



# Klima und Klimawandel

Das Klima wandelt sich. Doch: Was ist überhaupt Klima? Warum verändert es sich? Und ist diese Klimaveränderung Besorgnis erregend? Diesen Fragen wird im Folgenden nachgegangen.

## Grundlagen

### Wetter und Klima

Die Meteorologen unterscheiden zwischen Wetter, Witterung und Klima. Von Wetter sprechen sie, wenn sie den augenblicklichen Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort beschreiben. Zu bestimmten Jahreszeiten ist dort eine Witterung typisch, also das über eine gewisse Anzahl von Tagen gemittelte Wetter. Durch Mittelung der Witterung über lange Zeiten, international sind 30-Jahreszeiträume üblich, erhält man das Klima.

### Klimanormale

Die meteorologische Weltorganisation (World Meteorological Organisation, WMO, Genf) hat so genannte Klimanormalperioden festgelegt. Dabei handelt es sich um 30-Jahres-Zeiträume. Die beiden letzten abgeschlossenen Klimanormalperioden umfassen die Jahre 1931–1960 und 1961–1990. Klimaveränderungen werden häufig auf diese Klimanormalperioden bezogen. Dies ist jedoch nicht zwingend. So kann es im Einzelfall auch sinnvoll sein, eine abweichende, längere oder kürzere Periode zum Vergleich heranzuziehen.

Wetter und folglich auch das für eine Region typische Klima entsteht durch in der Atmosphäre vorhandene Energie, die fast ausschließlich von der Sonne stammt. Durch die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Landmassen und Meere sowie die Erdrotation kommt es zu Energie-Austauschprozessen, die wir als Wind und Regen spüren. So wird die Sonnenenergie von Gebieten, wo sie reichlich vorhanden ist – wie dem Äquator – auch in Regionen gebracht, die ohne solche großräumigen Strömungssysteme durchschnittlich viel kälter wären.

### Alles eine Frage der Energie

Die Sonnenenergie ist also der Motor für das Leben auf der Erde. Als passiver Körper muss diese im zeitlichen Durchschnitt ebenso viel Energie aufnehmen, wie sie wieder abgibt. Aus der – durch Satellitenmessungen genau bekannten – Energie, die uns die Sonne spendet, der – ebenso bekannten – Erdoberfläche sowie den Eigenschaften der Oberfläche kann man eine theoretische mittlere Erdoberflächentemperatur berechnen: Bei diesen  $-18\text{ °C}$  wäre die Erde gefroren und ein Leben, wie wir es kennen, undenkbar. Tatsächlich beträgt die mittlere Erdoberflächentemperatur rund  $+15\text{ °C}$ . Diese 33 Grad Differenz zwischen der auf Grund physikalischer Gesetzmäßigkeiten ohne Atmosphäreneinfluss berechneten und der tatsächlich gemessenen Temperatur sind natürlichen Treibhausgasen zu verdanken. Die wichtigsten sind Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan und Lachgas.

## Energiebilanz der Erde

Die Solarkonstante (außerhalb der Erdatmosphäre durch die Fläche eines Quadratmeters parallel zur Sonnenoberfläche gehender permanenter Energiefluss der Sonne) beträgt  $1,37 \text{ kW/m}^2$ .

Die mittlere Erdalbedo (vereinfacht: Reflexionsvermögen der Erde; 0 wäre vollständige Absorption, 1 vollständige Reflexion der einfallenden Strahlung) beträgt 0,3. Das heißt, dass noch rund  $960 \text{ W/m}^2$  der Sonnenenergie an der Erdoberfläche zur Verfügung stehen.

Die Gesamteinstrahlung ergibt sich daraus durch Multiplikation mit der Querschnittsfläche der Erde ( $1,27 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$ ) und beträgt also  $1,23 \cdot 10^{17} \text{ W}$ .

Nach der Beziehung  $E = \sigma T^4$   
(E = auf die Flächeneinheit bezogene Energie;  
 $\sigma$  = Stefan-Boltzmann-Konstante; T = Temperatur)

errechnet sich die mittlere Erdoberflächentemperatur für Strahlungsgleichgewicht zu  $255 \text{ K}$  ( $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Die tatsächlich gemessene mittlere Erdoberflächentemperatur beträgt hingegen  $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ .



## Treibhausgase

Die Fähigkeit von Atomen und Molekülen, Energie aufzunehmen und wieder abzugeben, macht man sich in der Spektroskopie zur Identifikation von Stoffen zunutze. Sie ist auch die physikalische Grundlage des Treibhauseffektes. Durch Aufnahme und Wiederabgabe von Energie wandeln Treibhausgas-Moleküle die in den Weltraum gerichtete Wärmeabstrahlung der Erde in zufällige Richtungen um und stören dadurch deren Energiebilanz. Die Folge ist, dass die Erde eine höhere

Temperatur annehmen muss, um soviel Energie wieder loszuwerden, wie das Strahlungsgleichgewicht vorschreibt. Die Erwärmung ist also der primäre Effekt der durch Treibhausgase gestörten Energiebilanz der Erde.

Verglichen mit dem natürlichen Treibhauseffekt, der die uns vertraute Umgebung erst ermöglicht, ist der vom Menschen zusätzlich verursachte – der so genannte anthropogene – Treibhauseffekt bisher mit rund  $0,5 \text{ Grad}$  gering. Wie wir später sehen werden, können in genügend komplexen Systemen, wie die Erde eines darstellt, aber geringe Störungen ausreichen, einen großen Effekt zu erzielen.

Die Grundlagen für den Treibhauseffekt sind also völlig verstanden und es kann daher nicht der geringste Zweifel bestehen, dass eine Zunahme der atmosphärischen Konzentration der Treibhausgase auch zu einer Erwärmung führt.

## Treibhauseffekt - ein alter Hut

Seit 1820, dem Beginn der industriellen Entwicklung, war das Modell für den Treibhauseffekt bekannt: Der französische Mathematiker Jean-Baptiste-Joseph Fourier untersuchte einige atmosphärische Gase. Er stellte fest, dass sie die von der Erde ins Weltall ausgeschiedenen Infrarotstrahlen absorbierten und sich dadurch die Erdatmosphäre erwärmte. Fourier konnte schon damals den Treibhauseffekt genau beziffern: Ohne diese Erwärmung wäre die Temperatur der Erdoberfläche nur  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Als wichtigstes dieser Gase stellte Fourier Wasserdampf fest.

Um 1850 erkannte der Brite John Tyndall Kohlendioxid als ein hochwirksames Treibhausgas. Als er die atmosphärischen Gase genauer untersuchte, fand er heraus, dass die Absorptionsfähigkeit von  $\text{CO}_2$  die von Wasserdampf ergänzte.

Seit 1896 weiß man: Durch die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas werden erhebliche Mengen  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre geschickt und verstärken dort den von Fourier und Tyndall festgestellten wärmenden Effekt. Diese Schlussfolgerung zog der Schwede Svante Arrhenius. Er sagte eine bis dahin noch nie erlebte Erwärmung der Lufttemperatur voraus.

(Quelle:

<http://www.deutsches-museum.de/dmznt/klima/treibhauseffekt/wiegehtdas/frueheentdeckungen/>)

## Mix it Baby

### **Atmosphärische Lebensdauer**

Unter der Lebensdauer eines Gases in der Erdatmosphäre versteht man die Zeit, in der die Konzentration vom ursprünglichen Wert auf  $1/e$  ( $\approx 1/2,7$ ) abgesunken ist. Der übliche atmosphärische Abbauweg beginnt mit dem Angriff von OH-Radikalen, reaktiven Molekülen, die durch die Sonnenstrahlung aus stabilen Bestandteilen der Atmosphäre gebildet werden. Diese reaktiven Teilchen sind damit der Motor für die Selbstreinigungsfähigkeit der Atmosphäre. Besonders stabile Gase werden durch OH-Radikale nicht oder nur langsam abgebaut. Sie verteilen sich daher gleichmäßig in der Atmosphäre und können sich dort anreichern, wenn sie durch natürliche oder anthropogene Ereignisse dauerhaft oder wiederholt erzeugt und freigesetzt werden. Ein Beispiel für so zum Problem gewordene Stoffe sind die Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe, die wegen ihrer Ungiftigkeit sehr beliebt waren, jedoch am Abbau der stratosphärischen Ozonschicht beteiligt sind. Die atmosphärischen Lebensdauern der Kyoto-Gase liegen zwischen 0,3 Jahren – für  $C_2H_5F$  – und mehr als 50 000 Jahren für  $CF_4$ .

### **Das Global Warming Potential**

Das GWP ist am besten durch ein Gedankenexperiment zu erklären: Man setzt zu einer bestimmten Zeit (0) eine Masse eines Treibhausgases in die Atmosphäre frei und summiert dessen Treibhauswirksamkeit über eine gewisse Zeit auf. Üblich sind 20, 100 und 500 Jahre. Die Wirkung von  $CO_2$  wird auf allen Zeitskalen als Einheit definiert. Durch Vergleich der Wirkung anderer Gase mit der des  $CO_2$  erhält man das GWP dieses Gases für den betrachteten Zeithorizont. GWPs reichen von 1 (für  $CO_2$ ) bis zu 32 400 (für  $SF_6$  und den Zeithorizont von 500 Jahren).

Da die Gase eine unterschiedliche Lebensdauer haben, spielt es eine Rolle, über welche Zeit man die Wirkung aufsummiert (integriert). Ist ihre Lebensdauer kürzer als die des  $CO_2$ , nimmt ihr GWP mit steigendem Zeithorizont ab, ist sie länger als die des  $CO_2$ , nimmt ihr GWP mit steigendem Zeithorizont zu. Das stabilste Treibhausgas  $CF_4$  mit einer Lebensdauer von über 50 000 Jahren besitzt folgende GWPs: 3 900 (20 Jahre), 5 700 (100 Jahre) und 8 900 (500 Jahre). Das kurzlebige  $C_2H_5F$  hingegen: 40 (20 Jahre), 12 (100 Jahre) und 4 (500 Jahre).

Die Atmosphäre kennt keine Landesgrenzen. Gase verteilen sich darin gleichförmig, wenn sie genügend Zeit dazu haben, also lange genug leben. Die Zeit für die gleichförmige Mischung liegt in der Größenordnung von wenigen Jahren. Das heißt, dass eine Gasmenge, die an beliebiger Stelle in die Erdatmosphäre gebracht wurde, nach dieser Zeit gleichförmig in der Atmosphäre verteilt ist. Umgekehrt bedeutet dies aber auch, dass nur Gase, die mindestens für solche Zeiten stabil sind, sich gleichförmig in der Atmosphäre verteilen. Das trifft für die meisten im Kyoto-Protokoll geregelten Gase (Kyoto-Gase, siehe Glossar) zu, deren Lebensdauer wesentlich größer als ein Jahr ist.

Damit man die Wirkung von Treibhausgasen besser vergleichen kann, wurde das so genannte Global Warming Potential (Potenzial eines Stoffes, zur globalen Erwärmung beizutragen) eingeführt. Das GWP gibt an, wie viel Mal mehr treibhauswirksam eine bestimmte Masse eines Stoffes verglichen mit der gleichen Masse  $CO_2$  ist.

### **Wechselwirkungen mit natürlichen Systemen**

Rückkopplungseffekte verstärken die zunächst relativ geringe Störung der Energiebilanz der Erde oder schwächen sie ab. Im Falle der Abschwächung spricht man von negativer, im Falle der Verstärkung von positiver Rückkopplung. Solche Rückkopplungsprozesse werden in Gang gesetzt durch die Wechselwirkung des Antriebs durch Treibhausgase mit den natürlichen Stoff- und Energiekreisläufen der Erde. Daraus können – ähnlich wie bei dem einfachsten und zugleich bekanntesten Beispiel eines chaotischen Systems, dem Drei-Massen-Pendel – schwer oder nicht vorher-sagbare Resultate entstehen.

So kann die Temperatursteigerung aufgrund des primären Effektes der Treibhausgase entweder geringer oder größer ausfallen, als es durch die reine Energiebilanzierung absehbar wäre. Im für uns ungünstigsten Fall reichte also eine kleine Störung (die Treibhausgasemissionen der Menschen), um unabsehbare Folgen für das Überleben der Natur, wie wir sie kennen, zu erzeugen. Im günstigsten Fall fiel die sich einstellende Erwärmung geringer aus als erwartet. Es ist nicht vorhersagbar, in welche Richtung das Pendel ausschlägt, weil wir die relevanten Rückkopplungen nicht genau genug kennen.

## Positive und negative Rückkopplungen im Klimasystem

Sehr effektive Rückkopplungen werden durch Veränderung der Albedo (siehe Kasten „Energiebilanz der Erde“) erzeugt, da eine kleine Veränderung in der Reflektivität der Erdoberfläche die Effektivität der Energieaufnahme stark beeinflusst. Eine in dieser Beziehung gut bekannte positive Rückkopplung ist die Eis-Albedo-Rückkopplung: Eis besitzt eine der hellsten Oberflächen der Erde. Schmilzt nun durch eine anfänglich geringe Temperaturerhöhung arktisches Eis, kommt darunter der Ozean zum Vorschein. Der besitzt eine der dunkelsten Oberflächen der Erde (siehe Kasten „Verwandlungskünstler Wasser“). Dadurch wird mehr Sonnenenergie aufgenommen als zuvor, die Wirkung der Sonne also verstärkt. Das frühere Schmelzen von – hellem – Schnee auf darunter zum Vorschein kommenden – dunklen – Flächen (Bäume oder Boden) hat eine ähnliche, aber geringere Wirkung.

Ein anderes Beispiel ist die Wasserdampf-Rückkopplung. Sie beschreibt die Tatsache, dass die Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf mit der Temperatur zunimmt. Wasserdampf ist ein viel stärkeres und effektiveres Treibhausgas als Kohlendioxid. Ein Anstieg der Kohlendioxid-Konzentration über eine gewisse Schwelle hinaus könnte so in einen Teufelskreis der Wasserdampf-Verstärkung führen. Dies bezeichnet man im Englischen als „runaway-effect“.

Negative Rückkopplungen sind im Klimasystem der Erde nicht so offensichtlich zu finden. Die größte Rolle spielen hier die Wolken. Sie können den ursprünglichen Antrieb durch Kohlendioxid sowohl verstärken (durch Rückreflexion der von der Erde abgestrahlten Wärme) oder abschwächen durch Erhöhung der Albedo (Reflexion der einfallenden Sonnenstrahlung, sodass weniger Energie ins Klimasystem gelangt). Bei zwei Wolkenarten überwiegt die abschwächende Wirkung: Dichte hohe Zirkuswolken lassen besonders wenig Sonnenstrahlung passieren und Wolken, die sich dicht über der Erdoberfläche befinden, tragen wegen der bereits recht hohen Umgebungstemperatur wenig zur zusätzlichen Erwärmung der Atmosphäre bei, reflektieren aber durch ihre hellen Oberseiten ebenfalls Sonnenstrahlung.

Eine besondere Rolle fällt dabei dem Wasser zu. Je nachdem in welcher Form, ob gasförmig, flüssig oder fest und an welcher Stelle, ob auf der Meeres- oder Landesoberfläche, ob in tiefen oder höheren Luftschichten, es sich befindet, kann es den Treibhaus-

effekt entweder verstärken oder abschwächen (siehe Kasten „Verwandlungskünstler Wasser“). Erst wenn die Phänomene der Wolkenbildung und deren Wirkung für den Strahlungshaushalt der Erde vollständig verstanden sind, ist von den Klimamodellen eine verlässliche Klimaprognose zu erwarten.

Komplexe, chaotische Systeme wie das Drei-Massen-Pendel oder das Klimasystem der Erde reagieren sowohl auf die Größe der Störung oder anschaulich der Auslenkung als auch auf deren Heftigkeit. So wie das Pendel bei sehr kleinen Auslenkungen rasch zum Ausgangszustand zurückkehrt, besitzen auch komplexe natürliche Systeme eine gewisse Fähigkeit zur Selbsterhaltung. Diese wird Resilienz genannt. Erst wenn Störungen einen bestimmten Schwellenwert übersteigen, ist es nicht mehr sicher, dass die Eigenstabilität des

## Verwandlungskünstler Wasser

Wasser ist ein erstaunlicher Stoff. Trotz seines geringen Molekulargewichtes (18) ist es bis zu 100 °C flüssig. Wasser kann sowohl die dunkelsten Oberflächen als auch die hellsten Oberflächen der Erde bilden: Während die Albedo von Tiefsee-Oberflächen nur 0,03 betragen kann (das heißt bis zu 97 % der einfallenden Sonnenstrahlung werden absorbiert), ist die Albedo von frischem Neuschnee bis zu 0,95 (nur 5 % der einfallenden Sonnenstrahlung werden absorbiert). Wasserdampf ist das Treibhausgas, das für den größten Teil – mehr als 60 % – des natürlichen Treibhauseffektes verantwortlich ist. Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre bestimmt somit sehr stark den Treibhauseffekt (siehe auch Kasten „Positive und negative Rückkopplungen im Klimasystem“). Flüssiges Wasser absorbiert in dicker Schicht das Sonnenlicht; bei schrägem Einfall wird es hingegen überwiegend reflektiert. Festes Wasser (Schnee/Eis) ist für sichtbares Licht in dünner Schicht durchsichtig (Zirkus-Wolken) und für Wärmestrahlung praktisch schwarz (das heißt es absorbiert Wärmestrahlung sehr gut). Wenn man die Natur genau beobachtet, kann man das im Winter selbst entdecken: Um dunkle Gegenstände (Pfähle/Pfosten) herum bilden sich bei Sonnenschein Trichter im Schnee.

Systems ausreicht, seinen Zustand zu erhalten. Von vielen Wissenschaftlern und wissenschaftlichen Einrichtungen wird eine Temperaturerhöhung um 2 Grad gegenüber dem vorindustriellen Zustand als die maximal zuträgliche „Auslenkung“ des Klimasystems der

Erde angesehen, die nach derzeitigem Erkenntnisstand wahrscheinlich eine chaotische Antwort vermeiden wird. Von diesen 2 Grad haben wir bereits 0,6 Grad „verbraucht“, da sich das Klima bereits um diesen Betrag erwärmt hat. Nach Abschätzungen über den Energiehaushalt ist es wahrscheinlich, dass wir zwischen 0,5 und 1 Grad Temperaturerhöhung wegen der Trägheit des Klimasystems bereits heute fest „gebucht“ haben. Danach bleiben uns nur noch 0,4 bis 0,9 Grad „Spielraum“. Das heißt, die Politik bis 2015, im günstigsten Fall bis 2025, wird entscheidend dafür sein, ob wir das Ziel des Temperaturanstiegs um maximal 2 Grad erreichen können (siehe dazu Faltblatt Folgen des Klimawandels).

Die Heftigkeit der „Auslenkung“, anschaulich als Stoß gegen das Pendel zu verstehen, ist die Rate der Temperaturänderung. Hier gehen die Forscher von einer maximal zulässigen Temperatur-Änderungsrate von 0,2 Grad pro Jahrzehnt aus, jenseits derer die Wahrscheinlichkeit einer chaotischen Antwort sich stark erhöht. Diese Änderungsrate ist aber bereits jetzt – zumindest regional – weitaus höher. So hat sich die mittlere Temperatur in Deutschland in den letzten beiden Jahrzehnten des vergangenen Jahrhunderts um je 0,55 Grad erhöht. Auch für andere Regionen wie die Antarktis und die hohen nördlichen Breiten wurden ähnlich hohe Änderungsraten gefunden.

## Wechselwirkungen im Klimasystem

Wegen der bereits mehrfach erwähnten Komplexität des Klimasystems besteht eine sehr große Zahl von Wechselwirkungen zwischen seinen Komponenten, wovon viele zu Rückkopplungseffekten führen können. Daraus sollen nun einige wenige betrachtet werden, um ein Verständnis für diese nicht ganz offensichtlichen Zusammenhänge zu erhalten.

Temperaturänderungen der Erd- und Wasseroberfläche können die Bildung und Verteilung von Drucksystemen beeinflussen. Dies wiederum wirkt sich auf die Luftströmungen aus. Insgesamt ergeben sich daraus Folgen für die Verteilung und Erhaltungseignung von Schön- und Schlechtwettergebieten, für die vorherrschende Windrichtung, die Temperatur, die Stärke des Windes und die Niederschlagsaktivität.

Das viel diskutierte Abbrechen des Nordatlantik-Stromes, das unter den üblichen Annahmen zum Ausmaß der erwarteten Klimaänderung nach Ansicht maßgeblicher Experten in diesem Jahrhundert unwahrscheinlich jedoch nicht unmöglich ist, zöge ebenfalls eine Reihe weiterer Auswirkungen nach

sich. Darunter auch die zuvor genannten Änderungen der Drucksysteme mit ihren Folgen. Aber auch weitere, wie die Abkühlung des Nordatlantiks, die für Westeuropa ein kühleres Klima erwarten ließe. Ferner führte die Abschwächung der Meeresströmung zu einer stärkeren Schichtung des Wassers, was Auswirkungen auf die Aufnahme von Gasen wie Sauerstoff oder Kohlendioxid hätte. Dadurch könnte einerseits von der Wasseroberfläche weniger Kohlendioxid aufgenommen werden, also ein größerer Anteil davon in der Atmosphäre bleiben und andererseits Sauerstoff, der für viele Lebensprozesse auch in der Tiefsee wichtig ist, nicht mehr in der erforderlichen Menge dorthin transportiert werden. Dies hätte dramatische Konsequenzen für Tiefsee-Ökosysteme.

Neben der unbelebten Natur greift auch die belebte in das Klimasystem ein und zwar über die Energieaufnahme, den Kohlenstoff-Kreislauf, die Verdunstung von Wasser und auch über den Wassertransport. Sogar die Niederschlagsverteilung kann durch Vegetation beeinflusst werden.

Die Sonnenenergie wird durch die Pflanzen dazu verwendet, aus dem Kohlendioxid in der Luft und dem Wasser im Boden – zusammen mit weiteren essenziellen Spurenstoffen – Pflanzenmasse aufzubauen. Pflanzen können somit, unter geeigneten Bedingungen, einen erheblichen Teil der Kohlendioxid-Emissionen wieder binden – wenn man sie lässt. Die Verringerung der Vegetationsauflage, wie das Abholzen von Waldflächen, führt also zu einer Verringerung der Kohlendioxid-Aufnahme und damit höherer atmosphärischer Konzentration dieses Treibhausgases. Besonders in tropischen Regenwäldern sorgen die alten Bäume in trockenen Zeiten für einen Wassertransport von tieferen Reservoirs zur Oberfläche, was auch der sie umgebenden Vegetation zugute kommt. Das selektive Einschlagen alter Bäume hat damit offensichtlich schwere Nebenwirkungen.

Vegetation erzeugt, durch Verdunstung über die Spaltöffnungen der Blätter, auch Aerosole, die als Kondensationskeime für Wasserdampf in den Wasserkreislauf eingreifen und zum Beispiel dafür sorgen können, dass Niederschlag fällt, wenn die Luftfeuchte dazu ausreichend ist. Im Gegensatz dazu kann fehlende Vegetation Niederschlag verhindern, auch wenn die Luftfeuchte grundsätzlich für Regen ausreichte. Dies hat mit den unterschiedlichen Eigenschaften der gebildeten Aerosole zu tun. Während die von Pflanzen hydrophil – also Wasser anziehend – sind, ist der aus Wüsten aufgewirbelte Staub hydrophob – also Wasser abweisend. Durch ihn werden bei für

Niederschlag ausreichender Luftfeuchte viele kleine Tröpfchen gebildet, deren Masse zu klein ist, um zu Boden zu fallen – also möglicher Regen verhindert.

Schließlich kommt auch Boden-Mikro-Organismen eine bedeutende Rolle zu. Einige davon produzieren aus Pflanzen- und Tierresten Methan in Bodenschichten, die wenig oder keinen Sauerstoff enthalten, andere oxidieren dieses Methan zu Kohlendioxid, wenn der Sauerstoffgehalt dazu ausreicht. Bisher ging man davon aus, dass wegen der ausreichenden Sauerstoffversorgung der oberen Bodenschichten das weiter unten gebildete Methan – bis auf kurze Zeitschnitte, in denen besondere Bedingungen herrschen – vollständig zu Kohlendioxid oxidiert wird. Das wäre somit ein Regelmechanismus, der verhinderte, dass zu viel des stärkeren Treibhausgases Methan in die Atmosphäre gelangen kann. Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass aus dem Boden durchaus auch dann Methan entweichen kann, wenn dort genügend viel Sauerstoff vorhanden ist. Hier klafft wohl auch noch eine Kenntnislücke, die durch weitere Untersuchungen zu schließen ist.

## Wechselwirkungen mit anthropogenen Systemen

Menschen greifen auf vielfältige Weise ins Klimasystem ein – im Wesentlichen durch die Energieerzeugung und die Landnutzung.

Der Energiebedarf hängt unmittelbar mit der Vorstellung unseres Ideals einer menschlichen Gesellschaft zusammen. Während frühere Gesellschaften noch weit gehend ohne externe Energie ausgekommen sind – sogar in Regionen wie der Arktis, in denen man das nicht vermutet – wird in heutigen Gesellschaften der Anspruch an ein zufrieden stellendes Raumklima meist über Heizungen und nicht über die Bekleidung sowie eine angemessene Bauweise realisiert. Die leichte Verfügbarkeit von Holz und Kohle (und später Öl und Gas) und der damit verbundene geringe Preis führten zu dieser Entwicklung. Daneben entstand durch die Industrialisierung weiterer Energiebedarf, der ebenfalls zunächst durch die billige Kohle gedeckt wurde. Derzeit ist noch nicht abzu-

sehen, ob ernsthafte Anstrengungen unternommen werden, zwischen unabweisbarem und überflüssigem Energieverbrauch zu unterscheiden (Stichworte: Energieeffizienz, Energieeinsparung) und den unabweisbaren Energiebedarf darüber hinaus mit klimaneutralen Energieträgern (Stichwort: regenerative Energien) zu decken. Das Wirtschaftssystem wird dazu einerseits zu sehr über die Preise bestimmt und andererseits diese Preise in unvollständiger Kenntnis der natürlichen Grundlagen und Zusammenhänge festgelegt. Solange sich daran nichts ändert, fossile Energieträger also weiterhin so billig und leicht zugänglich bleiben wie bisher, ist nicht zu erwarten, dass man ohne Zwang andere Arten der Energieversorgung in der gebotenen Eile ernsthaft in Erwägung zieht. Die wirtschaftliche Entwicklung der Menschheit gibt jedenfalls keinen Anlass zu einem solchen Optimismus. Im Gegenteil, die aktuelle Phase der Globalisierung, die offenbar auf einer sehr schlichten Theorie beruht, verlangt nach billigem Transport und damit unnötiger Energieverschwendung.

Seit Urzeiten nutzt der Mensch das Land, auf dem er lebt. Seit dieser Zeit hat er durch Veränderung seiner Umgebung auch in das Klimasystem eingegriffen. Jedoch waren seine Möglichkeiten dazu früher sehr viel beschränkter, und über lokale Klimawirkungen reichte sein Einfluss nicht hinaus. Erst seit kurzem bewegt der Mensch jährlich mehr Masse, als durch natürliche Prozesse verfrachtet wird und beeinflusst damit das Klima auch weltweit. Die Umwandlung von Wald in Weideland, die Übernutzung und Verstepung sind Phänomene, die uns heute geläufig sind. Alle diese Veränderungen der natürlichen Umgebung greifen in das Klimasystem ein; ebenso wie das Umgraben großer Gebiete, um oberflächennahe Kohle zu gewinnen und das Umwandeln von vormals blühenden Regionen in Mondlandschaften auf der Suche nach Gold, Edelsteinen und anderen Bodenschätzen. Hinzu kommt die großflächige Versiegelung der Erde, die den Wasser- und damit Energieaustausch zwischen Boden und Atmosphäre behindert.

Der Mensch hat heute bessere Möglichkeiten als jemals zuvor in seiner Entwicklung, das Klimasystem zu beeinflussen. Bisher nutzt er diese ausgiebig. Es ist an der Zeit, sich einzuschränken.