

Bedrohliche Klimaänderungen erfordern weltweit eine vernünftige Energieerzeugung

Die irdische Treibhauserwärmung durch Spurengase in der Luft wird skizziert. Sie wird erläutert am natürlichen Wechsel zwischen Eis- und Warmzeiten und am vom Menschen verursachten Anstieg der Spurengase (Kohlenstoffdioxid, Methan, Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Distickoxid und troposphärisches Ozon) und damit der Temperatur auf der Erde, dies sowohl für die vergangenen hundert Jahre als auch extrapoliert ins nächste Jahrhundert.

Das Ausmaß der benötigten Minderung der künftigen Spurengasemissionen, die Möglichkeiten der künftigen Energieversorgung und die ersten politischen Schritte zum Schutz der Erdatmosphäre werden angesprochen.

Verfasser: Prof. Dr. Klaus Heinloth, Physikalisches Institut der Universität Bonn, Nußallee 12, 5300 Bonn 1

Soviel Energie, wie die Sonne auf die Erde einstrahlt, strahlt die Erde in Form von Wärme in den Weltraum zurück. Dabei bleibt die Temperatur auf der Erde – zunächst von natürlichen Schwankungen abgesehen – im globalen, jahreszeitlichen Mittel konstant.

Die Sonneneinstrahlung von sichtbarem Licht erlaubt den Bestand und die weitere Entwicklung des reichen organischen Lebens zu Wasser und zu Land. Dies hängt aber des weiteren ganz entscheidend von der Zusammensetzung der Atmosphäre ab, und zwar nicht nur vom Sauerstoff mit einem Luftanteil von 21 Prozent, sondern auch ganz wesentlich von den winzigen Mengen einiger für das Klima sehr bedeutsamer Spurengase.

1 Treibhauseffekt und UV-Filter der Atmosphäre

In der Stratosphäre, also in Höhen von etwa 12 bis 50 Kilometern, wird die für das organische Leben äußerst schädliche Ultraviolett-Strahlung (UV) der Sonne durch das Ozon – mit nur einigen Millionstel Anteil am Luftvolumen der Stratosphäre – in einem photochemischen Kreisprozeß fast vollständig abgefiltert.

In der Troposphäre, in Höhen vom Boden bis zu etwa 12 km, lassen die Spurengase Kohlenstoffdioxid (CO_2), mit einem Anteil am Luftvolumen von etwa 0,3 Promille, und Wasserdampf, mit einem Anteil von im Mittel einigen Promille, das sichtbare Sonnenlicht auf die Erde unbehindert einstrahlen, behindern dagegen die Wärmeabstrahlung von der Erde in den Weltraum durch Absorption und nachfolgend ungerichtete Emission nachhaltig. Letztere bedingt eine Wärmerückstrahlung hin zur Erdoberfläche in Höhe von etwa 70 Prozent der eingestrahnten Sonnenenergie, bedingt damit, zusammen mit der Sonneneinstrahlung, eine mittlere Temperatur nahe der Erd-

oberfläche von etwa $+15\text{ }^\circ\text{C}$: Diese Temperatur ist um etwa $33\text{ }^\circ\text{C}$ höher als diejenige, die durch Sonneneinstrahlung alleine erreicht würde. Dies nennt man den natürlichen Treibhauseffekt.

Wenn also bestimmte Spurengase mit nur einem Anteil am Luftvolumen von der Größenordnung eines Promille bereits eine um 33 Grad höhere Temperatur auf der Erde bewirken, kann es kaum verwundern, daß bereits kleine Konzentrationsänderungen dieser Spurengase merkbare Änderungen von Temperatur und Klima auf der Erde zur Folge haben.

2 Natürliche Schwankungen von Treibhauseffekt und Ozon-UV-Filter

Kleine periodische Schwankungen der Umlaufbahn der Erde um die Sonne, nämlich der Exzentrizität und der Schiefelage der Erdrotationsachse gegen die Achse der Umlaufbahn, führten in der letzten Jahrmillion etwa 10mal zu einem Wechsel zwischen Eiszeit und Warmzeit.

Diese Schwankungen der Erdumlaufbahn lassen die globale Sonneneinstrahlung unverändert, wohl aber verändern sie den jahreszeitlichen Unterschied der Einstrahlung in Sommer und Winter. Entsprechend verändern sich dadurch die Windströmungen und die horizontalen und die vertikalen Meeresströmungen. Letztere bewirken über das Aufströmen nährstoffreichen Tiefenwassers eine Mengenveränderung bei der Bildung von Plankton und entsprechend veränderte CO_2 -Aufnahme der Meere aus der Luft mit nachfolgender Ablagerung des CO_2 in Form von Karbonat am Meeresboden. Dies führt zu einer Änderung des CO_2 -Gehaltes der Luft, damit zu einer Änderung der Wärmerückstrahlung aus der Atmosphäre zur Erde, damit zu einer Änderung der Temperatur und damit wiederum zu einer Änderung des Wasserdampfgehaltes der Luft und wiederum der Tempera-

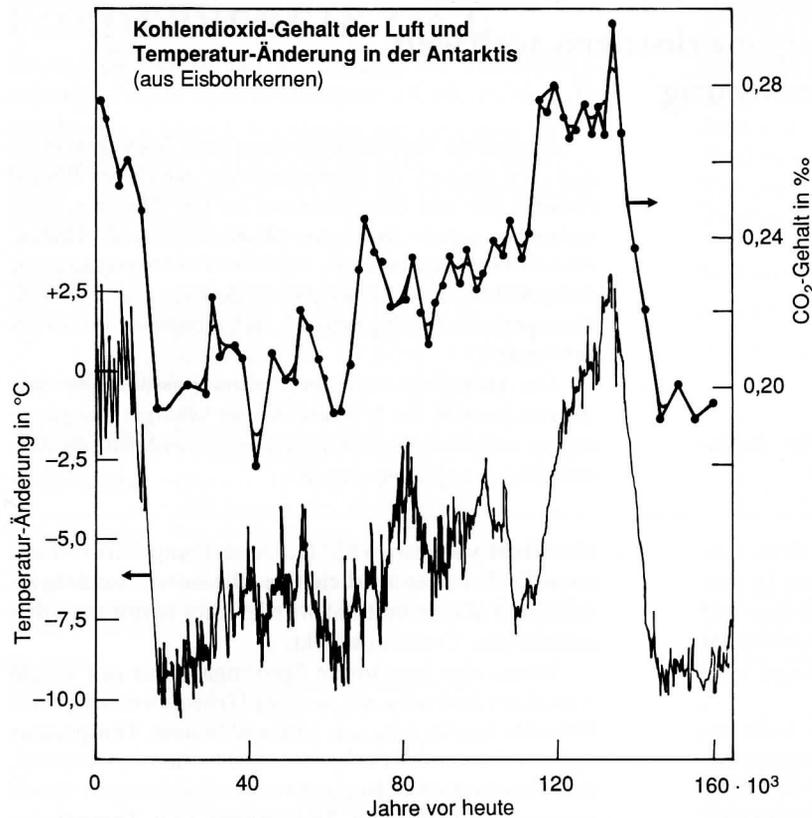


Abb. 1

tur. So schaukeln sich die Übergänge zwischen Warmzeiten und Eiszeiten schrittweise auf.

Aus Einschlüssen im Eis der letzten 160 000 Jahre aus Bohrungen im antarktischen Eis [1] können wir entnehmen (s. Abb. 1), daß der CO_2 -Gehalt der Luft während der letzten beiden Eiszeiten bis um etwa ein Drittel vermindert war gegenüber dem CO_2 -Gehalt während der Warmzeiten heute und vor etwa 120 000 Jahren. Zeitlich korreliert damit war die Temperatur in der Antarktis während der Eiszeiten um bis zu 10° tiefer als zu den Warmzeiten. Im weltweiten jahreszeitlichen Mittel lag sie um etwa 5° tiefer.

Von den derzeitigen Eingriffen des Menschen in die Zusammensetzung der Atmosphäre abgesehen wäre die nächste natürliche Eiszeit in etwa 15 000 bis 20 000 Jahren zu erwarten.

Des weiteren ist auch der Ozongehalt der Stratosphäre natürlichen Schwankungen unterworfen, und zwar von einem bis einigen wenigen Prozent, bedingt durch die periodisch schwankenden Sonnenflecken-Aktivitäten.

3 Menschliche Eingriffe in die Atmosphäre – Bisherige Freisetzung von Spurengasen und Temperaturanstieg

Menschliche Aktivitäten, deutlich zunehmend seit Beginn der Industrialisierung mit dem starken Bevölkerungswachstum und den steigenden Konsum-

dürfnissen der Menschen, bedingen entsprechend zunehmende Emissionen klimarelevanter Spurengase in die Atmosphäre [2].

3.1 Kohlenstoffdioxid (CO_2)

Kohlenstoffdioxid wird freigesetzt zum einen durch Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas – zusammen weltweit zu Beginn des Jahrhunderts noch etwa 1 Milliarde Tonnen Kohlenstoff (C) pro Jahr, derzeit bereits etwa 6 Mrd. t C pro Jahr –, zum anderen sowohl durch Entwaldung (derzeit vornehmlich der tropischen Regenwälder) als auch durch Bodenemission (durch intensive landwirtschaftliche Nutzung); dadurch ergibt sich derzeit zusammen eine weltweite CO_2 -Freisetzung in Höhe von etwa 1 bis 2 Mrd. t C pro Jahr. Gemäß wohlverstandener Naturgesetze wurde bislang immer etwa eine Hälfte der Menge des so freigesetzten CO_2 in der Oberflächenschicht der Meere absorbiert; eine Hälfte ist auf Dauer in der Luft verblieben.

Dadurch ist seit etwa 100 Jahren der Gehalt der Luft an CO_2 global gleichmäßig von etwa 0,28 auf 0,35 Promille angestiegen, also bisher bereits um 25 Prozent über den natürlichen Wert zu Beginn der Industrialisierung (s. Abb. 2). Ein natürlicher Abbau dieser Überhöhung des CO_2 -Gehaltes der Luft kann vornehmlich durch Einbringung von CO_2 in große Meeresstiefen durch Diffusion und Meeresströmungen

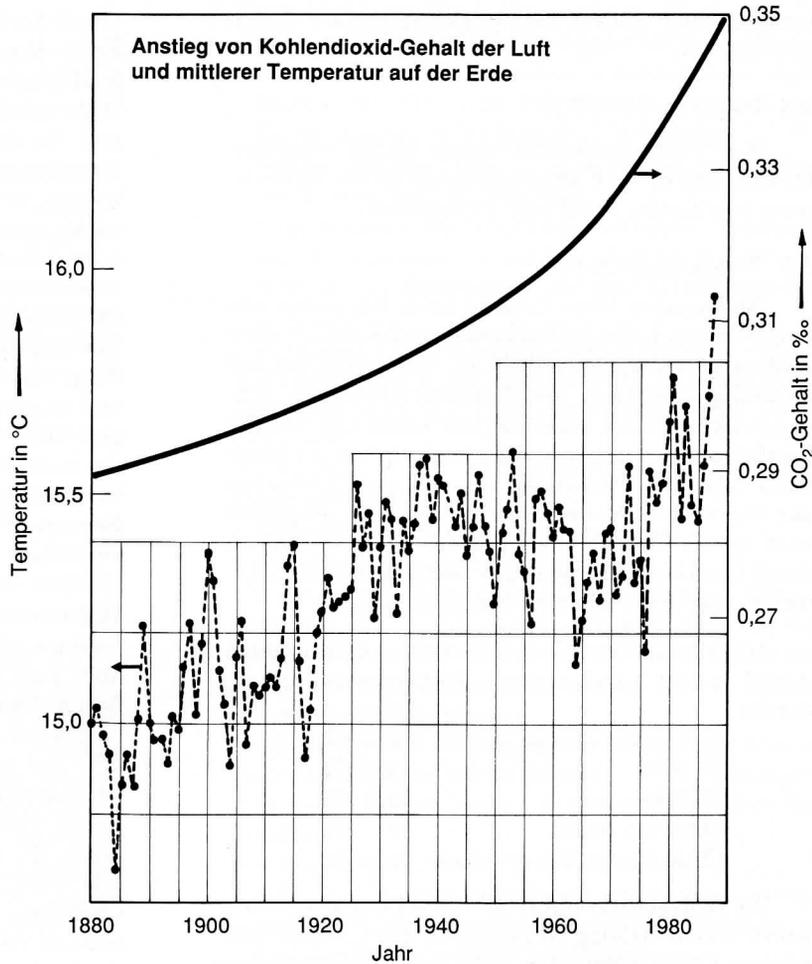


Abb. 2

folgen, dauert aber wegen der Langsamkeit dieser Prozesse viele hundert Jahre.

1.2 Methan (CH₄)

Noch vor hundert Jahren war der Methangehalt der Luft von etwa 0,7 Millionstel für den Treibhauseffekt vernachlässigbar gering. Seither ist er aber bereits auf fast das Dreifache angestiegen. Die Hauptquellen der zunehmenden Methanfreisetzung sind zum einen die Verdauungstrakte der Rinder und die Sumpfreisfelder; Großviehzucht und Reisanbau sind mit steigender Weltbevölkerung entsprechend angewachsen. Zum anderen wird Methan bei der Förderung von Kohle, Erdöl und Erdgas freigesetzt. Künftig wird sich eine weitere intensive Methanquelle auf tun: Mit steigender Treibhauserwärmung werden die Dauerfrostböden in Sibirien und Alaska zunehmend tiefer auftauen und entsprechend mehr Methan emittieren.

1.3 Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW)

FCKW sind künstliche Gase, die erst seit einigen Jahrzehnten in größerem Umfang benutzt werden,

derzeit vornehmlich zur Aufschäumung von Kunststoff-Hartschäumen, als Kühlmittel in allen Klima- und Kälteanlagen und als Lösungs- und Reinigungsmittel vor allem bei der Herstellung von Elektronikbausteinen. Diese Gase sind chemisch extrem reaktionsträge, verbleiben deshalb, einmal emittiert, für eine Größenordnung von 100 Jahren unverändert in der Luft. Als sehr treibhauswirksame Gase werden sie durch ihre ständige Anreicherung in der Troposphäre für die zunehmende Treibhauserwärmung immer bedeutsamer.

Schließlich abgebaut werden sie nur in der Stratosphäre. Bei diesem Prozeß führen sie aber zu einer, entsprechend ihrer Anreicherung, zunehmenden Zerstörung der Ozon-Schutzschicht: Diese ist so auf Dauer im globalen Mittel bereits um einige Prozent, in südlichen Breiten zwischen 50° und 60° bereits um etwa 10% vermindert worden, wodurch sich die UV-Einstrahlung am Boden um etwa entsprechende Prozentsätze erhöht hat. Über dem Südpol bewirken die FCKW jährlich wiederkehrend im antarktischen Frühling kurzzeitig das sogenannte Ozonloch, einen

weitgehenden Abbau der stratosphärischen Ozonschicht.

3.4 Distickstoffoxid N_2O

N_2O wird vornehmlich erzeugt bei der mikrobiellen Zersetzung von Kunstdünger und bei der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Treibstoffen.

3.5 Bodennahes Ozon

Bodennahes Ozon entsteht beim Einwirken von kurzwelligem Licht auf Stickoxide und Kohlenwasserstoffe, sog. Smoggas, in der Luft. Bei starker Sonneneinstrahlung in staub- und dunstfreien Gebieten, z. B. in den Grüngürteln außerhalb der Städte und fern der Straßen und besonders in den klaren Höhen der Berge kann dabei der Ozongehalt kurzzeitig ein Vielfaches der natürlichen Konzentration erreichen. Abgebaut wird dieses Ozon wieder binnen weniger Stunden durch Oxidationsprozesse, z. B. an Pflanzen und Lebewesen, mit entsprechender Schädigung dieser.

All die genannten Gase haben einen bedeutsamen Anteil an der zunehmenden Treibhause Erwärmung, derzeit

Kohlenstoffdioxid	ca. 50 %
Methan	ca. 20 %
FCKW	ca. 17 %
Distickstoffoxid	ca. 5 %
Ozon (in der Troposphäre)	ca. 8 %

Die Wärmewirksamkeit all dieser Gase zusammen würde einem Anstieg von CO_2 auf das 1,5fache (»effektiver CO_2 -Gehalt« der Luft) des vorindustriellen Gehalts der Luft an CO_2 entsprechen.

Dieser Anstieg hat eine Temperaturerhöhung zur Folge: seit etwa 100 Jahren hat die Temperatur auf der Erde im globalen jahreszeitlichen Mittel bereits um etwa $0,7^\circ C$ zugenommen [3] (s. Abb. 2), gegen den Spurengasanstieg um wenige Jahrzehnte verzögert, bedingt durch die träge Erwärmung der Deckschicht der Meere. Im Temperaturgleichgewicht ist für den derzeitigen Spurengasgehalt der Atmosphäre eine Erwärmung um insgesamt etwa $1,5^\circ C$ zu erwarten.

4 Künftige Freisetzung von Spurengasen und entsprechender Temperaturanstieg

Wie werden sich die menschlichen Eingriffe in die Atmosphäre und damit in das Klima in Zukunft fortsetzen?

4.1 Kohlenstoffdioxid

Durch Verbrennung von Kohle, Öl und Gas wird derzeit der weltweite Energiebedarf zu etwa 90% gedeckt. Die Industrieländer mit ihrer Bevölkerung von insgesamt etwa 1 Milliarde Menschen haben an die-

sem Bedarf einen Anteil von fast $\frac{3}{4}$, die Schwellen- und Entwicklungsländer mit einer Bevölkerung von etwa 4 Milliarden bislang nur einen Anteil von etwa $\frac{1}{4}$. Während die Bevölkerung der Industrieländer stagniert und ihr künftiger Energiebedarf durch effizientere Energienutzung zumindest mäßig rückläufig sein könnte, wird die Bevölkerung der Schwellen- und Entwicklungsländer innerhalb weniger Jahrzehnte voraussichtlich um weitere 2 bis 4 Milliarden Menschen anwachsen; der Energiebedarf in diesen Ländern - pro Kopf im Mittel derzeit nur etwa $\frac{1}{10}$ des mittleren Pro-Kopf-Bedarfs in den Industrieländern - wird, bedingt durch Bevölkerungswachstum, Verstädterung und zunehmende Industrialisierung, weiter ansteigen. Dieser Anteil hat derzeit eine jährliche Zunahme des weltweiten Energiebedarfs um etwa 2% und eine entsprechende Entwicklung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe unter Freisetzung von Kohlenstoffdioxid zur Folge.

Eine weitere CO_2 -Quelle ist die zunehmende Waldzerstörung [4], heute noch vornehmlich das Abbrennen der tropischen Regenwälder. Bald werden aber auch die Wälder in den gemäßigten und nördlichen Zonen der Erde betroffen sein: Nur bei einer langsamen Temperaturänderung von höchstens 1 bis $2^\circ C$ pro Jahrhundert können sich diese Wälder den veränderten klimatischen Bedingungen anpassen, durch Nachwachsen entsprechend angepaßter Baumarten. Bei einem zu raschen Temperaturanstieg, wie z. B. dem bei ungebremster Spurengasemission zu erwartenden Anstieg um etwa 4 bis $8^\circ C$ innerhalb der nächsten 100 Jahre, werden alle Wälder sukzessive dem Klimastreß zum Opfer fallen ohne Chance für eine Wiederaufforstung und ein Nachwachsen angepaßter Baumarten. Dabei würde, ganz abgesehen von Auswirkungen auf den Wasserkreislauf auf der Erde, nach und nach zusätzlich CO_2 freigesetzt, entsprechend einer Verbrennung fossiler Brennstoffe etwa in Höhe des 10fachen des derzeitigen weltweiten Jahresverbrauchs.

4.2 Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Halone

Es ist zu hoffen, daß die künftige Nutzung von allen Arten von FCKWs und auch von Halonen (Fluor-Brom-Kohlenwasserstoffe) nicht nur - wie für einige dieser Stoffe im Protokoll von Montreal 1987 international vereinbart - beschränkt wird, sondern, gemäß zu verschärfender Vereinbarungen, bis zum Jahr 2000 praktisch völlig eingestellt wird.

Selbst unter diesen Umständen wird - bedingt durch die lange Verweilzeit dieser Gase in der Atmosphäre - in den kommenden Jahrzehnten die stratosphärische Ozonschicht weiter um mehrere Prozent vermindert werden, die UV-Einstrahlung bodennah entsprechend erhöht werden.

4.3 Methan

Angesichts der weiter stark zunehmenden Erdbevölkerung und der damit zu erwartenden Steigerung von Reisanbau und Viehzucht und angesichts der zu erwartenden Zunahme der Methanemission aus den auftauenden Dauerfrostböden in Alaska und Sibirien wird ein weiterer deutlicher Anstieg des Methangehalts der Atmosphäre wohl kaum vermieden werden können.

Insgesamt würde bei einer künftigen Freisetzung der genannten Spurengase im skizzierten Umfang der effektive CO_2 -Gehalt der Atmosphäre schon bis zum Jahre 2030 auf das 2fache des vorindustriellen Wertes, gegen Ende des nächsten Jahrhunderts bereits auf das 4fache des vorindustriellen Wertes angestiegen sein.

Die mittlere globale Temperatur auf der Erde würde bei dieser Zunahme des Spurengasgehaltes bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts um etwa 2 bis 4 °Celsius, bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts um etwa 4 bis 8 °Celsius über den Wert zu Beginn dieses Jahrhunderts ansteigen.

Dieser Temperaturanstieg wird mittels Klimamodellrechnungen [5] vorhergesagt, welche sowohl den bisherigen Temperaturanstieg von 0,7 °C als auch den Temperaturwechsel von etwa 5 °C zwischen den letzten Eiszeiten und Warmzeiten richtig wiedergeben. Die noch bestehenden Unsicherheiten bei diesen Modellrechnungen, z. B. durch die Unkenntnis der genauen Veränderung der Wolkenbildung bei höheren Temperaturen, schlagen sich in den angegebenen Schwankungsbreiten des prognostizierten Temperaturanstiegs nieder.

Bedrohliche Veränderungen der Lebensbedingungen auf der Erde werden nicht nur vom Temperaturanstieg an sich bedingt, sondern mehr noch durch die Schnelligkeit des zu erwartenden Temperaturanstiegs, welcher eine stetige Anpassung der Natur an die Klimaänderungen extrem erschwert und unter Umständen Wunden von solchem Ausmaß erzeugt, daß ein Ausheilen sehr lange dauert oder gar unmöglich wird.

Rasche Temperaturänderungen, allerdings beschränkt auf ein bis einige wenige Grad Celsius sind auch natürlicherweise gelegentlich beim Übergang zwischen Eiszeiten und Warmzeiten aufgetreten, damals aber in einer praktisch menschenleeren Welt.

5 Sichere Auswirkungen eines Anstiegs der mittleren globalen Temperatur bereits um nur einige wenige Grad Celsius

Als sichere Auswirkungen eines Temperaturanstiegs schon von einigen wenigen Grad Celsius, welcher ohne drastische Reduktion der Spurengasemissionen innerhalb weniger Jahrzehnte eintreten wird, sind u. a. folgende Veränderungen zu erwarten:

- noch mehr Regen in den feuchten Tropen,
- Ausweitung der tropischen Trockenzonen nach Norden in die heute fruchtbaren subtropischen Kornkammern in Südeuropa, USA, China, . . .
- wärmere Winter, höhere Niederschläge in gemäßigten Breiten, z. B. Nordeuropa,
- Verschiebung der landwirtschaftlichen Anbauzonen nach Norden; damit vor allem wegen der geringeren Sonneneinstrahlung eine Minderung der Ernteerträge.

Bei diesen Klimaverschiebungen wird es nur wenige »Gewinner« geben, und dies nur auf sehr beschränkte Zeit; über kurz oder lang werden alle Völker »Verlierer« sein:

Zunahme von Klima-Anomalien bezüglich Häufigkeit und Ausmaß, z. B.

- Unwetter, Wirbelstürme, Sturmfluten,
- extreme Dürre- und Regenperioden.

Anstieg des Meeresspiegels um etwa 1 Meter, bedingt durch das Abschmelzen von Festlandeis, vor allem der Gletscher, Rückgang der wasserstauenden Feuchtgebiete, Wärmeausdehnung des Meerwassers bei steigender Temperatur.

Erste Ansätze all dieser – zumeist mittels Klimamodellrechnungen vorhergesagter – Veränderungen sind heute bereits mehr oder minder deutlich erkennbar.

Folgen dieser Veränderungen werden sein:

- zum einen weniger Nahrung (– auch durch vermehrte Schädigung erhöhter UV-Einstrahlung –), und dies bei steigender Erdbevölkerung,
- zum anderen die Vertreibung von bis zu vielen hundert Millionen Menschen aus den ungeschützten Küstengebieten und den neuen Trockengebieten.

6 Wahrscheinliche Auswirkungen eines raschen Temperaturanstiegs um mehrere Grad Celsius und einer wesentlich erhöhten UV-Einstrahlung

Folgen eines Temperaturanstiegs um mehrere Grad Celsius innerhalb weniger Jahrzehnte können sein:

- Absterben zunächst aller natürlichen Wälder in den gemäßigten und nördlichen Breiten; dies betrifft etwa 60% des weltweiten Waldbestandes. Im Streß der raschen Klimaveränderungen geschwächt, können diese Wälder Krankheiten, Stürmen und Feuer vermehrt zum Opfer fallen. Für einen Erhalt der Wälder selbst durch ständige Wiederaufforstung gibt es kaum Chancen, wenn die Bäume schon vor ihrem eigenen ersten Samenwurf wieder absterben.
- Veränderten klimatischen Bedingungen können sich einfache Organismen wie Viren und Bakterien

mit Generationszyklen von oft nur wenigen Stunden sehr viel schneller anpassen als die hochentwickelten Organismen von Pflanzen und Lebewesen. Diese können so in vermehrtem Maß durch Infektionskrankheiten und Seuchen, zusätzlich noch geschädigt durch erhöhte UV-Einstrahlung, schließlich in ihrer Existenz bedroht werden.

- Abschmelzen des westantarktischen Schelfeises: Während das nordpolare, im Wasser schwimmende Eis bei steigenden Temperaturen rasch abschmelzen kann, und zwar ohne die Höhe des Meeresspiegels dabei zu verändern, könnte das südpolare, auf dem Festland der Antarktis aufliegende Eis nur in extrem langen Zeiträumen merklich abschmelzen. Bedrohlich ist nur das westantarktische Schelfeis, welches unter Meeresniveau auf dem Festland aufliegt, sich bei einer Temperaturerhöhung vom Boden lösen, ins Meer gleiten und dann schmelzen kann. Genau dies ist in der Warmzeit vor 120 000 Jahren geschehen, als die Temperatur auf der Erde im globalen Mittel nur um etwa 2 Grad höher als derzeit war. Dies führte zu einem Anstieg des Meeresspiegels um etwa 5 Meter. Dabei wurden weltweit Küstengebiete überflutet, von welchen derzeit insgesamt - weil sie dort leben oder weil sie aus diesen Gebieten Nahrung beziehen - bis zu 50% der Erdbevölkerung abhängig sind.

Derzeit kann man noch nicht absehen, ob ein solches Abschmelzen des westantarktischen Schelfeises bei zunehmender Temperatur wiederum, und gegebenenfalls wann eintreten könnte. Immerhin haben sich in den letzten Jahren mehrmals aus dem westantarktischen Schelf Eisberge gelöst, jeweils mit einer Masse bis zum zweifachen der jährlichen Niederschläge auf der gesamten Antarktis. Diese Ereignisse sollte man vielleicht weniger als seltene Zufälle, eher als mögliche Anzeichen eines möglichen künftigen Abschmelzens, zumindest größerer Teile des westantarktischen Schelfeises ansehen.

Durch die geschilderten Auswirkungen der klimatischen Veränderungen, weiter auch noch durch die Folgen z. B. von Bodenerosion, Schadstoffbelastung der Böden und der Süß- und Salzwasser, werden insgesamt Pflanzenwelt und Lebewesen, speziell aber die Menschen - diese mangels natürlicher Selektion besonders anfällig - in ihrer Existenz bedroht, und dies schon innerhalb der nächsten wenigen Jahrzehnte.

Diese Zeitspanne ist sehr kurz,

- um die notwendigen Minderungen der menschlichen Eingriffe in die Atmosphäre weltweit durch entsprechende technische Innovationen überhaupt erreichen zu können,

- um - bedingt durch die Folgen von Klimaänderungen - entstehende, zunehmende soziale Spannungen

gen innerhalb und zwischen betroffenen Völkern friedlich abbauen zu können.

7 Mögliche Abschwächungen der Klimaänderungen und ihrer Auswirkungen durch entsprechende Minderungen der Spurengas-Freisetzungen

Jede der Klimaveränderungen, seien es natürliche, wie z. B. der Wechsel zwischen Warmzeiten und Eiszeiten, seien es vom Menschen seit Beginn von Ackerbau und Viehzucht, seit dem Holzeinschlag zunehmend verursachte, hat Auswirkungen zumindest auf einen beschränkten Teil der Menschheit gehabt, machte eine Anpassung des menschlichen Verhaltens an die veränderten Umstände erforderlich.

Das Ausmaß der schon in naher Zukunft zu erwartenden Klimaveränderungen, bedingt durch menschliche Eingriffe, wird jedoch so gravierend sein, daß zumindest für einen mehr oder minder großen Teil der Menschheit eine Anpassung zum Überleben nicht mehr möglich sein wird. Hier hilft nur noch eine schnelle und ausreichend große Reduktion der menschlichen Eingriffe, u. a. eine entsprechende Minderung der Freisetzung klimarelevanter Spurengase.

Will man beispielsweise den Anstieg der Temperatur auf der Erde im globalen Mittel auf etwa 2 °C beschränken, dies gestreckt auf eine Zeitspanne von etwa 100 Jahren, (- was eine Warmzeit wie vor 120 000 Jahren zur Folge haben wird immer noch mit gravierenden Schäden zumindest für einen großen Teil der Menschheit -), so darf die Emission der Gesamtheit der Spurengase nicht mehr, wie bisher, ständig weiter ansteigen, sie muß vielmehr im weltweiten Mittel um mindestens 60 bis 80% im Vergleich zur heutigen Emission reduziert werden, und dies innerhalb weniger Jahrzehnte.

Betroffen sind davon alle treibhausrelevanten Gase, vornehmlich aber das Kohlenstoffdioxid, welches allein schon die Hälfte der zunehmenden Treibhauserwärmung verursacht.

Was die diversen Methan-Quellen angeht, so könnte künftig wahrscheinlich nur die Emission bei der Förderung fossiler Brennstoffe erniedrigt werden, die Emissionen in der Landwirtschaft und aus den Dauerfrostböden werden wohl weiter zunehmen; insgesamt wird die Methanemission kaum vermindert werden können.

Was die künftigen Emissionen von Fluorchlorkohlenwasserstoffen und von Halonen angeht, so ist zu hoffen, daß die internationalen politischen Voraussetzungen für einen völligen Herstellungsstopp bis zum Jahr 2000 rechtzeitig geschaffen werden. Selbst dann würde der Luftanteil an diesen Gasen noch mindestens 100 Jahre seinen Einfluß auf Treibhauserwärmung und Minderung der stratosphärischen Ozonschicht etwa im gegenwärtigen Umfang beibehalten.

Reduktion der CO₂-Emission bedingt
 Reduktion des Verbrauchs fossiler Brennstoffe um mindestens 70 %

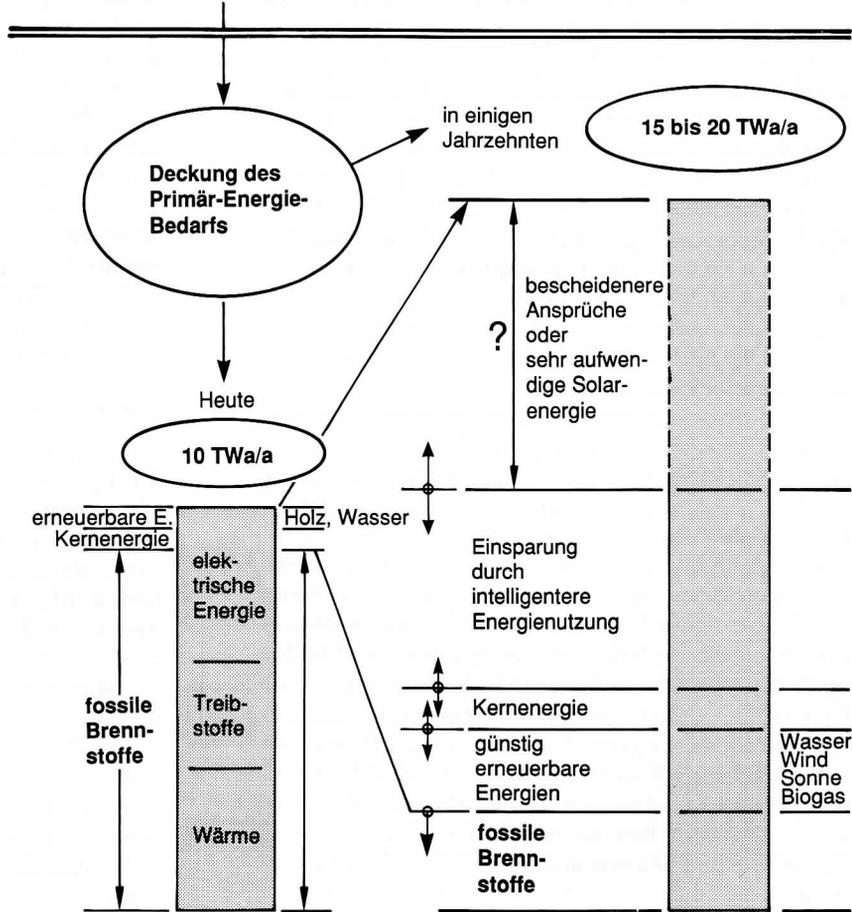


Abb. 3. Deckung des weltweiten Bedarfs an elektrischer Energie, Treibstoffen und Wärme (von im Mittel vergleichbar großen Anteilen) aus den verschiedenen Primärenergie-Quellen.

Heute: Gesamtbedarf 10 TWh pro Jahr. Deckung zu 80 bis 90 % aus fossilen Brennstoffen, der Rest aus erneuerbaren Energien (Holz und Wasser) und Kernenergie.

In wenigen Jahrzehnten: Gesamtbedarf auf 15 bis 20 TWh pro Jahr steigend. Deckung bei notwendiger Reduktion des Verbrauchs fossiler Brennstoffe auf etwa 30 % ihres derzeitigen Einsatzes nur erreichbar bei größtmöglicher Energieeinsparung durch effizientere und bescheidenere Energienutzung und ausgiebigster Nutzung aller anderen Energiequellen, wobei die Kernenergie nicht mehr als einen bescheidenen Anteil erreichen könnte.

3 Deckung des weltweiten Energiebedarfs bei gleichzeitig drastischer Reduktion fossiler Brennstoffe

Die unabdingbar notwendige Reduktion der vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen im weltweiten Mittel um mindestens 60 bis 80 Prozent, bezogen auf die heutigen Werte, und dies innerhalb nur weniger Jahrzehnte, bedingt eine entsprechend große Reduktion des Verbrauchs der fossilen Brennstoffe Kohle, Erdöl und Erdgas. Und eben diese decken heute weltweit und auch in unserem Land nahezu 90 Prozent des gesamten Bedarfs an Energie, also an Heiz- und Prozesswärme, Treibstoffen und elektrischer Energie.

Die erneuerbaren Energiequellen, bislang meist Wasserkraft und die Kernenergie, tragen derzeit nur jeweils etwa 5 Prozent zur Deckung des Energiebedarfs bei (s. Abb. 3).

Der weltweite Energiebedarf steigt derzeit Jahr für Jahr um etwa 2 bis 3 %, vornehmlich bedingt durch den steil ansteigenden Bedarf in den Schwellen- und Entwicklungsländern, hier verursacht durch Bevölke-

rungswachstum, Verstädterung und Industrialisierung.

Orientiert an der heutigen Art und Effektivität der Energienutzung, würde so voraussichtlich der weltweite Energiebedarf innerhalb einiger Jahrzehnte noch mindestens um 50 bis 100 Prozent über den heutigen Bedarf ansteigen. Wegen der leichten und reichlichen Verfügbarkeit der vordergründig billigen fossilen Brennstoffe werden diese auch – die Klimaproblematik außer acht gelassen – dem steigenden Bedarf entsprechend künftig noch vermehrt verbrannt werden.

Wie könnte nun – der Klimaproblematik Rechnung tragend – weltweit der künftige Energiebedarf gedeckt werden unter gleichzeitig drastischer Reduktion des Einsatzes fossiler Brennstoffe, unserer derzeitigen Hauptenergiequelle (s. Abb. 3)?

8.1 Erneuerbare Energiequellen

Die Nutzung aller erneuerbaren Energiequellen, – in unseren Breiten vornehmlich Wasserkraft, Windenergie, Biogas, Biotreibstoff in bescheidenem Um-

fang, Solarwärme, Solarstrom in kleinen Solaranlagen, - in äquatornäheren, sonnenscheinreicheren Ländern zusätzlich noch kleine Solarkraftwerke, ist sicher noch beträchtlich zu steigern, wird aber von Land zu Land, den unterschiedlichen Gegebenheiten und klimatischen Verhältnissen entsprechend, unterschiedlich hoch sein.

Insgesamt werden die erneuerbaren Energiequellen, beschränkt auf alle diejenigen, aus welchen Energie einigermaßen preisgünstig entnommen werden kann, innerhalb einiger Jahrzehnte selbst bei unbehinderter, ausreichender Förderung der Nutzung dieser Quellen zur Deckung eines künftigen Energiebedarfs in oben skizzierter Höhe höchstens zu etwa 10 bis 20 Prozent beitragen können.

Wollte man aus erneuerbaren Energiequellen weit größere Energiemengen, vergleichbar mit den heute genutzten Mengen fossiler Brennstoffe, verfügbar machen, so könnte man dies nur mit großen Solarkraftwerken - und diese nur in sonnenscheinreichen, trockenen äquatornahen Gebieten - erreichen. Die nötigen Technologien - einschließlich der Gewinnung und Nutzung von Wasserstoff - sind zwar im Prinzip in kleinen Pilotanlagen weitgehend erprobt. Die für große Anlagen nötigen Investitionskosten werden sehr hoch sein; sie können derzeit nur ungenau abgeschätzt werden: Sie betragen voraussichtlich mindestens das 3- bis 5fache der Kosten der teuersten, heute betriebenen Kraftwerke, bezogen auf gleiche Kraftwerksleistung. Die zum Bau solcher Solarkraftwerke nötige Energie könnte sich erst im Verlauf vieler Jahre amortisieren.

Selbst ohne die heutigen Hemmnisse für solche Anlagen - bei uns sowohl die hohen Kosten als auch die Standortbeschränkung auf das Ausland - könnte bei zügiger Entwicklung und Bau solcher Anlagen auf diese Art frühestens nach mehreren Jahrzehnten Energie in bedeutsamem Umfang gewonnen werden.

8.2 Kernenergie

Niemand kann heute wissen, ob und in welchem Umfang die eine oder andere Nation künftig Kernenergie nutzen wird, nicht zuletzt vielleicht mangels anderer ausreichender Energiequellen. Gerade diese Option der künftigen Kernenergienutzung irgendwo auf der Welt bürdet den technisch entsprechend hochentwickelten Nationen - ungeachtet ihrer eigenen Einstellung zur Kernenergie - die Verantwortung auf, dafür Vorsorge zu treffen, daß, wer immer künftig Kernenergie nutzen wird, sie auch so sicher nutzen kann, daß weder er selbst, noch andere Länder wesentlich gefährdet werden.

Diese Vorsorge für eine ausreichend sichere Nutzung der Kernenergie - wo immer in der Welt - zwingt also auch uns, an der Lösung der noch offenen Pro-

bleme zu arbeiten: Das bedeutet z. B. die Erprobung von technisch und betriebsmäßig inhärent sicheren Reaktortypen, also von solchen, bei welchen in jedwedem Störfall der Betrieb von selbst zum Stillstand kommt, ohne daß dabei Radioaktivität in bedrohlichem Umfang freigesetzt werden kann, und ohne daß dabei Hilfsmaßnahmen von außen wie z. B. Notkühlung für die Abfuhr der Nachwärme benötigt werden.

Die zufriedenstellende Lösung der noch offenen Probleme bei der Kernenergie-Nutzung vorausgesetzt, könnte die Kernenergie trotzdem, allein schon bedingt durch die lange Bauzeit von Kernkraftanlagen, erst im Verlauf einiger Jahrzehnte etwa 5 bis 10 Prozent zur Deckung eines künftigen Energiebedarfs in der vorher skizzierten Höhe beitragen.

8.3 Effizientere und sparsamere Energienutzung

Für eine ausreichende Deckung des künftigen Energiebedarfs unter Vorgabe der notwendigen drastischen Minderung des Einsatzes fossiler Brennstoffe ist selbst bei optimaler Nutzung aller verfügbaren erneuerbaren Energiequellen und der Kernenergie eine wesentliche Minderung des Energiebedarfs durch effizientere und sparsame Nutzung von Energie in jedem Land unerlässlich.

Hier nur einige Beispiele für bedeutsame Energie-Einsparungen in unserem Land:

- Durch eine vernünftige Wärmedämmung beheizter Räume könnte der Heizwärmebedarf um etwa die Hälfte vermindert werden.
- Durch Einsatz sparsamerer, heute bereits entwickelter Automotoren könnte bei gleichem Fahrkomfort der Treibstoffbedarf im Mittel halbiert werden.

Derzeit werden in der Mehrzahl der Länder viele der möglichen Neuerungen auf dem Energiesektor, sei es bei der effizienteren Energienutzung, sei es bei der Einführung neuer Energiequellen, behindert vor allem durch den Überfluß an den vermeintlich billigen fossilen Brennstoffen, wobei natürlich die Kosten für die verursachten Umweltschäden und für künftige Schädigungen durch globale Klimaveränderungen außer acht gelassen werden.

9 Schlußfolgerung

Erst wenn weltweit die Bedrohungen durch globale Klimaveränderungen erkannt und im politischen Handeln berücksichtigt werden, dies hoffentlich noch vor dem Eintreten nachhaltig spürbarer Schädigungen, kann es zu einer rechtzeitigen Abkehr von der unmäßigen Nutzung fossiler Brennstoffe kommen.

Meines Erachtens wird dabei aber, selbst bei optimaler Ausschöpfung der Potentiale an effizienterer Energienutzung, an erneuerbaren Energiequellen und an Kernenergie der künftige weltweite Energiebedarf nur dann zu decken sein,

wenn die Menschen in den heutigen Industrieländern ihre Ansprüche nicht weiter wie bisher ständig steigern, sondern in ihren Ansprüchen eher wieder bescheidener werden,

wenn die Menschen in den heutigen Schwellen- und Entwicklungsländern ihre künftigen Ansprüche nicht an unseren heutigen ausrichten werden,

wenn die Industrieländer den Schwellen- und Entwicklungsländern nicht nur das technische Wissen bester Energienutzung verfügbar machen, sondern diese Länder auch vom Vorteil und der Notwendigkeit solcher Energienutzung überzeugen können, und diesen Ländern beim Aufbau dieser Techniken selbstlos und ausreichend helfen werden.

Literatur

- [1] M. BARNOLA et al.: Vostok ice core provides 160 000 year record of atmospheric CO₂. - *Nature* **329** (1987) 408.
- [2] Schutz der Erdatmosphäre. - 1. Zwischenbericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages »Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre«. - Bonn 1988.
- [3] J. E. HANSEN - S. LEBEDEFF: »Global surface air temperatures«. - *Geophys. Res. Lett.* **15** (1988) 323.
- [4] Schutz der tropischen Wälder. - 2. Zwischenbericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages »Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre«. - Bonn 1990.
- [5] Literaturangaben zu Klimamodellrechnungen, siehe in [2]. □