

## Überblick: Warnsignale aus der Klimaentwicklung

Peter Hupfer, Hartmut Graßl & José L. Lozán

*SURVEY: WARNING SIGNALS FROM THE CLIMATE DEVELOPMENT: A short outline is given on the topics of modern climatology. After some remarks on the nature of climate variability, the history of climate as well as the causes of climatic changes the manifold interactions between mankind and climate are described in some more details. Those are primarily given by the enhancing greenhouse effect of the atmosphere owing to the strong and lasting emissions of carbondioxid and other atmospheric trace gases. These processes will characterize the warmer climate of the 21st century, exerting much effects on nature and society.*

Die Atmosphäre gehört mit ihren häufig beeindruckenden Wetterabläufen zu den entscheidenden Umweltfaktoren des Menschen. Die heutige Atmosphäre hat sich über hunderte Millionen Jahre hinweg entwickelt, wobei die Zunahme des Sauerstoffanteils als Voraussetzung für die Entwicklung des Lebens auf der festen Erde von entscheidender Bedeutung war. Damit aufs engste verbunden war die Herausbildung der stratosphärischen Ozonschicht (Abb. 1.1-4), die bekanntlich als Filter für die schädlichen kurzwelligen Anteile der UV-Strahlung dient. Der jedem vertraute Begriff »Wetter« bezeichnet streng genommen den augenblicklichen Zustand der Atmosphäre. Es ist aber auch der Sammelbegriff für atmosphärische Prozesse, die sich innerhalb von wenigen Wochen abspielen und die der deterministischen, von

einem gemessenen Anfangszustand ausgehenden Wettervorhersage prinzipiell zugänglich sind. Prozesse eindeutig längerer Zeitskalen rechnet man dem Klima zu. In der deutschen Sprache bezeichnet der Ausdruck »Witterung« den Übergangsbereich zwischen Wetter und Klima. Demnach können wir Klima als die Synthese des Wetters über einen längeren Zeitraum auffassen, der lang genug ist, um die statistischen Eigenschaften wie Mittelwert, Streuung und Extremwerte der den Zustand der Atmosphäre beschreibenden Größen bestimmen oder zumindest abschätzen zu können. Wichtig ist, daß Klima auf keinen Fall nur mit Mittelwert gleichgesetzt werden darf. Unter dem Einfluß des Menschen sind die das Klima bestimmenden Größen in Bewegung geraten – ein ernstes Warnsignal?

### Unserveränderliches Klima

Das Klimasystem der Erde umfaßt die großen Naturbereiche Atmosphäre, Hydrosphäre (vor allem den Ozean), Kryosphäre (Eis und Schnee), Lithosphäre (Gesteinshülle) und Biosphäre, die untereinander und auf äußere Einflüsse zeitlich ganz unterschiedlich und nicht-linear reagieren (Tafel 1). Der entscheidende Antrieb dieses Systems ist die Sonnenstrahlung. Die ungleichmäßige Verteilung der Wärmequellen und -senken führt zur Entstehung globaler Zirkulationen in Atmosphäre und Ozean und damit auch zur Bildung verschiedener Klimate. Die mittlere Oberflächentemperatur von etwa 15 °C ist dem natürlichen Treibhauseffekt zu verdanken, der als Folge der starken Absorption von Wärmestrahlung durch Wasserdampf, Kohlendioxid und andere Spurengase in der Atmosphäre entsteht (Tafel 2). Ohne Treibhauseffekt läge diese Temperatur um mehr als 30 °C niedriger. Das Wesen des Klimaproblems unserer Zeit besteht darin, daß der Mensch seit über 100 Jahren

in steigendem Maß Kohlendioxid, Methan und andere Treibhausgase emittiert und so zu einem erhöhten Treibhauseffekt Anlaß gibt. Dieser wird zusammen mit dadurch bedingten Rückkopplungen innerhalb des Klimasystems zu einer weiteren spürbaren mittleren globalen Erwärmung und einem voraussichtlich regional unterschiedlichen Klimawandel führen.

Für das Klima ist neben der Atmosphäre das Weltmeer von großer Bedeutung. Die hohe Wärmekapazität des Ozeans und die Besonderheiten seines Wärmehaushaltes dämpfen den Jahresgang der Temperatur und führen zur Entstehung des maritimen Klimas. Zum Wärmeausgleich zwischen den höheren und niederen Breiten trägt neben der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre auch die des Ozeans in etwa gleichen Teilen bei. Gelangt wärmeres Wasser in die höheren Breiten, kühlt sich das Wasser durch Wärmeabgabe an die Atmosphäre ab (bspw. Klimawirkung des Golfstroms!) wird schwerer

und sinkt in tiefere Schichten ab. Diese Konvektion ist umso tieferreichender, je stärker die Abkühlung ist und je mehr Meereis dabei entsteht. Auf diese Weise wird ständig Tiefenwasser gebildet, das eine globale Tiefenzirkulation anregt. Es entsteht ein riesiger ozeanischer Kreislauf in der Art eines »Förderbandes« (»oceanic conveyor belt«, *Tafel 5*), dessen Umlaufperiode bis zu ca. 1000 Jahre beträgt. Störungen der Anregung dieses Kreislaufes vor allem im Nordatlantik können zu nachhaltigen Klimaschwankungen in großen Gebieten führen. Der Ozean wirkt aber nicht nur thermisch auf das Klima, sondern auch als Teil großer biogeochemischer Kreisläufe, insbesondere des Kohlenstoffs.

### *Ursachen der Klimaänderungen*

Ohne Kenntnis der Klimageschichte ist ein realistischer Ausblick in die Klimazukunft kaum möglich. Die Eigenschaften vergangener Klimate sind u.a. in den terrestrischen und marinen Sedimenten, in den großen Eisschilden der Antarktis und Grönlands, in biosphärischen Spuren wie Pollen, Baumringen, Korallenriffen, alten Naturgrenzen sowie für die jüngste Geschichte auch in menschlichen Zeugnissen gespeichert. Ausreichend erforscht ist das quartäre Eiszeitalter der letzten 1,5 Mio. Jahre mit seiner Abfolge von Warm- und Kaltzeiten. Diese Klimawechsel hängen ursächlich mit den langfristigen Änderungen der Bahnparameter der Erde um die Sonne zusammen, die die Menge und Verteilung der Sonnenenergie auf der Erde verändern. Als weitere Ursachen lang- und kurzfristiger Schwankungen des Klimas kommen auch Änderungen der Strahlungsintensität der Sonne in Betracht. Ausdruck dieser sind z.B. die Anzahl der Sonnenflecken, die schon seit Jahrhunderten beobachtet werden. Die der gegenwärtigen Erwärmung seit Mitte des 19. Jh. vorausgehende Klimaphase war die »Kleine Eiszeit« seit dem 14. Jh., die im Mittel durch niedrigere Sonnenfleckenzahl gekennzeichnet war. Starke Vulkanausbrüche wie der des Mt. Pinatubo 1991 beeinflussen heute wie früher das regionale und globale Klima vorübergehend. Die Ursache dafür ist eine aus Schwefelsäuretröpfchen bestehende Aerosolschicht in der Stratosphäre, die sich aus dem Schwefeldioxid in der Gasfahne des Vulkans bildet. Diese Schicht ändert den Strahlungshaushalt der Atmosphäre in der Weise, daß im Mittel in der Aerosolschicht eine Erwärmung und an der Erdoberfläche eine Abkühlung erfolgt. Eine durch die innere Wechselwirkung im Klimasystem verursachte kurzfristige Klimaschwankung ist das El Niño-Phänomen. Infolge der großflächigen Erwärmung des tropischen östlichen Pazifiks entstehen Zirkulationsanomalien in der Atmosphäre und damit ausgeprägte klimatische Anomalien in vielen tropischen, aber auch außertropischen Regionen.

### *Einfluß des Klimas auf die Kulturgeschichte der Menschheit*

Man kann die Zeit vor etwa 12 000 Jahren als Beginn der menschlichen Gesellschaft ansehen. Damals ging die letzte Kaltzeit (Weichsel-Kaltzeit in Mitteleuropa) zu Ende, und der Mensch begann damals, seine eigene Geschichte anhand von Höhlenmalereien zu beschreiben. Da eine große Wassermenge in Form von Eis, das bis heute noch in polnahen Gebieten existiert, fixiert war, lag der Meeresspiegel etwa 100 m tiefer als heute, so daß der Mensch über eine Landverbindung im Bereich der Beringstraße zwischen Sibirien und Alaska ziehen konnte. Seit Beginn der bis heute andauernden Warmzeit des Holozäns stieg der Meeresspiegel an, und die Küstenlinien wichen weltweit zurück. Die Erde war damals dünn besiedelt. Durch Migration konnten Gebiete mit ungünstigem Klima vermieden werden. Die Erwärmung setzte sich bis 5 000–6 000 Jahre vor heute fort und im sogenannten Atlantikum (zwischen 8 000 und 5 000 Jahre vor heute) war die Lufttemperatur wahrscheinlich sogar höher als heute. Damals reichte der Niederschlag in der Sahara, heute die größte Wüste der Welt, zur Savannenbildung aus. Wie Felszeichnungen aus dieser Zeit belegen, lebten dort damals Elefanten, Nashörner, Nilpferde und andere tropische Tierarten. Dem Atlantikum folgte wieder eine Phase der leichten Abkühlung und des Vorrückens der Gletscher. So ist das Holozän generell durch die Folge von wärmeren und kühleren Klimaabschnitten gekennzeichnet. Um 870 gelang es den Wikingern, begünstigt durch den Rückgang des Eises, erst Island und dann Grönland zu kolonisieren. Als das Eis im 15. Jh. wieder vorrückte, vermochten sie sich in Grönland im Gegensatz zu den Inuit nicht an das kältere Klima anzupassen.

Während des Klimaoptimums im Mittelalter entsprachen die mittleren Temperaturen etwa den heutigen. In dieser Zeit der sich ausweitenden Landwirtschaft und eines großen Bevölkerungswachstums fallen bedeutende technische und landwirtschaftliche Fortschritte. In Südengland wurde Wein angebaut, und in Norwegen war bis Trondheim der Getreideanbau möglich. In der darauffolgenden »Kleinen Eiszeit«, die in ihren Ausläufern bis in die Mitte des 19. Jh. andauerte, war das Klima in Mittel- und Nordeuropa durch häufig auftretende kalte Winter und nasse Sommer geprägt, die wirtschaftlichen Niedergang, Wanderungen und Kriege auslösten. Die wirtschaftliche Entwicklung und die Zunahme der Weltbevölkerung im Zeitalter der Industrialisierung beruht nicht nur auf dem technischen Fortschritt, sondern auch auf den vorherrschenden günstigen klimatischen Verhältnissen.

## Die anthropogene Beeinflussung des Klimas

Dank weltweit gesammelter Daten können wir die globale Klimaentwicklung seit der Mitte des 19. Jh. relativ zuverlässig beurteilen (*Tafel 3*). Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß die mittlere jährliche globale Lufttemperatur in Bodennähe seit Anfang des 20. Jh. unter Schwankungen ansteigt. Die Erwärmung erreichte in den 1940er Jahren einen ersten Höhepunkt. Nach einer Phase des Gleichbleibens und eines leichten Rückgangs der Lufttemperatur steigt die Kurve seit den 1970er Jahren wieder an. Seit den 1980er Jahren liegen die Werte zunehmend über dem Mittel des Referenzzeitraumes 1961/90 (*Tafel 3*). Dieser Befund gilt nicht nur für die Jahresmittelwerte, sondern auch für die einzelnen Monate, von denen zwischen Januar 1990 und Dezember 1997 87% den Mittelwert 1961/90 übersteigen. Seit Anfang der verlässlichen instrumentellen Temperaturmessungen (etwa 1860) wurde zuerst im Jahr 1990 die höchste bodennahe globale mittlere Jahrestemperatur gemessen. 1995 wurde dieser Rekord überschritten. Für 1998 wird ein erneuter Wärmerekord erwartet.

Die in *Tafel 3* dargestellte Kurve darf nicht zu der Schlußfolgerung verleiten, daß die Temperaturänderung räumlich homogen ist. Nur die hemisphärischen Entwicklungen sind ähnlich und von gleicher Größenordnung. Die höchsten Erwärmungsbeträge werden im Breitengürtel zwischen 40° und 70° N (etwa zwischen Mittelspanien und Nordnorwegen) über den Kontinenten im Winter und Frühjahr beobachtet. Es besteht die Tendenz, daß die Erwärmungsbeträge im Winter höher als im Sommer sind. Abkühlungsgebiete wurden im nordwestlichen Atlantik und in den mittleren Breiten des Nordpazifiks gefunden. Die Auswertung der Höhensondierungen, die jedoch erst seit Ende der 1950er Jahre in befriedigender Genauigkeit vorliegen, ergibt, daß die ganze Troposphäre (bis ca. 10 km Höhe) von der Erwärmung betroffen ist. In der darüberliegenden Stratosphäre weisen die Messungen jedoch auf eine Abkühlung hin – ein Befund, der mit der Abnahme des Ozons und Verstärkung des Treibhauseffekts der Atmosphäre verträglich ist.

Mit verschiedenen Methoden konnte man zeigen, daß die Zunahme der globalen Mitteltemperatur in Bodennähe nicht nur auf natürliche Ursachen, sondern in erheblichem Umfang auch auf die anthropogene Veränderung der Zusammensetzung der Atmosphäre zurückzuführen ist. Auch in erster Linie anthropogen bedingt sind eine gewisse Asymmetrie in der Erwärmung beider Erdhälften als Folge der Sulfataerosole und die Abkühlung der Stratosphäre überwiegend als Folge des Ozonschwundes.

Daher kam 1995 der renommierte »Zwischenstaatliche Ausschuss Klimaänderungen« (Intergovernmental

Panel on Climate Change, IPCC), in seinem zweiten bewertenden Bericht zu der Auffassung, daß alle Befunde zusammen auf einen erkennbaren Einfluß des Menschen auf das globale Klima hindeuten.

### Anthropogener Treibhauseffekt

Im Schema der globalen Energiebilanz (*Tafel 2*) sind die Strahlungsflüsse zwischen Erde und Atmosphäre zu sehen. Auffällig sind die hohen Werte der Wärmestrahlungsflüsse, die von der Erdoberfläche und von der Atmosphäre ausgehen. Der als Folge der Strahlung der Treibhausgase zur Erdoberfläche gerichtete Wärmestrahlungsfluß (Gegenstrahlung der Atmosphäre) hat weitreichende Folgen für das Klima. Lediglich die kleine Differenz der beiden Wärmestrahlungsflüsse geht unmittelbar in den Weltraum verloren. Um ein Gleichgewicht zwischen Absorption von Sonnenstrahlung und Emission von Wärmestrahlung im Langzeitmittel herzustellen, muß die Oberfläche (und damit die untere Atmosphäre) wärmer werden. Zu diesem natürlichen Treibhauseffekt von ca. 33 °C tragen die Treibhausgase Wasserdampf mit etwa 20 °C, das Kohlendioxid mit 7 °C, das Ozon mit 2,4 °C, das Distickstoffoxid mit 1,4 °C, das Methan mit 0,8 °C und die restlichen Treibhausgase mit 0,6 °C bei. Alle diese Gase zusammen machen aber nur etwa 3 Promille der Masse der Atmosphäre aus. Der mittlere Volumenanteil der Treibhausgase hat erheblich zugenommen:

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
früher	280	0,70	0,275
heute	360	1,75	0,312
Zunahme in % um	28,6	150,0	13,5

Bei sich weiter verstärkendem anthropogenem Treibhauseffekt wird eine weitere Erwärmung angestoßen. Das 20. Jh. war das wärmste seit mindestens 600 Jahren und in keinem Jahrhundert ist dabei eine so rasche Änderung aufgetreten. Im 21. Jh. wird sich diese Entwicklung voraussichtlich beschleunigen, so daß die Menschheit in einem Warmklima leben wird, wie sie es bisher noch nicht erlebt hat. Die Folgen für Natur und alle Bereiche der Gesellschaft sind vielfältig und bisher erst unvollkommen absehbar.

### Quellen der emittierten Treibhausgase

Etwa drei Viertel der Emission kommt zur Zeit noch von den Industrieländern, in denen aber nur 25% der Weltbevölkerung leben (*Tafel 6*). *Tafel 7* zeigt die Hauptquellen der weltweit emittierten Treibhausgase. Hauptursache für die eingetretene Entwicklung ist mit 50% die Nutzung fossiler Brennstoffe. Das entspricht gegenwärtig

einer jährlichen Emission von ca. 22 Mrd. t CO<sub>2</sub>. Dieser Wert nimmt immer noch um 1–2% jährlich zu.

Seit Beginn des Industriezeitalters vor ca. 130 Jahren haben die Treibhausgaskonzentrationen mit Ausnahme von Ozon in der Atmosphäre drastisch zugenommen. Neue Treibhausgase, wie Halogene und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), sind hinzugekommen. Aus der Chemieproduktion stammen auf dieser Weise 20% des gesamten weltweiten Ausstoßes.

Eine weitere wichtige Hauptquelle der global emittierten Treibhausgase ist die zunehmend intensiver betriebene Landwirtschaft mit 15% der Emissionen. Die Vernichtung der Wälder tragen mit weiteren 15% der Emissionen bei.

Die Wälder wurden schon seit Einführung von Landwirtschaft und Viehzucht im großen Stil gerodet, um Siedlungsraum zu schaffen und Holz als Baustoff zu gewinnen. Vorher dürfte etwa ein Drittel der Landflächen, etwa 46 Mio km<sup>2</sup>, bewaldet gewesen sein, heute sind noch etwa 36 Mio km<sup>2</sup> mit zum Teil geschädigtem Wald bedeckt. Während auf der einen Seite die Wälder klimaabhängig sind, wirken sie auf der anderen Seite vielfältig auf das Klima zurück, nicht zuletzt als Speicher für Kohlenstoff.

Durch die Vernichtung der Wälder verschwinden nicht nur die Bäume, sondern auch die gesamte restliche Vegetation zersetzt sich teilweise. Feuchtgebiete werden trockengelegt. Das im Boden gebundene organische Material (z.B. Humus) wird zumindest teilweise abgebaut. Alle diese Prozesse setzen CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> frei. Seit 1850 wurden auf diese Weise ca. 20% (117 Mrd. t C) des in der Vegetation gebundenen Kohlenstoffs weltweit freigesetzt. Gleichzeitig gingen wertvolle CO<sub>2</sub>-Senken verloren.

Die Landwirtschaft und die intensive Viehhaltung sind wichtige Quellen von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O. Da die Nahrungsproduktion aufgrund der Wachstumsrate der Weltbevölkerung weiter ansteigen wird, ist hier eine weitere Zunahme der Emissionen unvermeidbar.

Methan entsteht mikrobiell nicht nur in den Böden,

Feuchtgebieten und Flachgewässern, sondern auch im Pansen der Wiederkäuer. Die Ringviehhaltung hat sich im letzten Jahrhundert vervierfacht und die Schafhaltung verdoppelt. Man schätzt bis zum Jahr 2100 noch eine Verdopplung der Anzahl der Tiere. Bei der intensiven Viehhaltung wird weit mehr CH<sub>4</sub> emittiert als bei der extensiven Bewirtschaftung. Auch bei der Lagerung der Tierexkremate (Gülle) entsteht Methan.

Aus den gleichen Gründen wie für Feuchtgebiete und Flachgewässer trägt der Reisanbau ebenfalls erheblich zur Methanfreisetzung bei. Er erfuhr in den letzten 40 Jahren eine Ausdehnung um 17%, was aufgrund der technischen Verbesserungen einer effektiven Zunahme von 41% entspricht.

Das Lachgas (N<sub>2</sub>O, Distickstoffoxid) entsteht als Zwischenprodukt bei der mikrobiellen Umsetzung von anorganischen Stickstoffverbindungen in Gewässern und vor allem in Böden. Auch bei Verbrennung organischen Materials (wie Brandrodung und Savannenbrände) bildet sich Lachgas. Ein Teil davon gelangt in die Atmosphäre, wo es im Mittel ca. 120 Jahre verbleibt. Obwohl es noch viele offene Fragen über die Bildung von N<sub>2</sub>O aus den verschiedenen Stickstoffverbindungen gibt, wird eine proportionale Abhängigkeit zwischen dem N<sub>2</sub>O-Anstieg und der starken Düngung erkannt. Mit der weltweiten Intensivierung der Landwirtschaft ist daher auch mit einer weiteren Zunahme von N<sub>2</sub>O zu rechnen.

Insgesamt sind die veränderten Energieflüsse an der Oberfläche durch Landnutzungsänderungen wie Rodung, Bewässerung, Städtebau wenig in der bisherigen Debatte um Klimaänderungen durch die Menschheit beachtet worden. Dieser anthropogene Klimaeinfluß tritt seit Jahrtausenden auf, er ist aber noch schwieriger zu bestimmen als der Einfluß von Gasen, weil je nach Aktivität Strahlungs-, Wärme- und Impulsflüsse verstärkt oder vermindert werden. Beispiele dafür sind Rodung von Wäldern und Bewässerung von Trockenzonen. Eine hinreichend räumlich aufgelöste Klimamodellierung unter veränderten Landoberflächeneigenschaften ist noch in Entwicklung.

## Das Klima des 21. Jahrhunderts – Änderungen und Folgen

Das Klima der Zukunft vorherzusagen, stellt eine der größten Herausforderungen für die Wissenschaft dar. Dafür wurden globale Klimamodelle entwickelt, die in der Lage sind, das Klimasystem in seinen wesentlichen Teilen realistisch zu simulieren. Die aus Gründen der Rechenkapazität begrenzte horizontale und vertikale Auflösung solcher Modelle sowie notwendige Vereinfachungen in der mathematischen Beschreibung komplizierter atmosphärischer Prozesse bringen unvermeidliche Fehler und Ungenauigkeiten mit sich. Um zu einer Klimaprognose zu kommen, müssen die äußeren Einflußgrößen für den Prognosezeitraum vorgegeben werden. Bei diesen handelt es sich insbesondere um die Annahme der künftigen Emission von Treibhausgasen in die Atmosphäre, die ihrerseits von der Entwicklung der Weltwirtschaft sowie Erfolg oder Mißerfolg der Klimapolitik abhängt. Es leuchtet ein, daß selbst ein vollkommenes Modell nicht zu richtigen Prognosen kommen kann, wenn diese Vorgaben nicht stimmen. Zahlreiche von den Modellen für das 21. Jh. prognostizierte Änderungen sind bereits angelaufen: Die mittlere Erwärmung, die Verschiebung der Niederschläge, der Anstieg des Meeresspiegels und die Schrumpfung der Gletscher. So ist die Masse der Gletscher in den Alpen seit 1850 um mehr als die Hälfte geschrumpft, und der Meeresspiegel steigt jährlich um etwa 2 mm an. Beobachtete und modellierte Befunde, die durch die im IPCC mitarbeitenden mehr als 2000 Wissenschaftler regelmäßig eingeschätzt werden, haben zur internationalen Klimapolitik geführt. Sie verfolgt entsprechend des auf dem Weltgipfel von Rio Janeiro 1992 angenommenen Rahmenübereinkommens zu Klimaänderungen das Ziel, die Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu stabilisieren, auf dem eine gefährliche Störung des Klimasystems verhindert wird. Das muß in einer Zeit erreicht werden, die ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise der Klimaschwankung anpassen können, die Nahrungsmittelproduktion nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann. Die Erfolge der Klimapolitik sind bisher sehr bescheiden geblieben. Mit dem Protokoll von Kioto jedoch existiert seit Dezember 1997 wenigstens ein erster bindender Vorschlag, der allerdings noch ratifiziert werden muß.

Was kann zusammen mit einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur um 1,5–4,5 °C (dies ist der noch immer anzugebende Unsicherheitsbereich für die Reaktion auf einen verdoppelten Kohlendioxidgehalt) an klimatischen Konsequenzen erwartet werden?

### *Intensivierung des Wasserkreislaufs*

Die mittlere Verdunstung und der mittlere Niederschlag werden um 3–15% ansteigen, was zu einer erheblichen Intensivierung des Wasserkreislaufes führt. Die Niederschlagszunahme wird nach den Modellbefunden jedoch regional äußerst unterschiedlich sein. Der Verstärkungseffekt wird vorwiegend in Gebieten der Tropen und der höheren Breiten erwartet, in denen ohnehin schon ausreichend Niederschläge beobachtet werden. In anderen Gebieten, so in einigen subtropischen Trockengebieten, wird der Niederschlag eher abnehmen, wodurch sich die Gegensätze zwischen trockenen und feuchten Klimaregionen verstärken. In weiten Teilen Europas kann mehr Niederschlag im Winter und weniger Niederschlag im Sommer erwartet werden. Die Häufigkeit von Starkniederschlägen soll ebenso wie die von Trockentagen in Europa zunehmen, was gleichzeitig eine Tendenz zur Zunahme von Extremereignissen bedeutet.

### *Änderung der großen Eisschilde*

Die Eisschilde der Antarktis und Grönlands haben großen Einfluß auf das Weltklima. Ihr Abschmelzen hätte einen Meeresspiegelanstieg von 70 m zur Folge. Der antarktische Eisschild hat jedoch eine annähernd ausgeglichene Massenbilanz, die auch im Fall einer allgemeinen Erwärmung zunächst beibehalten wird. Mit der Zunahme der Temperatur könnte es sogar mehr Schnee geben und dadurch eine Zunahme des Inlandeseises. In Grönland sind die Temperaturen wesentlich höher als in der Antarktis. Man rechnet daher bei fortschreitender Erwärmung der Nordhalbkugel mit einem Massendefizit. Das Schmelzen wird gegenüber der Eisbildung überwiegen.

### *Änderung der Wasserverfügbarkeit*

Die sich abzeichnenden globalen Klimaänderungen werden über die Niederschlags- und Verdunstungsschwankungen das Wasserdargebot wesentlich beeinflussen. Jedoch lassen sich die Auswirkungen für bestimmte Regionen bis jetzt nicht ausreichend genau abschätzen. In einigen Gebieten der Erde leiden die Menschen bereits heute unter akuter Wasserknappheit, die sich durch den Klimawandel in vielen Gebieten weiter verschärfen wird. Mehr als 20% der Weltbevölkerung haben schon heute keinen ausreichenden Zugang zu sauberem Trinkwasser. Dadurch sind die Nahrungsmittelversorgung und die Volksgesundheit gefährdet. Das kann politische Krisen nach sich ziehen und Massenfluchten aus Krisengebieten bewirken.

### *Rückgang der Gebirgsgletscher*

Die Gebirgsgletscher reagieren im Gegensatz zu den großen Eisschilden recht rasch auf die Klimadynamik, sie sind repräsentative Indikatoren veränderter Energiebilanzen. Der fast weltweite Rückzug der Gletscher gehört denn auch zu den sichersten Anzeichen, daß sich das Klima der Erde seit dem Ende der »Kleinen Eiszeit« bereits markant verändert hat. Neben den Alpengletschern erlitten die der Anden und der Rocky Mountains besonders hohe Verluste, während die küstennächsten Gletscher Norwegens infolge vermehrter Winterniederschläge massive Gewinne aufweisen. Der Verlust in den Alpen betrug zwischen etwa 1850 und den 1970er Jahren bereits ein Drittel ihrer Fläche und die Hälfte der Masse (vgl. *Tafel 9 und 10*). Seit 1980 sind nochmals ca. 10–20% der Fläche verlorengegangen. Der Gletschermann vom Hauslabjoch in den Ötztaler Alpen (Ötzi), der auf der Wasserscheide lag und nur deshalb 5300 Jahre liegen bleiben konnte, weil er nicht in die Gletscherbewegung einbezogen wurde, ist ein besonders markantes Beispiel für den Gletscherschwund. Die Mächtigkeit des Eises hat an dieser Stelle so niedrige Werte erreicht, wie sie seit Jahrtausenden nicht mehr vorgekommen sind. Es wird angenommen, daß es bereits im ersten Drittel des 21. Jh. zu einem markant beschleunigten Eiszerfall in den Alpen kommen wird. Insgesamt dürften um 2035 etwa die Hälfte und nach der Mitte des Jahrhunderts bereits Dreiviertel der heutigen Gletscher verschwunden sein.

### *Meeresspiegelentwicklung und Gefährdung von Küstenregionen*

Als Folge der globalen Erwärmung wird im nächsten Jahrhundert eine Erhöhung des Meeresspiegels im Mittel um 5 mm/Jahr vorhergesagt. Bei einer langsamen Zunahme des Volumens des antarktischen Eises und einer etwas schneller vor sich gehenden Volumenabnahme des grönländischen Eisschildes werden nach IPCC die thermische Ausdehnung der Deckschicht des Ozeans und das Schmelzwasser der Gletscher den Hauptanteil des Meeresspiegelanstiegs bewirken. In den Küstengebieten befinden sich nicht nur wertvolle Ökosysteme, sondern dort leben auch über 50% der Weltbevölkerung, die den natürlichen Risiken wie Stürmen, Überflutung, Küstenerosion und Versalzung ausgesetzt sind. Nicht alle Küsten- und Inselländer werden in der Lage sein, ihr Küstengebiet wirksam zu schützen.

### *Zunahme der Desertifikation*

Es wird angenommen, daß heute bereits bis zu 20 Mio. km<sup>2</sup> der Festlandsfläche von der Wüstenbildung erfaßt sind, die überwiegend auf falsche landwirtschaftliche und wasserwirtschaftliche Praktiken zurückzuführen ist.

Das ist eine Fläche so groß wie USA und Kanada zusammen. Zurückhaltendere Schätzungen gehen von ca. 10 Mio. km<sup>2</sup> aus. Die jährliche Ausbreitungsrate beträgt in Mittelasien, Nordwestchina, Nordafrika und in der Sahelzone 0,5–0,7%. Bei 0,5% wird jährlich eine Fläche von 80 000 km<sup>2</sup> erfaßt, was etwa der Fläche Österreichs entspricht. Verläuft die Entwicklung weiter ungebremst, so können im 21. Jh. nahezu alle Böden im ariden und semi-ariden Bereich betroffen sein. Der dort ansässigen Bevölkerung (gefährdet sind etwa 1 Mrd. Menschen) wird dadurch die Grundlage ihrer Existenz entzogen. Die voraussichtliche künftige Klimaentwicklung wird die Desertifikation durch Abnahme der Niederschläge in vielen Trockengebieten noch verstärken.

### *Veränderung der globalen Vegetation*

Tiefgreifende Klimaschwankungen haben immer wieder zu drastischen Änderungen der Vegetationsverteilung geführt, so die Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten im Pleistozän. Erste Abschätzungen darüber, welche Pflanzengesellschaften in welchen Regionen von einer Klimaänderung betroffen sein können, liefern Biosphärenmodelle. So folgt aus entsprechenden Modellrechnungen, daß sich bei der Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Atmosphäre die Tundra, die Taiga, die warmgemäßigten sommergrünen Wälder und die warmtemperierten immergrünen Wälder um bis zu 600 km polwärts verlagern könnten. Die tropischen Regenwälder könnten sich weiter als bisher ausdehnen. Allerdings bleibt unklar, wie sich die Vegetation in den betroffenen Regionen tatsächlich anpassen wird. Wenn sich die Vegetationszonen wegen der beschleunigt eintretenden Erwärmung zu schnell verschieben würden, dann würde die Anpassungsfähigkeit vieler Pflanzen überfordert, was wiederum mit einer Änderung der Zusammensetzung der Pflanzengesellschaften verbunden wäre. Zu beachten ist auch, daß der zunehmende CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre direkt auf die Pflanzen einwirkt. So ist die Klimawirkung auf die Pflanze sehr komplex. Dazu gehört auch, daß sich der Abbau von organischem Material im Boden ebenso erhöhen wird wie die Evapotranspiration, d.h. die Gesamtverdunstung von Boden und Pflanze.

### *Einfluß auf die Landwirtschaft*

Der klimaempfindlichste Wirtschaftsbereich ist die Landwirtschaft. Die schon zahlreich vorliegenden Untersuchungen zeigen, daß sowohl die Erträge der verschiedenen Kulturen als auch deren Schwankungen (die das Risiko des Anbaus bestimmen) regional und lokal stark verschieden sein werden. Es wird abgeschätzt, daß im Fall einer Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Atmosphäre gegenüber dem vorindustriellen Wert im globalen Mittel (ohne Klimaschutz schon zur Mitte des

nächsten Jahrhunderts überschritten) die Erträge des Pflanzenbaus im wesentlichen erhalten bleiben. Verschiebungen der Klima- und Vegetationszonen nach Norden und in höhere Lagen bedingen aber besonders in den Übergangsbereichen starke regionale Effekte. In den Trockengebieten der Erde wird voraussichtlich das Risiko für Unterernährung zunehmen, da die Erfordernisse für eine Anpassung wie Änderung der eingesetzten Sorten, wasserwirtschaftliche Maßnahmen, Bodenverbesserung im allgemeinen nicht aufgebracht werden können. In den bisherigen Untersuchungen wird in der Regel der wachstumsfördernde Effekt eines höheren Kohlendioxidgehaltes der Luft berücksichtigt. Kaum zu erfassen sind bisher künftige Erfordernisse in der Schädlings- und Pflanzenkrankheitsbekämpfung, die ebenfalls eine starke klimaabhängige Komponente haben. Die Ernteerträge hängen aber nicht nur von den mittleren Klimabedingungen eines Standortes ab, sondern vor allem von dem charakteristischen Witterungsablauf in der Vegetationsperiode, der die normale Variabilität der meteorologischen Größen bestimmt. In diesem Zusammenhang spielen Form und Amplitude der Jahresgänge der Klimatelemente und ihre Veränderungen eine bedeutende Rolle. Die Wachstumsperioden für einige Kulturen werden sich um 3–4 Wochen verkürzen, an anderen Stellen aber auch verlängern, wobei nicht nur die Erntezeit, sondern auch die Entwicklungsstadien der Pflanzen betroffen sind. Erwähnt sei, daß gerade die Landwirtschaft ihrerseits mit beachtlichen 15% zur Emission klimarelevanter Spurengase beiträgt.

#### *Veränderung des Stadtklimas*

Durch die Urbanisierung (Ausbreitung der Stadtflächen) vollzieht sich seit langem eine bedeutende Veränderung der Landnutzung. Um das Jahr 2000 werden 50% der Weltbevölkerung in Städten leben. Hundert Jahre zuvor waren es nur 14%. Mexiko-City wird 2000 etwa 26 Mio. Einwohner haben. Aus diesen Gründen wird die Entwicklung des Stadtklimas die Gesundheit der Menschen erheblich beeinflussen. Als Folge der allgemeinen Klimaerwärmung ist eine Verschlechterung der atmosphärischen Umweltqualität einer Stadt vor allem bezüglich der Lufttemperatur und Lufthygiene zu erwarten. Die Anzahl der Tage mit hohen sommerlichen Lufttemperaturen wird sich im Mittel erhöhen. Diese Erkenntnisse müssen sich heute schon im Städtebau niederschlagen, um gute urbane Lebensbedingungen zu erhalten.

#### *Beeinträchtigung der Volksgesundheit*

Von allgemeiner Bedeutung ist die Frage, ob Klimaschwankungen die Volksgesundheit beeinflussen können. Es besteht wahrscheinlich ein breiter und meist ungünstiger direkter und indirekter Einfluß auf die Gesundheit. Von direktem Einfluß sind häufiger eintretende Hit-

zwellen im Sommer sowie Wetterextreme. Es wurden dramatische Steigerungen der Todesfälle infolge von Hitzebelastung für verschiedene Städte berechnet, die ohne Klimatisierung das Mehrfache der heutigen Werte betragen. Die indirekten Einflüsse betreffen die Klimaabhängigkeit des Auftretens von Parasiten und Mikroorganismen, von Infektionsbedingungen u.a. Wie aus noch einfachen Modellrechnungen hervorgeht, vergrößert sich der Anteil der Weltbevölkerung, der in der Zone der Malariaausbreitung lebt, von 45 auf 60% in der zweiten Hälfte des 21. Jh. Es wird mit 10–15% zusätzlicher Fälle pro Jahr gerechnet, insbesondere in den Tropen, Subtropen und in den Teilen der mittleren Breiten, deren Bevölkerung nicht hinreichend geschützt ist. Auch für andere Infektionskrankheiten wird mit einer Ausbreitung gerechnet. Geeignete Gegenmaßnahmen müssen daher rechtzeitig eingeleitet werden.

Obwohl der Ausstoß von ozonzerstörenden Substanzen (Halogene und FCKW) durch das Montrealer Abkommen von 1987 geregelt und limitiert ist, muß mit niedrigen Werten des stratophärischen Ozons noch bis in die ersten Jahrzehnte des 21. Jh. gerechnet werden. Bis dann ist der Mensch, aber auch Pflanzen und Tiere, einer verstärkten UV-Strahlung ausgesetzt. Krankheiten, wie Hautkrebs (2 Mio./Jahr) und Erblindungen (12–15 Mio./Jahr), die eindeutig aufgrund der intensiven UV-Strahlung entstehen, werden noch zunehmen.

Diese Beispiele mögen genügen, um deutlich zu machen, daß der tiefgreifende Klimawandel im beginnenden Jahrhundert das Umweltproblem Nr. 1 in der Welt werden wird. Die Klimaforschung muß mit verbessertem Verständnis des Klimasystems und seiner umfassenden Modellierung dazu beitragen, daß die Konturen dieses Klimawandels zusehends klarer werden. Es soll hier nicht von Klimakatastrophe gesprochen werden. Die Folgen werden in einigen Regionen zwar katastrophal sein, in anderen werden sie eher verkraftbar und in anderen für bestimmte Sektoren sogar positiv sein. Das Bedrohlichste ist indes, daß der Mensch die Zusammensetzung der Atmosphäre gestern wie heute ohne Berücksichtigung der Folgen für Natur und Gesellschaft verändert. Es ist das unbestreitbare Verdienst der Klimaforschung, die Möglichkeit einer menschengemachten Klimaänderung der breiten Öffentlichkeit bewußt gemacht zu haben. Eine Reaktion war die Etablierung der Klimapolitik, die dem hemmungslosen Mißbrauch der Atmosphäre Einhalt zu gebieten sucht. Einschränkung der Emissionen, klimaschützender Umgang mit den Wäldern, weitere Entwicklung der Klimaforschung, Studium der möglichen Folgen des Klimawandels und Training von Anpassung – das sind einige Hauptlinien zur Erfüllung der Klimakonvention und damit zur Annäherung an eine nachhaltige Entwicklung.

---

## Wastun?

Während es sich besonders seit dem Beginn der industriellen Entwicklung ganz »natürlich« ergab, den gasförmigen Abfall der Gesellschaft in die Luft abzulassen, ist die Verminderung oder gar Abstellung der Emission von Treibhausgasen in die Atmosphäre ein äußerst zäher politischer und ökonomischer Prozeß. Das betrifft insbesondere die Kohlenstoffemission in Form von CO<sub>2</sub>, die mit der weltweit vorherrschenden Form der fossilen Energieumwandlung untrennbar verbunden ist. Ähnlich verhält es sich auch mit den klimawirksamen Veränderungen der Erdoberfläche. So folgt einer schnellen Entwaldung, wenn überhaupt, nur eine sehr langsame Erholung und Rekultivierung.

Die schon zu Beginn des vorausgegangenen Abschnittes kurz charakterisierte Klimapolitik sieht sich mit einer Reihe von Faktoren konfrontiert, die praktische Maßnahmen zum Klimaschutz behindern und verzögern.

Der *Ursache/Wirkungs-Faktor* betrifft den Widerspruch zwischen der vor allem von den Industrieländern ausgehenden Emission von Treibhausgasen und den Auswirkungen einer anthropogenen Klimaänderung, die nicht nur die Verursacher trifft, sondern alle Staaten und Regionen der Erde. Die ärmeren Länder sind verwundbarer als reichere und leiden unter den Veränderungen ihrer Lebensbedingungen, die sie garnicht verursacht haben. Andererseits haben sie einen Anspruch auf angemessene Entwicklung, die mit einem entsprechenden Energieeinsatz verbunden ist.

Der *wirtschaftliche Faktor* ist äußerst schwerwiegend, denn er betrifft die Tatsache, daß Klimaschutz die Einschränkung der vorherrschenden Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas bedeutet. Dazu kommt, daß die mögliche Alternative Kernenergie mit spezifischen Risiken behaftet ist und daher von der Gesellschaft nicht durchgängig akzeptiert wird. Es nimmt daher nicht wunder, daß erdölproduzierende Länder, Länder mit hohem Energieverbrauch und nicht zuletzt die transnationalen Energiekonzerne an Einschränkungen ihrer Gewinne und ihres Wohlstandes zugunsten des Klimaschutzes nicht vorrangig interessiert sind. Unrealistische Zielstellungen müssen daher vermieden, wohl aber strenge Sparmaßnahmen staatlich durchgesetzt werden. Unter anderem müssen die technologischen Vorteile, die sich aus Klimaschutzmaßnahmen ergeben können, konsequent gefördert werden.

Der *globale Faktor* bringt zum Ausdruck, daß das Klimaproblem im Gegensatz zu anderen Umweltproblemen in vollem Maße globaler Natur ist. Die in Gang gekommene ökonomische Globalisierung bringt keinen globalen Umwelt- und Klimaschutz mit sich, da

sich dieser weder produktivitätssteigernd noch gewinnmaximierend auswirkt (»sich nicht rechnet«). Den globalen Erfordernissen des Klimaschutzes muß vielmehr auf der Grundlage internationaler Verträge durch die Gesetzgebung jedes einzelnen Landes Rechnung getragen werden. In diesem Zusammenhang muß auch hervorgehoben werden, daß sich der Klimawandel vor dem Hintergrund einer starken Vergrößerung der Weltbevölkerung vollzieht.

Der *Zeitfaktor* spielt für die Frage der anthropogenen Klimaänderung eine ganz besonders wichtige Rolle. Es gibt wohl kein anderes globales Problem, für dessen Lösung heute gehandelt werden muß, damit erst in mehreren Jahrzehnten möglichst geringe negative Folgen für die Menschheit eintreten. Das ist dem Bürger schwer zu vermitteln, zumal die Klimaprognosen objektiv mit Unsicherheiten behaftet sind.

Der *Anti-Faktor* berücksichtigt schließlich die Gesamtheit der »aktiven Maßnahmen«, um Medien, Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit in dem Sinne zu beeinflussen, daß es ein Klimaproblem in der Schärfe, wie sie auch in diesem Buch zum Ausdruck kommt, garnicht existiert. Es werden bspw. Zweifel an der Existenz des Treibhauseffekts geweckt, andere klimabildende Prozesse überbewertet und Ergebnisse der seriösen Klimaforschung diffamiert.

Vor diesem Hintergrund müssen die Konvention zur Klimaschwankung und die zu ihrer Umsetzung einberufenen jährlichen Klimakonferenzen als ein Durchbruch zu einer globalen Umweltpolitik gewürdigt werden, auch wenn konkrete Fortschritte lange dauern und die Schritte klein sind.

Da es als unsicher angesehen werden muß, daß die Ziele des Klimaschutzes rechtzeitig und im erforderlichen Umfang erreicht werden, ist es erforderlich, auch die Möglichkeiten der Anpassung von natürlichen und zivilisatorischen Systemen an ein verändertes Klima genauer zu untersuchen und international in gegenseitiger Unterstützung vorzubereiten. Bei allen Unsicherheiten, die bezüglich der Frage der weiteren Entwicklung des Klimas noch bestehen mögen und auch der Möglichkeit, daß überraschende Entwicklungen nicht ausgeschlossen sind, bleiben als unverrückbare Warnsignale die immer noch ungehemmte Emission von Spurengasen in die Atmosphäre, die die Strahlungsbilanz der Atmosphäre und der Erdoberfläche vergrößert, und die in gleiche Richtung wirkenden anthropogenen Veränderungen der Erdoberfläche bestehen. Allein diese Tatsachen rechtfertigen die Unterstützung aller Maßnahmen des Klimaschutzes sowohl im internationalen als auch im privaten Bereich jedes einzelnen Menschen□