen und interner Variabilität erklärt werden als auch teilweise durch einen Anstieg der Sonnenaktivität (die beste Abschätzung für deren Beitrag ergab  $0,13^{\circ}\text{C}$ ). Der weitere Verlauf ergibt sich aus der Überlagerung des abkühlenden Effekts der Aerosole und des wärmenden Effekts der Treibhausgase, die sich während der Stagnationsphase von 1940 bis 1970 etwa die Waage hielten.

Das dritte Prinzip baut auf die Kenntnis der *Amplitude* der unterschiedlichen Antriebe. Für die Treibhausgase ist diese gut bekannt (~~2,7~~ Watt/m<sup>2</sup>, siehe oben), für die anderen wichtigen Einflussgrößen sind die Abschätzungen allerdings noch mit erheblicher Unsicherheit behaftet. Dennoch ergibt sich auch aus diesen Studien abermals, dass der menschliche Einfluss auf die Klimaentwicklung des 20. Jahrhunderts dominant ist. Eine häufig in Klimamodellen verwendete Abschätzung der Sonnenaktivität<sup>51</sup> ergibt einen Anstieg im 20. Jahrhundert um  $0,35\text{ W/m}^2$ . Selbst wenn dies um ein Mehrfaches unterschätzt wäre (was aus

verschiedenen Gründen unwahrscheinlich ist), wäre der menschliche Antrieb immer noch stärker. Neuere Erkenntnisse deuten sogar eher darauf hin, dass diese Abschätzung die Veränderung der Sonneneinstrahlung noch erheblich überschätzt.<sup>52</sup>

Keine dieser Studien ist für sich genommen ein endgültiger Beweis dafür, dass der Mensch die Hauptursache der Klimaerwärmung des 20. Jahrhunderts ist. Jede der beschriebenen Methoden hat ihre Grenzen und beruht auf mehr oder weniger gut gesicherten Annahmen. Allerdings sind diese bei jeder Methode verschieden. Da alle Verfahren unabhängig voneinander konsistent zum gleichen Ergebnis kommen, müssen wir mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass der menschliche Einfluss inzwischen tatsächlich überwiegt.

Eine aktuelle Studie zeigt zudem, dass durch den Treibhauseffekt im letzten Jahrzehnt das Klimasystem im Ungleichgewicht ist: Die Erde nimmt  $0,85 \text{ W/m}^2$  mehr an Sonnenenergie auf, als sie wieder ins Weltall abstrahlt.<sup>53</sup> Diese Zahl ergibt sich zunächst aus einer Modellrechnung, wird aber unabhängig durch ozeanische Messungen bestätigt, denn diese Wärmemenge wird im Meer gespeichert. Auch die Zunahme der langwelligen Strahlung an der Erdoberfläche durch den verstärkten Treibhauseffekt ist inzwischen durch Schweizer Kollegen durch ein Strahlungsmessnetz in den Alpen direkt gemessen worden,<sup>1</sup> sodass die durch uns Menschen verursachten Veränderungen in der Wärmebilanz der Erde als gut verstanden gelten können.

In der öffentlichen Wahrnehmung spielt die Frage eine wichtige Rolle, wie «ungewöhnlich» die derzeitige Erwärmung ist – etwa, ob es im Mittelalter in der Nordhemisphäre schon einmal wärmer war (wahrscheinlich nicht, siehe Abb. 1.6), oder ob es in der Arktis in den 1930er Jahren bereits ähnlich warm war wie heute (was der Fall ist). Daraus wird dann versucht, auf die Ursache zu schließen («Wenn es früher schon mal so warm war, muss es ein natürlicher Zyklus sein»). Dies wäre jedoch ein Fehlschluss: Ob es im Mittelalter bereits wärmer war (etwa wegen einer besonders hohen Sonnenaktivität) oder nicht – wir könnten daraus nicht schließen, inwieweit die *aktuelle* Erwärmung durch natürliche Faktoren oder den Menschen bedingt

ist. Wie in Kapitel 1 erläutert, können Klimaveränderungen unterschiedliche Ursachen haben. Welche davon tatsächlich wirkte, muss in jedem Einzelfall geprüft werden. Dass natürliche Ursachen *prinzipiell* auch eine deutlich stärkere Erwärmung verursachen könnten als der Mensch, ist sicher: Für Beispiele muss man nur weit genug in der Klimageschichte zurückgehen (siehe Kap. 1). Über die Ursache des aktuellen Klimawandels sagt uns dies nichts. Es zeigt uns jedoch, dass das Klima nicht unerschütterlich stabil ist: Es belegt, dass das Klima nicht durch stark abschwächende Rückkopplungen stabilisiert wird, die größere Ausschläge verhindern würden.

### Die Klimasensitivität

Wie stark ist die Wirkung von CO<sub>2</sub> und den anderen anthropogenen Treibhausgasen auf das Klima? Anders ausgedrückt: Wenn sich der Strahlungshaushalt um ~~2,7~~<sup>A</sup> Watt/m<sup>2</sup> (oder einen anderen Betrag) ändert, wie stark erhöht sich dann die Temperatur? Diese Frage ist die entscheidende Frage für unser gegenwärtiges Klimaproblem. Klimaforscher beschreiben die Antwort darauf mit einer Maßzahl, der so genannten Klimasensitivität. Man kann sie in Grad Celsius pro Strahlungseinheit (°C/(Watt/m<sup>2</sup>)) angeben. Einfacher und bekannter ist die Angabe der Erwärmung im Gleichgewicht infolge der Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration (von 280 auf 560 ppm), was einem Strahlungsantrieb von knapp 4 Watt/m<sup>2</sup> entspricht.

Wir erwähnten zu Beginn des Kapitels bereits die dafür als gesichert geltende Spanne von ~~1,5~~<sup>A</sup> bis 4,5 °C. Wie kann man diese Klimasensitivität bestimmen? Dafür gibt es drei grundsätzlich verschiedene Methoden.

(1) Man kann von der Physik ausgehen, nämlich von der im Labor gemessenen Strahlungswirkung von CO<sub>2</sub>, die ohne jede Rückkopplung direkt eine Erwärmung um 1,2 °C bei einer Verdoppelung der Konzentration bewirken würde. Dann muss man noch die Rückkopplungen im Klimasystem berücksichtigen: Im Wesentlichen Wasserdampf, Eis-Albedo und Wolken. Dazu benutzt man Modelle, die am gegenwärtigen Klima mit

seinem Jahresgang und zunehmend auch an anderen Klimazuständen (etwa Eiszeitklima) getestet sind. Damit ergibt sich eine Klimasensitivität von ~~±,5~~ bis 4,5 °C. Die Unsicherheit stammt überwiegend vom Unwissen über das Verhalten der Wolken. Derzeit laufen umfangreiche Messprogramme, bei denen an verschiedenen Orten der Erde die kontinuierlich gemessene Wolkenbedeckung mit Modellberechnungen verglichen wird, um diese Unsicherheit weiter zu verringern.

(2) Man kann von Messdaten ausgehen und aus vergangenen Klimaschwankungen durch eine so genannte Regressionsanalyse den Einfluss einzelner Faktoren zu isolieren versuchen. Dazu benötigt man sehr gute Daten und muss sehr sorgfältig alle Faktoren berücksichtigen; man muss dafür einen Zeitraum nehmen, in dem sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration möglichst stark verändert hat, während sich andere die Klimasensitivität beeinflussende Faktoren von der heutigen Situation nicht zu sehr unterscheiden sollten (etwa die Lage der Kontinente). Daher eignen sich für solche Studien vor allem die Eiszeitzyklen der letzten Jahrhunderttausende, bei denen die CO<sub>2</sub>-Konzentration stark schwankte. Das für die Bohrung des Wostok-Eiskerns in der Antarktis (Abb. 1.1) verantwortliche französische Team um Claude Lorius hat 1990 anhand dieser Daten eine solche Analyse durchgeführt;<sup>3</sup> sie ergab eine Klimasensitivität von 3 bis 4 °C.

(3) Eine dritte Methode ist erst in den letzten Jahren durch Fortschritte in der Modellentwicklung und Computerleistung möglich geworden. Dabei nimmt man ein Klimamodell und variiert darin systematisch die wesentlichen noch unsicheren Parameterwerte innerhalb ihrer Unsicherheitsspanne (z. B. Parameter, die bei der Berechnung der Wolkenbedeckung verwendet werden). Man erhält dadurch eine große Zahl verschiedener Modellversionen – in einer kürzlich am Potsdam-Institut abgeschlossenen Untersuchung waren es eintausend Versionen.<sup>54</sup> Weil in diesen Modellversionen die oben genannten Rückkopplungen unterschiedlich stark ausfallen, haben sie alle eine andere Klimasensitivität. Dies allein schon gibt einen Hinweis darauf, welche Spanne der Klimasensitivität bei extremen Annahmen als physikalisch noch denkbar gelten kann. In unserer Studie er-

gaben sich in den extremsten Modellversionen Klimasensitivitäten von  $1,3^{\circ}\text{C}$  und  $5,5^{\circ}\text{C}$ .

Im nächsten Schritt werden alle tausend Modellversionen mit Beobachtungsdaten verglichen und jene (fast 90 %) als unrealistisch aussortiert, die das heutige Klima nicht anhand eines zuvor definierten Kriterienkataloges hinreichend gut wiedergeben. Damit wurde die Klimasensitivität bereits etwas eingeschränkt (auf  $1,4$  bis  $4,8^{\circ}\text{C}$ ). Entscheidend für die Methode ist jedoch ein anderer Test: Mit allen Modellversionen wurde das Klima auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit simuliert und all jene Modellversionen aussortiert, die das Eiszeitklima nicht realistisch wiedergaben. Das Eiszeitklima ist ein guter Test, weil es die jüngste Periode der Klimageschichte ist, in der ein wesentlich anderer  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre herrschte als heute. Zudem gibt es eine Vielzahl guter Klimadaten aus dieser Zeit. Ist die Klimasensitivität im Modell zu hoch, ergibt sich ein unrealistisch kaltes Eiszeitklima. So konnte die Obergrenze der Klimasensitivität auf  $4,3^{\circ}\text{C}$  eingeschränkt werden. Andere Ensemble-Studien konnten die untere Grenze auf etwa  $2^{\circ}\text{C}$  eingrenzen.<sup>55</sup>

Zusammenfassend kann man sagen, dass drei ganz unterschiedliche Methoden jeweils zu Abschätzungen der Klimasensitivität kommen, die konsistent mit der noch aus den 1970er Jahren stammenden (beim damaligen Kenntnisstand noch auf tönernen Füßen stehenden) «traditionellen» Abschätzung von  $1,5$  bis  $4,5^{\circ}\text{C}$  sind. Dabei kann man einen Wert nahe an  $3^{\circ}\text{C}$  als den wahrscheinlichsten Schätzwert ansehen. Verschiedene Ensemble-Studien mit vielen Modellversionen (Methode 3) zeigen jeweils, dass die allermeisten der Modellversionen nahe  $3^{\circ}\text{C}$  liegen. Ein weiteres Indiz ist, dass die neuesten und besten der großen Klimamodelle in ihrer Klimasensitivität zunehmend bei Werten nahe  $3^{\circ}\text{C}$  konvergieren (Methode 1) – Modelle nahe den Rändern der traditionellen Spanne sind meist ältere Typen mit größerer räumlicher Auflösung und einer weniger detaillierten Beschreibung der physikalischen Prozesse. Ein Wert von  $3^{\circ}\text{C}$  ist zudem konsistent mit den Eiszeitdaten (Methoden 2 und 3). Es ist daher unseres Erachtens eine realistische Zusammenfassung des Sachstandes, die Klimasensitivität als  $3 \pm 1^{\circ}\text{C}$  anzuge-

ben, wobei die  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  etwa der in der Physik bei der Fehlerdarstellung üblichen 95 %-Spanne entsprechen.

Wir verwenden auf die Klimasensitivität so viel Zeit, weil deren Wert für die Zukunft wichtiger ist als alles, was zuvor in diesem Kapitel über den bereits beobachteten Temperaturanstieg und seine Verursachung durch den Menschen gesagt wurde. Die Klimasensitivität sagt uns nämlich, welchen Klimawandel wir in Zukunft zu erwarten haben, wenn wir einen bestimmten Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration verursachen. Für die Wahl des künftigen Energiesystems ist dies die entscheidende Frage. Dagegen ist es dafür unerheblich, ob der Einfluss des Menschen bereits heute in Messdaten nachweisbar ist oder nicht.

Sind die Abschätzungen der Klimasensitivität mit dem jüngst beobachteten Erwärmungstrend vereinbar? Der derzeitige Strahlungsantrieb der Treibhausgase ( $2,7\text{ Watt/m}^2$ ) würde mit dem wahrscheinlichsten Wert der Klimasensitivität ( $3^{\circ}\text{C}$  für Verdopplung des  $\text{CO}_2$ ) eine Erwärmung von ca.  $+0,8^{\circ}\text{C}$  ergeben – allerdings erst im Gleichgewicht, also nach langer Zeit. Durch die Trägheit der Ozeane hinkt die Reaktion des Klimasystems aber hinterher – nach Modellrechnungen sollten bislang etwa die Hälfte bis zwei Drittel der Gleichgewichtserwärmung realisiert sein, also ca.  $1^{\circ}\text{C}$ . Man sieht an dieser einfachen Überschlagsrechnung, dass die Treibhausgase (im Gegensatz zu allen anderen Ursachen) problemlos die gesamte Erwärmung des 20. Jahrhunderts erklären können. Sogar noch etwas darüber hinaus – die geringere beobachtete Erwärmung lässt sich dadurch erklären, dass die Treibhausgase ja nicht der einzige Einflussfaktor sind. Es gibt auch noch den kühlenden Effekt der besonders zwischen 1940 und 1970 ebenfalls durch menschliche Aktivitäten angestiegenen Aerosolkonzentration, der eine Größenordnung von ca.  $1\text{ Watt/m}^2$  hat. Genauere Berechnungen müssen mit Modellen erfolgen, da bei den Aerosolen auch die räumliche Verteilung des Antriebs wichtig ist und eine einfache Betrachtung globaler Werte nicht ausreicht. Eine Reihe solcher Modelle, die im Bericht des IPCC beschrieben sind, ergeben einen Beitrag anthropogener Ursachen (Treibhausgase und Aerosole) zur Erwärmung im 20. Jahrhundert von ca.  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

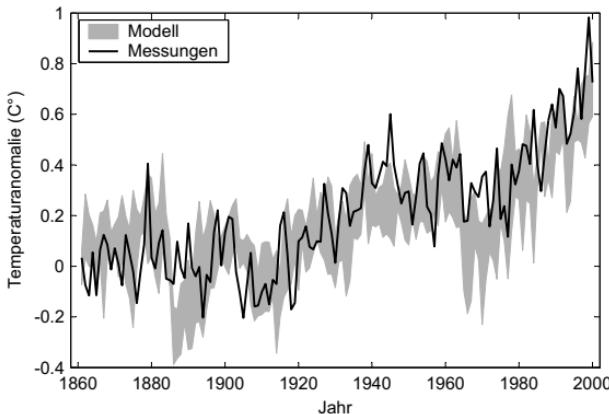


Abb. 2.5: Verlauf der globalen Temperatur 1860–1999, aus Messdaten (schwarze Kurve) und aus einem Ensemble von vier Modellsimulationen (grauer Bereich). (Quelle: Stott et al. 2000<sup>56</sup>)

Solche Modellberechnungen zeigen auch eine gute Übereinstimmung zwischen dem beobachteten zeitlichen Verlauf der Temperatur und demjenigen, der bei Berücksichtigung der verschiedenen Antriebsfaktoren vom Modell berechnet wird (Abb. 2.5). Die im 20. Jahrhundert beobachtete Klimaerwärmung ist daher vollkommen konsistent mit dem, was in der obigen Diskussion über die Klimasensitivität gesagt wurde. Näher eingrenzen lässt sich die Klimasensitivität mit Daten des 20. Jahrhunderts allerdings bislang nicht, weil die Unsicherheit über die Aerosolwirkung zu groß ist – falls deren kühlende Wirkung sehr groß ist, wäre auch eine sehr hohe Klimasensitivität noch vereinbar mit dem gemessenen Temperaturverlauf.

### **Projektionen für die Zukunft**

Um die Auswirkungen eines künftigen weiteren Anstiegs der Treibhausgaskonzentration abzuschätzen, wird in der Klimaforschung in Modellrechnungen eine Reihe von Zukunftsszenarien durchgespielt. Diese Szenarien sind keine Prognosen. Sie dienen vor allem dazu, die Konsequenzen verschiedener Handlungsoptionen zu beleuchten, und funktionieren nach dem

«Wenn-dann-Prinzip»: «Wenn das CO<sub>2</sub> um X ansteigen würde, würde dies zu einer Erwärmung um Y führen.»

Es soll also nicht vorhergesagt werden, wie viel CO<sub>2</sub> künftig emittiert wird, sondern es sollen die möglichen Folgen untersucht werden. Falls sich die Weltgemeinschaft dafür entscheidet, Klimaschutz zu betreiben und die CO<sub>2</sub>-Konzentration zu stabilisieren, treten die pessimistischeren Szenarien nicht ein – das bedeutet natürlich nicht, dass dies dann «falsche Vorhersagen» waren, vielmehr wären diese Szenarien eine rechtzeitige Vorwarnung gewesen.

Darüber hinaus untersuchen die Szenarien in der Regel nur den *menschlichen* Einfluss auf das Klima, welchem sich aber auch noch natürliche Klimaschwankungen überlagern. Eine bestimmte Szenariorechnung könnte etwa zeigen, dass angenommene anthropogene Emissionen bis zum Jahr 2050 zu einer weiteren Erwärmung um 1 °C im globalen Mittel führen. Die tatsächliche Temperatur im Jahr 2050 wird aber wahrscheinlich davon abweichen, selbst wenn die Emissionen wie angenommen eintreten und die Rechnung vollkommen korrekt war – natürliche Faktoren könnten das Klima etwas kühler oder wärmer machen. Sowohl Modellrechnungen als auch vergangene Klimadaten legen allerdings nahe, dass diese natürlichen Schwankungen über einen Zeitraum von 50 Jahren sehr wahrscheinlich nur wenige Zehntel Grad betragen werden. Im Extremfall könnten aber sehr große Vulkanausbrüche oder ein Meteoriteneinschlag zumindest für einige Jahre die gesamte Erwärmung zunichte machen und sogar eine Abkühlung unter das heutige Niveau hervorrufen. Die Naturgewalten werden immer zu einem gewissen Grade unberechenbar bleiben. Dies sollte den Menschen jedoch nicht daran hindern, sich über die Konsequenzen seines eigenen Handelns im Klaren zu sein.

Zur Berechnung von Klimaszenarien benötigt man zunächst Emissionsszenarien, also Annahmen über den künftigen Verlauf der menschlichen Emissionen von Kohlendioxid, anderen Treibhausgasen und Aerosolen. Zwischen 1996 und 2000 hat eine Gruppe von Wirtschaftswissenschaftlern für den IPCC ein ganzes Bündel von 40 solcher Szenarien entwickelt und im *Special*

*Report on Emission Scenarios* beschrieben; diese Szenarien sind daher als SRES-Szenarien bekannt.<sup>57</sup> Sie decken die ganze Bandbreite von ökonomisch plausiblen künftigen Entwicklungen ab. Am pessimistischen Ende findet man eine Vervierfachung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahre 2100; die optimistische Variante ist ein moderater weiterer Anstieg, gefolgt von einer allmählichen Abnahme auf einen Bruchteil der heutigen Werte. Explizite Klimaschutzmaßnahmen berücksichtigen diese Szenarien nicht (Klimaschutzstrategien werden wir in Kapitel 5 diskutieren).

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration steigt in diesen Szenarien bis zum Jahr 2100 auf 540 bis 970 ppm (also ein Anstieg von 90% bis 250% über den vorindustriellen Normalwert von 280 ppm), wenn man annimmt, dass Ozeane und Biosphäre einen unveränderten Anteil unserer Emissionen aufnehmen. Berücksichtigt man noch, dass der Klimawandel auch diese Kohlenstoffaufnahme verändern kann (die so genannte Rückkopplung des Kohlenstoffkreislaufes), dann vergrößert sich diese Spanne auf 490 bis 1260 ppm. Wir sehen also, dass diese Szenarien ein sehr breites Spektrum künftiger Möglichkeiten abdecken. Der gesamte anthropogene Strahlungsantrieb im Jahr 2100 (alle Treibhausgase und Aerosole) variiert in diesen Szenarien zwischen 4 und 9 Watt/m<sup>2</sup> – trotz der sehr unterschiedlichen Annahmen über die Emissionen also nur um etwas mehr als einen Faktor zwei.

Um die denkbaren Auswirkungen dieser Szenarien auf die globale Mitteltemperatur zu berechnen, wurden für den letzten IPCC-Bericht Klimamodelle damit angetrieben, die weitgehend die Spanne der Unsicherheit in der Klimasensitivität erfassen (~~diese Modelle deckten eine Spanne von 1,7 bis 4,2 °C ab~~). Im Ergebnis ergab sich eine Erwärmung um ~~1,4 bis 5,8 °C~~ für den Zeitraum 1990 bis 2100 (Abb. 2.6), wobei die Kommastelle natürlich nicht zu ernst genommen werden sollte. Anders ausgedrückt: Wir müssen ohne Klimaschutzmaßnahmen bis zum Jahr 2100 eine anthropogene Erwärmung um knapp 2 °C bis mehr als ~~6~~ °C über den vorindustriellen Wert hinaus erwarten.<sup>58</sup>

Selbst bei sehr optimistischen Annahmen sowohl über die künftigen Emissionen als auch über die Klimasensitivität wird

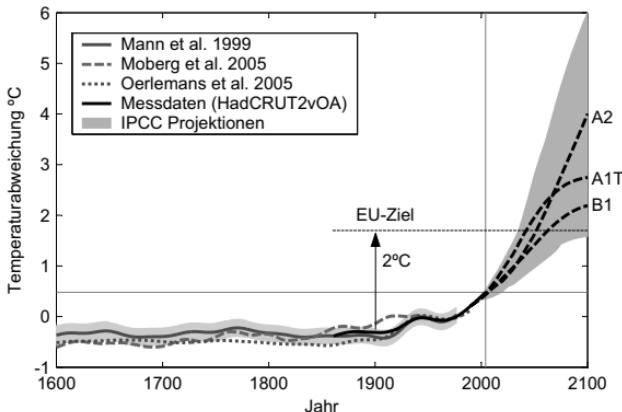


Abb. 2.6: Klimaentwicklung in Vergangenheit und Zukunft. Gezeigt sind die Messdaten der Wetterstationen (globales Mittel) und für die Zukunft die Spanne aller IPCC-Szenarien bis zum Jahr 2100 sowie zur Illustration drei Beispieldaten (A2, A1T und B2). Selbst im optimistischsten der Szenarien wird die Erwärmung weit über die natürlichen Schwankungen der abgelaufenen Jahrhunderte hinausgehen. Dies gilt unabhängig von der Unsicherheit über den vergangenen Klimaverlauf: Gezeigt sind hierzu die Rekonstruktionen aus Abb. 1.6. Das Ziel der EU-Klimapolitik von maximal 2°C Erwärmung könnte ohne effektive Gegenmaßnahmen bereits in einigen Jahrzehnten überschritten werden.

die Erwärmung insgesamt also mindestens das Dreifache dessen betragen, was wir bislang im 20. Jahrhundert erlebt haben. Unser Klima wird Temperaturen erreichen, wie es sie wahrscheinlich seit mindestens 100 000 Jahren nicht auf der Erde gegeben hat. Im pessimistischen Fall dagegen werden wir die mittlere Temperatur der Erde von ca. 15°C auf über 20°C erhöhen – eine Erwärmung, die wohl selbst über viele Jahrmillionen einzigartig wäre.

Könnte es noch schlimmer kommen? Wenn auch nach gegenwärtigem Kenntnisstand nicht sehr wahrscheinlich, ist leider auch dies nicht ausgeschlossen – neuere Studien, ~~die seit der Publikation des letzten IPCC-Berichts durchgeführt wurden~~, deuten auf die Gefahr einer größeren Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus der Biosphäre infolge der Erwärmung hin. Dadurch würde die Konzentration auf noch höhere Werte steigen, und sogar eine globale Erwärmung um 7 oder 8°C wäre möglich.<sup>59</sup>

Könnte es auch glimpflicher ausgehen als 2°C Erwärmung? Nichts spricht dafür, dass die Natur uns auf einmal einen noch größeren Anteil unserer Emissionen abnehmen wird als bislang. Und alles spricht gegen eine Klimasensitivität, die noch geringer ist als ~~1,5~~°C. Auch auf eine rasche und ungewöhnlich starke Abnahme der Sonnenaktivität oder auf kühlende Vulkaneruptionen können wir kaum hoffen. So liegt es letztlich ganz in unserer Hand, die Klimaerwärmung in erträglichen Grenzen zu halten.

### **Wie sicher sind die Aussagen?**

Die Frage nach der Sicherheit unseres Wissens kann man auch so stellen: Welche neuen Ergebnisse wären denkbar, die diese Erkenntnis erschüttern? Nehmen wir hypothetisch an, man würde schwere Fehler in einer ganzen Reihe von Datenanalysen finden und käme zur Erkenntnis, das Klima sei im Mittelalter doch bereits wärmer gewesen als heute. Daraus müsste man folgern, dass die Erwärmung im 20. Jahrhundert um 0,6°C nicht ganz so ungewöhnlich ist wie bislang gedacht und dass auch natürliche Ursachen noch im letzten Jahrtausend ähnlich große Schwankungen verursacht hätten. Es würde folgen, dass die natürlichen Schwankungen, die sich jedem menschlichen Einfluss auf das Klima überlagern, größer sind als gedacht. Es würde jedoch *nicht* daraus folgen, dass auch die Erwärmung im 20. Jahrhundert natürliche Ursachen hat, denn die im Abschnitt «Die Ursachen der Erwärmung» genannten Argumente bleiben davon unberührt. Und, das ist das Entscheidende: Es würde *nicht* daraus folgen, dass die Klimasensitivität geringer ist als bislang angenommen. Wenn überhaupt, könnte man aus größeren Schwankungen in der Vergangenheit auf eine größere Klimasensitivität schließen – aber auch dies ist hier nicht der Fall, weil die oben geschilderten Abschätzungen der Klimasensitivität die Proxy-Daten des abgelaufenen Jahrtausends überhaupt nicht verwenden, sie sind also von möglichen neuen Erkenntnissen über diese Zeitperiode weitgehend unabhängig. Solange die Abschätzung der Klimasensitivität nicht revidiert wird, bleibt auch die Warnung vor der Wirkung unserer CO<sub>2</sub>-Emissionen unverändert.

Nehmen wir an, neue Erkenntnisse würden eine starke Wirkung der Sonnenaktivität auf die Wolkenbedeckung ergeben, etwa durch Veränderung des Erdmagnetfeldes und der auf die Erde auftreffenden kosmischen Strahlung (ein solcher Zusammenhang wird seit langem diskutiert, hat sich jedoch bislang nicht erhärten lassen). Man hätte dann einen Mechanismus gefunden, wodurch die Sonnenschwankungen sich wesentlich stärker auf das Klima auswirken als bislang gedacht. Daraus würde jedoch *nicht* folgen, dass die Erwärmung der letzten Jahrzehnte durch Sonnenaktivität verursacht wurde, denn weder Sonnenaktivität noch kosmische Strahlung weisen seit 1940 einen Trend auf.<sup>48</sup> Einen Erwärmungstrend kann man so deshalb nicht erklären. Und nochmals: Die Abschätzungen der Klimasensitivität, und damit der zukünftigen Erwärmung durch unsere Emissionen, blieben davon unberührt.

Diese Beispiele illustrieren eine Grundtatsache: Der einzige wissenschaftliche Grund für eine Entwarnung wäre, wenn man die Abschätzung der Klimasensitivität stark nach unten korrigieren müsste. Und dafür gibt es nur eine Möglichkeit: Es müsste starke negative Rückkopplungen geben, die die Reaktion des Klimasystems auf die Störung des Strahlungshaushaltes durch CO<sub>2</sub> abschwächen.

Der Amerikaner Richard Lindzen, der vielen als der einzige fachlich ernst zu nehmende Skeptiker einer anthropogenen Erwärmung gilt, verwendet daher auch genau dieses Argument. Er postuliert einen starken negativen Rückkopplungseffekt in den Tropen, den von ihm so genannten Iris-Effekt, der dort eine Klimaänderung verhindert. Er hält deshalb die Klimasensitivität für praktisch gleich null. Auf das Argument, es habe in der Vergangenheit Eiszeiten und andere starke Klimaänderungen gegeben, erwiderte Lindzen, dabei habe sich nur die Temperatur der hohen Breitengrade verändert, die globale Mitteltemperatur jedoch kaum.<sup>60</sup> Zu der Zeit, als Lindzen seine Iris-Theorie aufstellte, konnte man in der Tat aufgrund der unsicheren Daten noch so argumentieren; inzwischen gilt unter Paläoklimatologen durch neue und verbesserte Proxy-Daten aber als gesichert, dass sich auch die Temperaturen der Tropen bei früheren Klimaän-

derungen um mehrere Grad verändert haben. Auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit lag auch die globale Mitteltemperatur nach heutiger Kenntnis 4 bis 7°C unterhalb der derzeitigen. Deshalb (und weil er bislang empirische Belege für den Iris-Effekt schuldig geblieben ist) konnte Lindzen kaum einen Fachkollegen für seine Hypothese gewinnen.

Die erheblichen Klimaschwankungen der Klimgeschichte sind das stärkste Argument dafür, dass das Klimasystem tatsächlich sensibel reagiert und die heutige Abschätzung der Klimasensitivität so falsch nicht sein kann. Gäbe es starke negative Rückkopplungen, die eine größere Klimaänderung verhindern würden, dann wären auf einmal die meisten Daten der Klimgeschichte unverständlich. Hunderte von Studien wären allesamt falsch, und wir müssten beim Schreiben der Klimgeschichte ganz von vorne anfangen. Doch eine solche noch unbekannte negative Rückkopplung wäre der einzige Ausweg aus der ansonsten unausweichlichen Folgerung, dass eine Erhöhung der Treibhausgaskonzentration die von den Klimatologen vorhergesagte Erwärmung verursachen wird. Es wäre töricht, auf die winzige Chance zu hoffen, dass künftig eine solche negative Rückkopplung entdeckt werden wird.

### **Zusammenfassung**

Einige wichtige Kernaussagen haben sich in den abgelaufenen Jahrzehnten der Klimaforschung so weit erhärtet, dass sie unter den aktiven Klimaforschern allgemein als gesichert gelten und nicht mehr umstritten sind. Zu diesen Kernaussagen gehören:

(1) Die Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre ist seit ca. 1850 stark angestiegen, von dem für Warmzeiten seit mindestens 400 000 Jahren typischen Wert von 280 ppm auf inzwischen 380 ppm.

(2) Für diesen Anstieg ist der Mensch verantwortlich, in erster Linie durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, in zweiter Linie durch Abholzung von Wäldern.

(3) CO<sub>2</sub> ist ein klimawirksames Gas, das den Strahlungshaushalt der Erde verändert: Ein Anstieg der Konzentration führt zu

einer Erwärmung der oberflächennahen Temperaturen. Bei einer Verdoppelung der Konzentration liegt die Erwärmung im globalen Mittel sehr wahrscheinlich bei  $3 \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

(4) Das Klima hat sich im 20. Jahrhundert deutlich erwärmt (global um ca.  $0,6^{\circ}\text{C}$ , in Deutschland um ca.  $1^{\circ}\text{C}$ ); die Temperaturen der abgelaufenen zehn Jahre waren global die wärmsten seit Beginn der Messungen im 19. Jahrhundert und seit mindestens mehreren Jahrhunderten davor.

(5) Der überwiegende Teil dieser Erwärmung ist auf die gestiegene Konzentration von  $\text{CO}_2$  und anderen anthropogenen Gasen zurückzuführen; ein kleinerer Teil auf natürliche Ursachen, u. a. Schwankungen der Sonnenaktivität.

Aus den Punkten 1 bis 3 folgt, dass die bislang schon sichtbare Klimaänderung nur ein kleiner Vorbote viel größerer Veränderungen ist, die bei einem ungebremsten weiteren Anstieg der Treibhausgaskonzentration eintreten werden. Bei Annahme einer Reihe plausibler Szenarien für die künftigen Emissionen, und unter Berücksichtigung der verbleibenden Unsicherheiten in der Berechenbarkeit des Klimasystems, rechnet das IPCC in seinem letzten Bericht mit einem globalen Temperaturanstieg von ~~1,4~~ bis  $5,8^{\circ}\text{C}$  bis zum Jahr 2100 (über das Niveau von 1990 hinaus). Dabei sind nach neueren Studien auch noch höhere Werte nicht ausgeschlossen, wenn es zu verstärkenden Rückkopplungen im Kohlenstoffkreislauf kommen sollte.

Die letzte vergleichbar große globale Erwärmung gab es, als vor ca. 15 000 Jahren die letzte Eiszeit zu Ende ging: Damals erwärmte sich das Klima global um ca.  $5^{\circ}\text{C}$ . Doch diese Erwärmung erfolgte über einen Zeitraum von 5000 Jahren – der Mensch droht nun einen ähnlich einschneidenden Klimawandel innerhalb eines Jahrhunderts herbeizuführen. Einige der möglichen Auswirkungen werden wir im nächsten Kapitel diskutieren.