

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 90 (1999)

**Heft:** 21

**Artikel:** Die fossilen Brennstoffe und das globale CO2-Problem : durch Entsorgung und Rezyklierung von CO2 könnte der Treibhauseffekt entschärft werden

**Autor:** Eliasson, Baldur / Kogelschatz, Ulrich

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-901998>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 14.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Die fossilen Brennstoffe und das globale CO<sub>2</sub>-Problem

## Durch Entsorgung und Rezyklierung von CO<sub>2</sub> könnte der Treibhauseffekt entschärft werden

Die wachsende Einsicht, dass CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Verbrennungsprozessen das globale Klima negativ beeinflussen, hat auf der Weltklimakonferenz in Kioto im Dezember 1997 erstmalig zu völkerrechtlich verbindlichen Beschlüssen geführt, die eine merkliche Reduktion der wichtigsten Treibhausgase vorsehen. Die vereinbarten Reduktionsziele können nur erreicht werden, wenn alle Möglichkeiten zum sparsamen Umgang mit Energie sowie zur Reduktion oder Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Stromerzeugung genutzt werden. Zu den in diesem Beitrag diskutierten Optionen zählen die Abtrennung und Entsorgung oder Rezyklierung von Kohlendioxid aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern.

Vor etwa 25 Jahren erschien der erste Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit, der dann im Buch «Die Grenzen des Wachstums» von Dennis Meadows [1] weite Verbreitung fand. Die wesentliche These war, dass die Vorräte an Nahrungsmitteln und nicht regenerierbaren Rohstoffen limitiert sind und dem bisher exponentiellen Wachstum Grenzen setzen werden. Aus heutiger Sicht müssen wir sagen, dass wir vermutlich Grenzen der zulässigen Umweltbelastung erreichen, längst bevor die Ressourcen an fossilen Brennstoffen er-

### Adresse der Autoren

Dr. Baldur Eliasson, Dr. Ulrich Kogelschatz  
ABB Corporate Research Ltd.  
5405 Baden-Dättwil

schöpft sind. Heute steht die Frage im Zentrum der Diskussionen, ob es sinnvoll und verantwortbar ist, diese Vorräte auch tatsächlich bis zur Neige zu nutzen, entsteht doch bei der Verbrennung Kohlendioxid, dessen Konzentration in der Atmosphäre seit Beginn des Industriezeitalters bereits um 30% zugenommen hat. Gleichzeitig wird eine Erwärmung der mittleren globalen Temperatur registriert. Die 14 wärmsten Jahre innerhalb der letzten 130 Jahre fallen in die letzten 20 Jahre. 1998 war das wärmste Jahr seit Beginn der Temperaturaufzeichnung im

Jahre 1866, und es wies gegenüber den Vorjahren einen sprunghaften Anstieg der Temperatur aus. Vermutlich ist der beobachtete Temperaturanstieg ursächlich auf die Anreicherung des Treibhausgases CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre zurückzuführen. Die durch diesen zusätzlichen Treibhauseffekt drohenden globalen Klimaveränderungen haben verschiedene internationale Aktivitäten ausgelöst, die auf eine

Stabilisierung oder Reduktion des weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstosses von zurzeit etwa 25 Gt p.a. abzielen. Die Absichtserklärungen am Erdgipfel in Rio 1992 zur Stabilisierung der Emissionen auf dem Stand von 1990 und insbesondere die an der Klimakonferenz in Kioto im Dezember 1997 gefassten völkerrechtlich verbindlichen Beschlüsse zur merklichen Reduktion der wichtigsten Treibhausgas-Emissionen werden die Energiewirtschaft in einem Masse verändern, das heute erst in Umrissen erkennbar ist.

Die zum Teil recht kontrovers geführte Diskussion erstreckt sich im wesentlichen auf drei Themenkreise: die Erkenntnisse der Klimaforschung, die Herbeiführung eines politischen Konsenses über das weitere Vorgehen und die zur Verfügung stehenden und noch zu erarbeitenden technischen Optionen.

### Die Sicht der Klimaforschung

Bereits vor hundert Jahren hatte Svante Arrhenius darauf hingewiesen, dass sich das in Verbrennungsprozessen freigesetzte CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre anreichern könnte und damit infolge einer Veränderung der Strahlungsbilanz zu

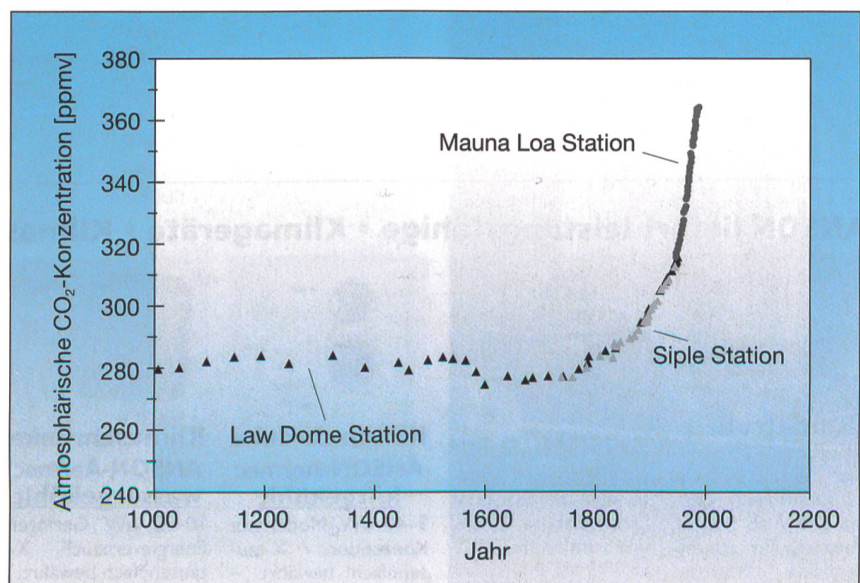


Bild 1 Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung  
(Quelle: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory)



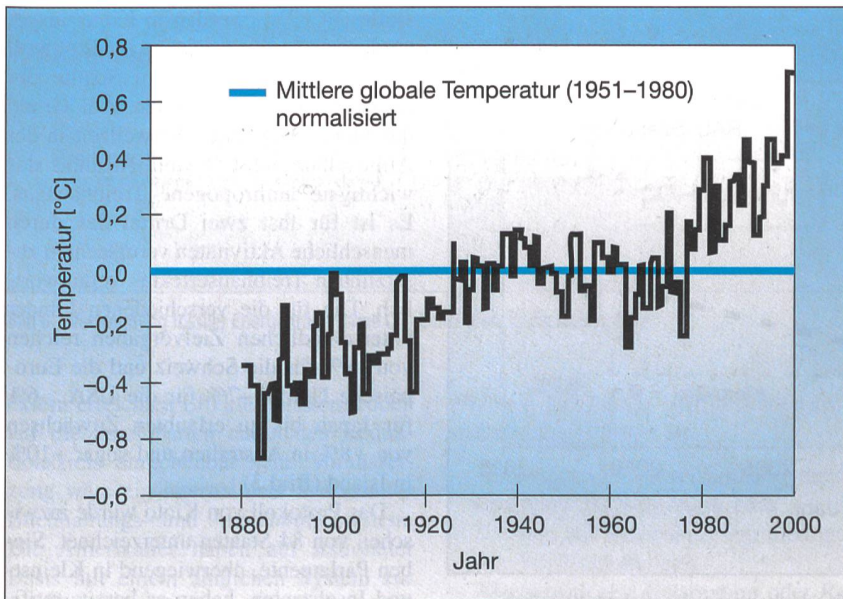


Bild 2 Anstieg der mittleren globalen Temperatur seit 1860

(Quelle: J. Hansen, H. Wilson and H. Ruedy, Nasa Goddard Institute for Space Studies)

einer Erwärmung der Erdatmosphäre führen könnte. In der Tat zeigen an verschiedenen Orten durchgeführte Messungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration ein stetes Ansteigen mit einer Rate von zurzeit etwa 0,5% p.a. (Bild 1). Seit dem Beginn der Industrialisierung wurden durch menschliche Aktivitäten 325 Gt C (Gigatonnen Kohlenstoff entsprechend 1200 Gt Kohlendioxid) zusätzlich in die Atmosphäre gepumpt, die nur zur Hälfte abgebaut beziehungsweise von der Vegetation und den Ozeanen aufgenommen werden konnten. Vor 1750 waren diese Prozesse für längere Zeit im Gleichgewicht. Aus Messungen an Luftpfeinschlüssen in Eisbohrkernen weiss man, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration über mindestens 1000 Jahre konstant bei etwa 280 ppm lag. [2] Der Beginn des rapiden Anstiegs setzte ein zur Zeit der Erfindung der Dampfmaschine durch James Watt im Jahre 1765. Heute sind wir bereits bei 365 ppm CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre angelangt.

Aus präzisen Temperaturmessungen an verschiedenen Orten deutet sich an, dass auch die mittlere globale Temperatur ansteigt, wie es Arrhenius vorhergesagt hat. Dieser von starken Schwankungen überlagerte Anstieg von etwa 0,5°C in den letzten 100 Jahren, [3] ansteigend mit zurzeit etwa 0,2°C pro Dekade (Bild 2), mag zwar moderat erscheinen, und seine möglichen Auswirkungen sind heftig umstritten. Klimatologen weisen jedoch darauf hin, dass es in den letzten 10000 Jahren der Erdgeschichte keine ähnlich schnellen Temperaturanstiege gab und dass die Erwärmungsrate nach der letzten Eiszeit 50mal kleiner war.

Zur Modellierung des Treibhauseffekts werden ausserordentlich komplexe Klimamodelle herangezogen, [4, 5] die in den letzten Jahren weitgehende Übereinstimmung mit den bestehenden Datensätzen erreichten. Der in der Atmosphäre vorhandene Wasserdampf sorgt zusammen mit einigen Spurengasen für den natürlichen Treibhauseffekt, ohne den die mittlere Erdoberfläche bei -18°C liegen würde. Die Anreicherung zusätzlicher Treibhausgase verändert das Strahlungsgleichgewicht zwischen einfallender Sonnenstrahlung und in den Weltraum abgestrahlter Energie und damit die mittlere Temperatur der Erde. Eine exakte Zuweisung der gemessenen Temperaturerhöhung zu den anthropogen erzeugten Treibhausgasen ist nach wie vor problematisch, da andere Effekte wie Aerosolkonzentrationen und Wolkenbildung sowie Annahmen über Transportprozesse auch einen wesentlichen Einfluss haben. [5, 6] Entsprechend unsicher sind Prognosen. Aus heutiger Sicht wird eine Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der

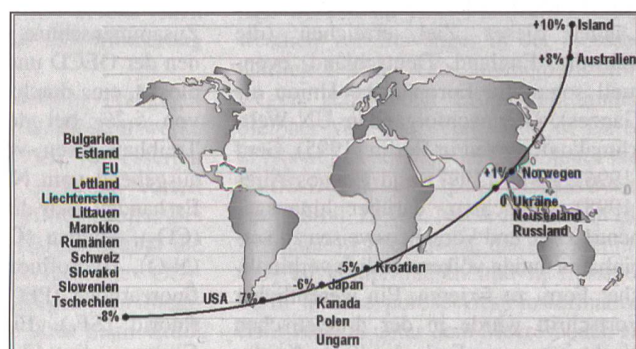
Atmosphäre vermutlich eine zusätzliche Erwärmung zwischen 1,5°C und 4,5°C bewirken. Das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), ein zwischenstaatliches, unabhängiges Expertengremium, das von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (Unep) erstmals 1988 einberufen wurde, um die Ursachen und den Verlauf der Klimaänderung samt ihren möglichen Auswirkungen zu untersuchen, kam 1996 zur vorsichtig formulierten Beurteilung, dass die vorliegenden Erkenntnisse einen merklichen Einfluss menschlicher Aktivitäten auf das globale Klima nahelegen: «The balance of evidence suggests a discernable human influence on global climate.» [5] Der IPCC-Bericht weist darauf hin, dass eine fortgesetzte Zunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre zu einer gefährlichen Störung des Klimasystems führen werde angesichts der ernsthaften Risiken eines Temperaturanstiegs und speziell der Schnelligkeit dieser derzeitigen Veränderung. Die drohende Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre wird vermutlich einen Anstieg des Meeresspiegels um rund 50 cm bis zum Jahre 2100 zur Folge haben. Diese alarmierenden Prognosen haben auf der politischen Ebene Aktivitäten ausgelöst, die in einigen Staaten bereits zur Einführung von CO<sub>2</sub>-Steuern führten und in den meisten Industriestaaten eine Diskussion um Lenkungsabgaben und Reduktionsziele entfachten.

## Die politische Bühne

Auf dem ersten Erdgipfel in Rio im Jahre 1992 wurden die durch CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachten Klimaprobleme ausführlich diskutiert und ihre Dringlichkeit allgemein anerkannt. Das Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen wurde formuliert mit dem Ziel, den Ausstoss klimarelevanter Emissionen bis zum Jahre 2000 auf dem Niveau von 1990 zu stabilisieren. Diese Erklärung wurde inzwischen von 159

Bild 3 Nationale Beiträge zu den in Kyoto vereinbarten Reduktionszielen für die sechs wichtigsten Treibhausgase

Diese Ziele sollen in den Jahren 2008–2012 erreicht werden und beruhen auf dem Jahr 1990 als Vergleichsbasis.





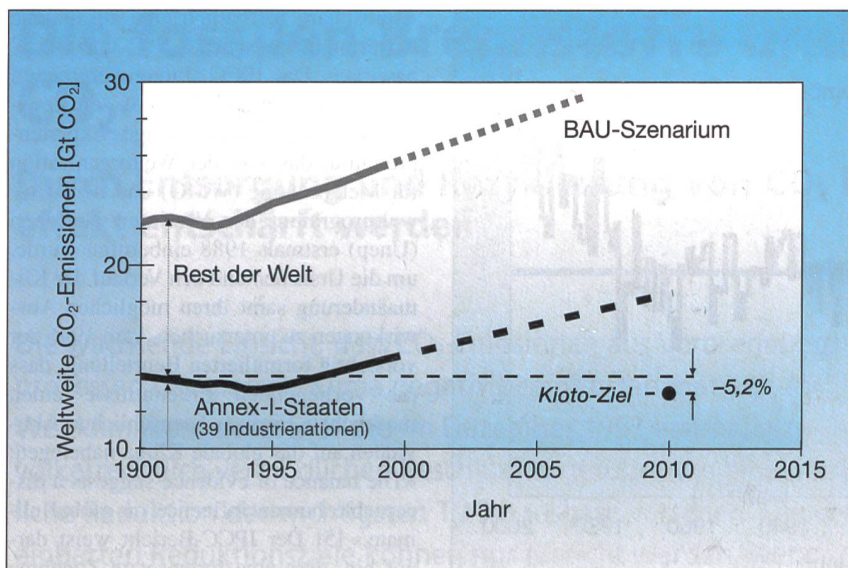


Bild 4 Voraussichtliches Anwachsen der globalen Kohlendioxidemissionen und vereinbarte Kioto-Ziele  
BAU-Szenarium: business as usual (Quelle: G. Marland, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory)

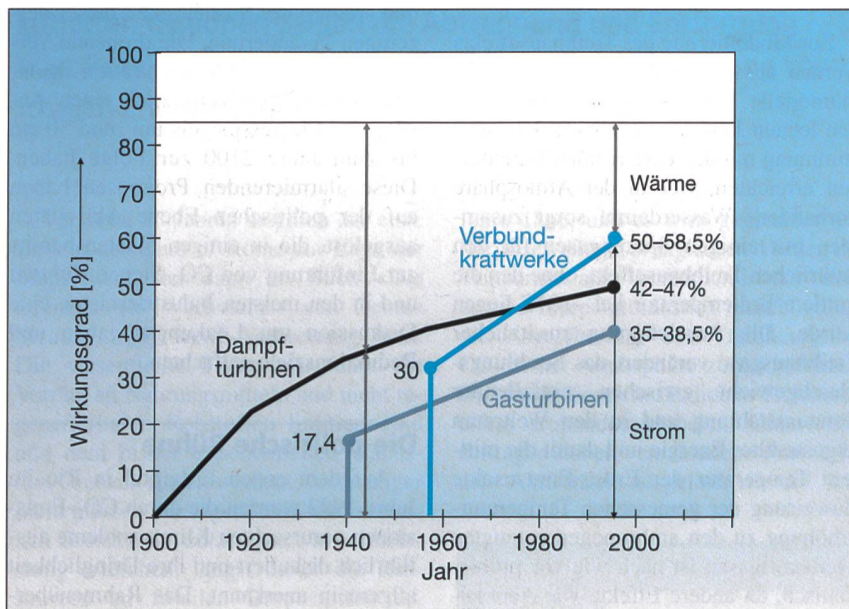


Bild 5 Historische Entwicklung des Wirkungsgrades verschiedener Kraftwerkstechnologien

Staaten unterschrieben und trat nach Ratifizierung durch 50 Staaten einschliesslich der USA am 21. März 1994 in Kraft. Aus heutiger Sicht werden nur wenige Länder dieses Ziel erreichen (die Schweiz, England, Deutschland, eventuell sogar die Europäische Union als Ganzes). Die nachfolgenden UN-Weltklimakonferenzen in Berlin (1995), Genf (1996), Kioto (1997) und Buenos Aires (1998) versuchten, darüber hinausgehende Ziele und Vorgehensweisen zu vereinbaren und in völkerrechtlich verbindlicher Form zu fixieren. Ein wesentlicher Fortschritt wurde in der dramatischen Nachtsitzung am Ende der Kioto-Konfe-

renz Anfang Dezember 1997 erzielt. Das von 171 Teilnehmerstaaten genehmigte Protokoll zur Klimarahmenkonvention sieht vor, dass die Annex-I-Staaten, ein Zusammenschluss von 39 Industrienationen der OECD und des ehemaligen Ostblocks, eine durchschnittliche Reduktion von 5,2% bei den wichtigsten sechs Treibhausgasen vornehmen, wiederum ausgehend vom Niveau im Jahre 1990. Es handelt sich dabei um Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), Hydrofluorcarbone (HFC), Perfluorcarbone (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>). Eine weitere wichtige Gruppe, die Fluorchlorkohlenwasser-

stoffe (FCKW), wurden in Kioto ausgeklammert, weil sie bereits im Protokoll von Montreal (1987) zum Schutz der Ozonschicht erfasst wurden. Auf Grund der Menge und seiner Verweilzeit in der Atmosphäre ist CO<sub>2</sub> mit Abstand das wichtigste anthropogene Treibhausgas. Es ist für fast zwei Drittel des durch menschliche Aktivitäten verursachten zusätzlichen Treibhauseffektes verantwortlich. Die für die verschiedenen Länder unterschiedlichen Zielvorgaben reichen von -8% für die Schweiz und die Europäische Union, -7% für die USA, -6% für Japan bis zu erlaubten Zuwächsen von +8% in Australien und sogar +10% in Island (Bild 3).

Das Protokoll von Kioto wurde inzwischen von 84 Staaten unterzeichnet. Sieben Parlamente, überwiegend in Kleinst- und Inselstaaten, haben es bereits ratifiziert. Das Abkommen tritt in Kraft, wenn die Ratifizierung von 55 Staaten vorliegt, die zusammen mindestens 55% der Annex-I-CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 1990 vertreten müssen. Falls sich diese ehrgeizigen Ziele nicht erfüllen lassen und sich der heutige Trend des «Business as usual» fortsetzen sollte, werden die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahre 2010 um etwa 30–40% zunehmen (Bild 4). Dabei ist die zunehmende Bedeutung der Entwicklungsländer zu berücksichtigen. Heute kommen nur etwa 25% der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Entwicklungsländern, aber bereits mehr als 50% des Zuwachses. Bereits im Jahre 2010 wird der Zuwachs in den Entwicklungsländern mehr als doppelt so hoch sein wie in den OECD-Ländern. China, heute an zweiter Stelle nach den USA, wird in 10 bis 20 Jahren an erster Stelle bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen stehen.

Politische Bestrebungen, auch in diesen Ländern über das Instrumentarium des Handels mit Emissionszertifikaten (Emissions Trading) und gemeinsamer Projekte (Joint Implementation) CO<sub>2</sub>-Reduktionen zu erreichen, haben bisher noch zu keiner allgemein akzeptierten Lösung geführt. Die Idee hinter diesen Verfahren basiert auf der Erkenntnis, dass CO<sub>2</sub>-Reduktionskosten von 20–125 Fr./t in den Industrienationen nur etwa 10 Fr./t CO<sub>2</sub> in Osteuropa und in den Entwicklungsländern gegenüberstehen. Da es sich beim CO<sub>2</sub> infolge seiner langen Aufenthaltsdauer (über 100 Jahre) in der Atmosphäre um ein globales Problem handelt, spielt es im Prinzip keine Rolle, an welcher Stelle die Reduktion vorgenommen wird. Es erscheint sinnvoll, Klimaschutzmassnahmen dort vorzunehmen, wo pro Einheit eingesetzten Kapitals der grösste Nutzen erzielt wird. Die



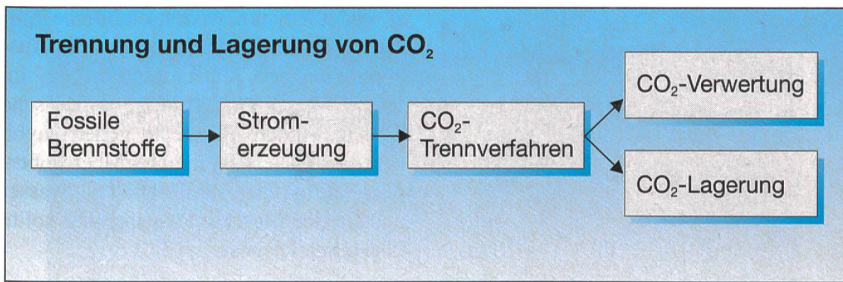


Bild 6 Verwendung fossiler Energieträger ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Atmosphäre

extern erreichten Effekte müssten jedoch auf die vereinbarten nationalen Reduktionsziele anrechenbar sein. Voraussetzung wäre ein international anerkanntes Buchhaltungs- und Anrechnungssystem. Die Amerikaner haben auf nationaler Basis mit einem ähnlichen System zur SO<sub>2</sub>-Reduktion, bei dem Emissionsrechte wie Aktien an einer Börse gehandelt werden, gute Erfahrungen gemacht. Obwohl in Buenos Aires 1998 noch keine endgültige Einigung über ein internationales Anrechnungssystem erreicht wurde, werden bereits gemeinsame Pilotprojekte geplant und regionale Gesetze vorbereitet. So sieht der Entwurf der EU-Kommission vor, dass mindestens 50% der in Kyoto zugesagten CO<sub>2</sub>-Reduktionen in den EU-Mitgliedstaaten selbst erfolgen sollen.

### Die technischen Optionen

Die inzwischen allgemein anerkannte Notwendigkeit, die umweltbedrohenden Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren, und die daraus abgeleiteten Aktionen werden insbesondere einen Einfluss auf die Stromerzeugung der Zukunft haben. Weltweit werden etwa zwei Drittel des Stroms aus fossilen Brennstoffen gewonnen. 1995 stammten 38% des Stroms aus Kohle, 10% aus Erdöl und 15% aus Erdgas. Seit 1860 hat der Verbrauch fossiler Brennstoffe sechsmal schneller zugenommen als die Erdbevölkerung. Diesem Trend muss unbedingt Einhalt geboten werden. Entgegen den Prognosen des Club of Rome reichen die Reserven nach konservativen Schätzungen noch für mindestens 220 Jahre bei der Kohle, 60 Jahre beim Erdgas und 40 Jahre beim Öl. Insbesondere Australien, die Vereinigten Staaten, China, Indien und Deutschland verfügen nach wie vor über grosse Kohlevorräte. Von dieser Seite her ist daher auf absehbare Zeit keine Einschränkung zu erwarten, sondern nur von einer umweltbewussten Energiepolitik, die sich die Reduktion klimarelevanter Emissionen zum erklärten Ziel macht. Für die Stromerzeugung der Zukunft

zeichnen sich neben naheliegenden Einsparungen vier Wege ab:

- verbesserte Brennstoffnutzung durch Erhöhung des Wirkungsgrades
- Umstieg auf Brennstoffe mit niedrigerem Kohlenstoffgehalt
- Abtrennung und Entsorgung oder Rekyclierung von Kohlendioxid
- kohlenstofffreie Stromerzeugung (erneuerbare Energiequellen, Kernenergie)

Alle vier Wege können erheblich zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen. Seit Anfang dieses Jahrhunderts wurden markante Fortschritte erzielt in bezug auf den Wirkungsgrad bei der Umwandlung des Brennstoff-Energieinhalts in elektrische Energie (Bild 5). Sowohl der Wirkungsgrad der Dampfturbinen (heute bis zu 47%) als auch der der Gasturbinen (heute bis zu 38,5%) konnte erheblich gesteigert werden. Die Verbindung dieser beiden Technologien in Kombikraftwerken erreicht heute einen Wirkungsgrad von knapp 60%. Kann man auch noch die Prozesswärme verwenden, so wird der Brennstoff zu 85–90% ausgenutzt. Da Kraftwerke eine Lebensdauer von 30 bis 40 Jahren haben, sind immer auch Anlagen mit veralteter Technologie in Betrieb. Zurzeit sind noch viele Kraftwerke am Netz, die einen Wirkungsgrad von lediglich 20–30% aufweisen. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass der durchschnittliche Wirkungsgrad aller am Netz befindlichen US-Kraftwerke etwa 34% beträgt. Die Nachrüstung älterer Anlagen mit moderner Technologie kann also bereits einen merklichen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Minderung liefern.

Die in den letzten Jahren bevorzugt gebauten, gasbefeuerten Kombikraftwerke nutzen zusätzlich zu den verbesserten Turbinengenerationen auch den Vorteil eines kohlenstoffarmen Brennstoffs. Bei der Verbrennung von Erdgas beträgt die pro Energieeinheit freigesetzte CO<sub>2</sub>-Menge nur 60% derjenigen von Steinkohle, verglichen mit 90% beim Erdöl und 120% bei der Braunkohle. Bei der

Kohleverbrennung werden pro Tonne Steinkohleneinheit (SKE) 2,68 t CO<sub>2</sub> freigesetzt. Aus diesen Zahlen wird deutlich, dass ein wachsender Anteil von Erdgas am Primärenergiemix kurzfristig bereits einen namhaften Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion liefern kann.

### Abtrennung und Lagerung von CO<sub>2</sub>

Man muss wohl realistischerweise davon ausgehen, dass unsere Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen nur langsam reduziert werden kann und dass für eine längere Übergangszeit ein Bedarf an «sauberen» Verbrennungsprozessen ohne beziehungsweise mit stark reduziertem CO<sub>2</sub>-Ausstoss besteht. [7–10] Viele dieser denkbaren technischen Optionen wurden an der 4. internationalen Konferenz «Greenhouse Gas Control Technologies» diskutiert, die im Herbst 1998 in Interlaken stattfand und von 600 Teilnehmern besucht wurde. Der gerade erschienene umfangreiche Tagungsband [11] enthält wertvolle aktuelle Informationen zu diesem Themenkreis. Es ist durchaus denkbar und technisch machbar, den CO<sub>2</sub>-Anteil am Ausgang eines Kraftwerks vom Rauchgas abzutrennen (Bild 6), ähnlich wie bereits heute Flugasche, Stickoxide und Schwefeloxide zurückgehalten werden. Kraftwerke tragen immerhin 30–35% zu den weltweiten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Der CO<sub>2</sub>-Anteil im Rauchgas beträgt 3%–15%, je nachdem, ob Gas, Öl oder Kohle gefeuert wird. Kohlendioxid kann in einem Waschturm mit einer Mono-Ethanol-Amin(MEA)-Lösung selektiv aus dem Rauchgas entfernt und durch Temperaturerhöhung auf 120 °C wieder von der Lösung getrennt werden. In einer Pilotanlage in einem von ABB gebauten Kohlekraftwerk in Shady Point, Oklahoma, USA, werden 200 t CO<sub>2</sub> pro Tag abgetrennt (Bild 7). Das so erhaltene CO<sub>2</sub> ist sehr rein (99,99%) und wird an die Nahrungsmittelindustrie verkauft. In einer auf ähnlichen Prinzipien beruhenden, wesentlich grösseren CO<sub>2</sub>-Trennanlage werden auf einer Plattform 240 km westlich von Stavanger in der Nordsee jährlich 1 Mio. t CO<sub>2</sub> aus dem zu Norwegen gehörenden Erdgasvorkommen Sleipner Vest abgetrennt (Bild 8). Da es in Norwegen bereits eine CO<sub>2</sub>-Steuer von 50 US-Dollar/t gibt, haben sich die Besitzer (Statoil, Exxon, Norsk Hydro und Elf Aquitaine) entschlossen, das abgetrennte CO<sub>2</sub> zu komprimieren und in flüssiger Form in eine poröse Gesteinsformation etwa 1000 m unter dem Meeresboden zu pressen. Der Entschluss, diese Anlage für



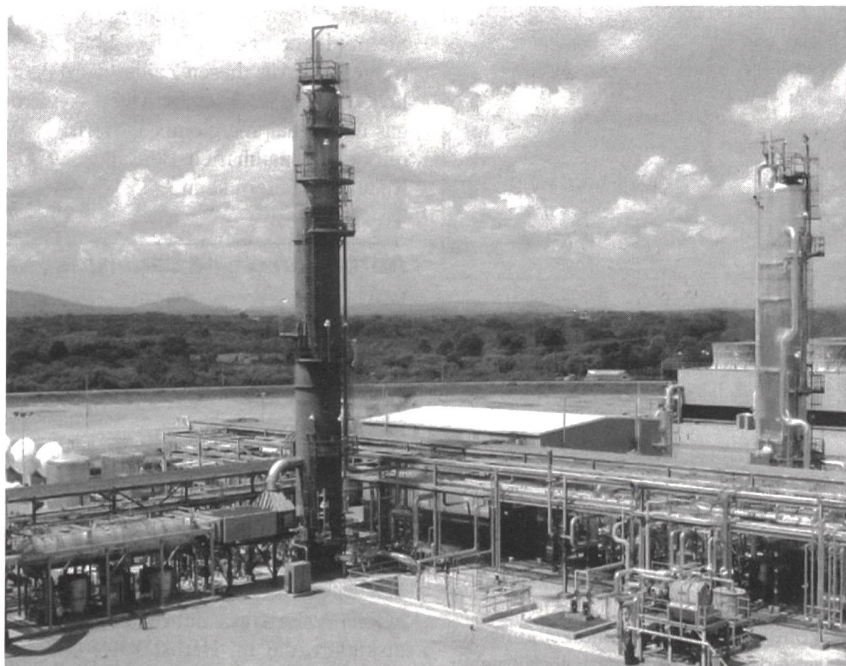


Bild 7 Kohlendioxid-Rückgewinnungsanlage in einem Kohlekraftwerk in Shady Point, Oklahoma, USA

80 Mio. US-Dollar zu bauen, wurde wesentlich durch die CO<sub>2</sub>-Steuer in Norwegen beeinflusst. Die Anlage ist seit Oktober 1996 in Betrieb. Seit längerer Zeit wird CO<sub>2</sub> auch verwendet, um in versiegenden Ölquellen restliches Öl aus dem Boden zu pressen (Enhanced Oil Recovery). Im Jahre 1998 wurden in 67 kommerziellen Anlagen etwa 40 Mt CO<sub>2</sub> für diesen Zweck eingesetzt. Diverse andere

Projekte sind in der Planungsphase. Neben der CO<sub>2</sub>-Entsorgung in unterirdischen geologischen Gesteinsformationen wird auch die direkte Einleitung ins Meer diskutiert und untersucht. Mit internationaler Beteiligung wird an der Küste bei Kona auf Hawaii eine Anlage geplant, mit der zu Versuchszwecken flüssiges CO<sub>2</sub> etwa 800 m unter der Meeresoberfläche eingeleitet werden soll. Hier geht

es vor allem um wissenschaftliche Studien über die Ausbreitung und die Auswirkungen von konzentriertem CO<sub>2</sub> im Meereswasser und allfällige biologische Effekte. Andere Konzepte gehen davon aus, dass CO<sub>2</sub>, 3000 m unter Meeresoberfläche freigesetzt, schwerer ist als Wasser und auf den Meeresboden absinken sollte (Deep Sea Disposal). [12]

### Umwandlung von Kohlendioxid

Neben der Lagerung von CO<sub>2</sub> werden auch Ideen zu dessen Umwandlung verfolgt. Eine der attraktivsten Ideen ist die Umwandlung von CO<sub>2</sub> in einen flüssigen Treibstoff wie zum Beispiel Methanol. [13] Unter dem Einfluss spezieller Katalysatoren reagiert CO<sub>2</sub> mit Wasserstoff zu Methanol (Bild 9). Methanol (CH<sub>3</sub>OH) ist ein kohlenstoffarmer flüssiger Treibstoff, der sich gut lagern und transportieren lässt. Handhabung und Tanken wären ähnlich problemlos wie beim Benzin. Die auf das Volumen bezogene Energiedichte von Methanol ist dreimal so hoch wie die von flüssigem Wasserstoff und etwa halb so hoch wie jene von Benzin. Wie ausführliche Testreihen grosser Automobilhersteller zeigten, lässt sich Methanol direkt in einem Ottomotor verwenden oder als Energiespeicher für ein Auto mit Brennstoffzelle und Elektromotor nutzen. Da solche Brennstoffzellenautos in Kalifornien als Zero Emission Vehicles eingestuft werden, steht die Markteinführung kurz bevor. Daimler-Chrysler rechnet damit, im Jahre 2005 bereits 100 000 solcher Fahrzeuge im Betrieb zu haben. Sollte in fernerer Zukunft Methanol tatsächlich aus dem CO<sub>2</sub> aus Kraftwerksabgasen gewonnen werden, könnten auf diesem Wege grosse Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid recycelt werden. Einen wesentlichen Einfluss auf die globale CO<sub>2</sub>-Bilanz kann dieses Verfahren allerdings nur erreichen, wenn die Herstellung des benötigten Wasserstoffs nicht mit zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen belastet ist. Der Vorteil des Methanols liegt dabei hauptsächlich in seinem flüssigen Aggregatzustand und seiner Energiedichte. Die Schwierigkeiten, die sich bei der Handhabung, der Speicherung und dem Transport von Wasserstoff ergeben, werden so auf elegante Art vermieden. Methanol kann deshalb auch als Speichermedium für Wasserstoff angesehen werden. Die Verfahren zur Umwandlung von Wasserstoff in Methanol und zur Rückgewinnung von Wasserstoff aus Methanol sind etabliert. Eine komplette Lebenszyklusanalyse einer auf Methanol

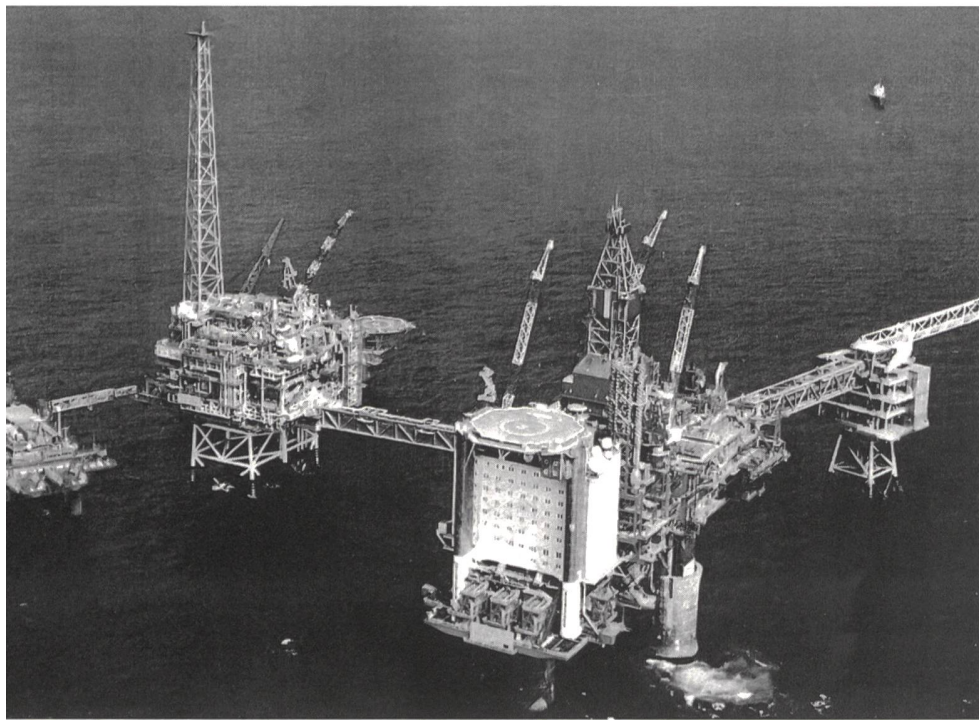


Bild 8 Kohlendioxid-Entsorgungsanlage auf einer Erdgasplattform in der Nordsee

Die mittlere Plattform beherbergt die Apparaturen zur Abtrennung, Kompression und Verflüssigung des Kohlendioxids. (Quelle: Statoil)



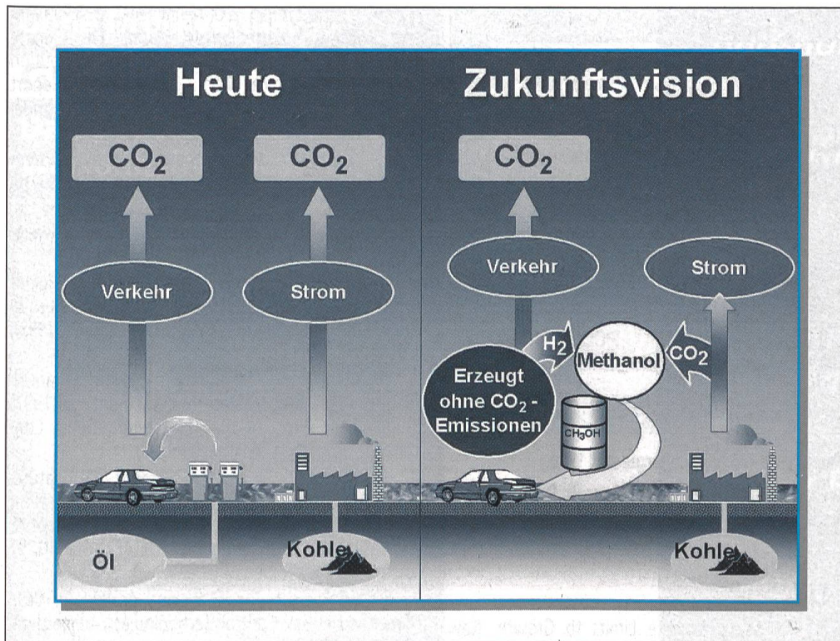


Bild 9 Umwandlung von gasförmigen Kraftwerks-Kohlendioxid-Emissionen in den flüssigen Treibstoff Methanol

beruhenden Energiewirtschaft wird zurzeit im Auftrag des Greenhouse Gas R&D Programme der Internationalen Energie-Agentur (IEA) durchgeführt.

### Neue Verbrennungskonzepte

Neue Konzepte zu Verbrennungsprozessen können vereinfachte, weniger energieintensive CO<sub>2</sub>-Trennverfahren zulassen. Bei der Vergasung von Kohle und Schwerölen wird ein Hochdrucksynthesegas gewonnen, das im wesentlichen aus CO, H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> besteht. Das CO kann mit Wasserdampf über katalytische Verfahren in CO<sub>2</sub> und Wasserstoff umgewandelt werden. Die so entstehenden hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen können durch einen wesentlich günstigeren physikalischen Prozess (Druckwechseladsorption) vom Wasserstoff getrennt werden, der dann den Verbrennungsprozess einer Turbine speisen könnte. In Zukunft sind vielleicht auch Membrantrennverfahren und Kondensation durch Temperaturabsenkung denkbar. Ein anderes Verfahren besteht darin, die Verbrennung in Sauerstoff statt in Luft durchzuführen. Verbrennt man Gas oder Kohle in einer Sauerstoffatmosphäre, so enthält das Rauchgas im wesentlichen CO<sub>2</sub> und Wasserdampf. Durch Rückführung lässt sich ein fast reines CO<sub>2</sub>-Abgas erreichen.

### Erneuerbare Energien

Langfristig ist eine Einschränkung des Verbrauchs fossiler Energieträger unum-

gänglich. Zu den kohlenstofffreien Energieträgern zählen die Kernenergie und die erneuerbaren Energien. Die Kernenergie trägt zurzeit 17% zur weltweiten Stromerzeugung bei, in Europa sogar 35%. In 32 Ländern sind 421 Kernkraftwerke im Betrieb, 47 im Bau und weitere 15 in der Planung.

Die industrielle Nutzung von Sonnen- und Windenergie weist, ausgehend von einem tiefen Niveau, hohe Zuwachsraten auf (Bild 10). Zusätzlich zur Nutzung von Wasserkraftwerken, die 22% der installierten Kapazität ausmachen, wird bereits 1% des Stroms aus erneuerbaren Energien (Sonnenstrahlung, Wind, Biomasse, Erdwärme und Meeresbewegung) gewonnen. Insbesondere die Nutzung von

Windenergie zur Stromerzeugung hat nach ersten Erfolgen in den USA in den Jahren 1985–1995 neuerdings in Europa und in zunehmendem Masse auch in Asien grosse Fortschritte gemacht (Bild 11). Es sind heute weltweit 10 GW an Windenergie installiert, was bereits der Leistung von zehn grossen Kernkraftwerken entspricht. Die Wachstumsrate 1998 betrug über 60%.

Der Anteil der Solarzellen an der Stromerzeugung ist zurzeit noch etwa zehnmal kleiner, aber auch stark wachsend. Am 6. April 1999 übernahm BP Amoco die Firma Solarex und wurde damit zum weltgrößten Hersteller von Solarzellen vor Kyocera, Japan, und Siemens Solar, USA. BP Solar hat eine Jahresproduktion von 30 MW, was einem Marktanteil von 20% entspricht. Der Einsatz von photovoltaischen Anlagen wird insbesondere in Regionen erwartet, in denen kein Zugang zu elektrischen Versorgungsnetzen vorhanden ist. Das trifft auf etwa ein Drittel der Erdbevölkerung zu, also zwei Milliarden Menschen.

Die Bedeutung der erneuerbaren Energien wird in Zukunft stark zunehmen. BP und Shell halten es für möglich, dass auch bei gesteigertem Gesamtbedarf im Jahre 2060 etwa 50% der kommerziellen Energie mit erneuerbaren Energien gedeckt wird. Die mittelfristige Zielvorstellung der Europäischen Union, der sich alle 15 Mitgliedstaaten verpflichtet fühlen, sieht für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien einen minimalen Anteil von 12% im Jahre 2010 vor.

### Ausblick

Die mit Energienutzung einhergehenden Treibhausgas-Emissionen verursachen messbare Änderungen im Klimasystem wie zum Beispiel den Anstieg

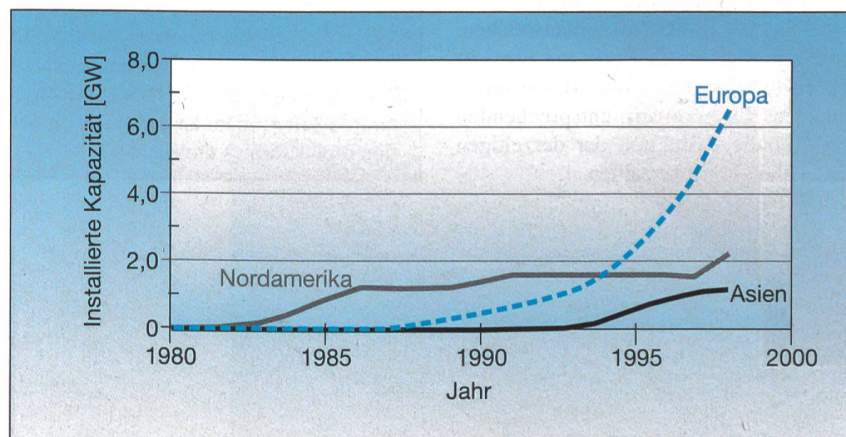


Bild 10 Zeitliche Entwicklung der Stromerzeugung durch Windturbinen in verschiedenen Regionen (Quellen: Vital Signs, Worldwatch Institute, Washington DC, und World Market Update, BTM Consult, Ringkøbing, Dänemark)



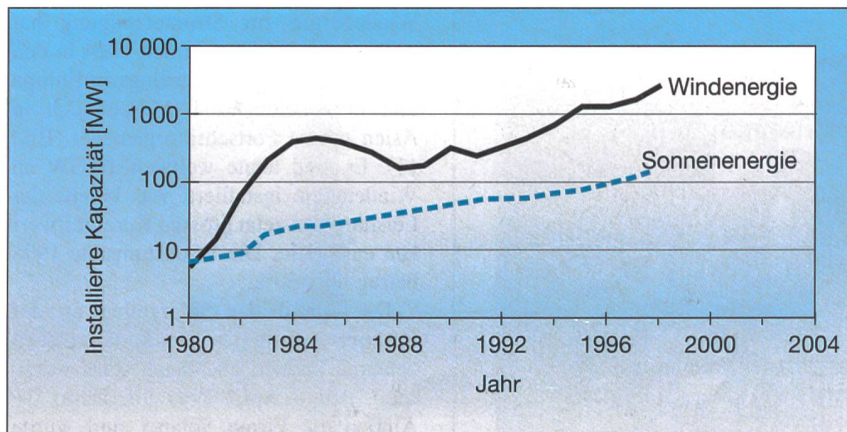


Bild 11 Jährlicher Kapazitätswachstum der Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie seit 1980

(Quellen: Vital Signs, Worldwatch Institute, Washington DC; World Market Update, BTM Consult, Ringkøbing, Dänemark; Photovoltaic News, PV Energy Systems, Warrenton, USA)

der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration. Die davon ausgehenden Bedrohungen sind global und langfristiger Natur. Die prognostizierten Klimaveränderungen treffen alle Länder, wenn auch unterschiedlich stark. Am meisten betroffen sind einige Meeresanrainerstaaten, die selbst nur unwesentlich zu diesen Emissionen beitragen. Die Umsetzung der in Kyoto vereinbarten Umweltziele erfordert rasche Massnahmen, die auch zu einer beschleunigten Entwicklung erneuerbarer Energien führen. Die Dominanz fossiler Brennstoffe wird jedoch weit in das nächste Jahrhundert reichen. Deshalb müssen alle Möglichkeiten zur Energieeinsparung, Effizienzsteigerung und Substitution kohlenstoffreicher Energieträger wahrgenommen werden. Im Kraftwerksbereich können neue Verbrennungstechnologien und Verfahren zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> mit anschließender Endlagerung oder Verwertung auch einen wesentlichen Beitrag zur Emissionsminderung leisten. Bei konsequenter Nutzung aller technischen Möglichkeiten sind Reduktionen der CO<sub>2</sub>-Emissionen denkbar, die sogar über die Kyoto-Ziele hinausreichen. Voraussetzung ist allerdings die Einsicht in die Notwendigkeit dieser Massnahmen und der Wille, einen entsprechenden Preis für die Reduktion der derzeitigen Umweltbelastung zu zahlen.

### Literatur

- [1] D. L. Meadows: The Limits to Growth. New York: Universe Books 1992 (Report of the Club of Rome).
- [2] F. Joos: The atmospheric carbon dioxide perturbation. *Europhysics News* 27(1996), 213–218.
- [3] P. D. Jones, T. M. L. Wigley: Die Erwärmung der Erde seit 1850. *Spektrum der Wissenschaft*, (1990) 12, 108–116.
- [4] H. Grassl: Der veränderte Energiehaushalt der Erde. *Phys. Bl.* 51(1995)6, 487–492.

[5] J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell, Eds.: *Climate Change: The Science of Climate Change*, Contribution of the Working Group I to the 2<sup>nd</sup> Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press 1996.

[6] G. Tezlaß: Der Treibhauseffekt aus wissenschaftlicher Sicht, *VGB Kraftwerkstechnik* 77(1997)10, 829–831.

[7] K. Heinloth: *Die Energiefrage*. Braunschweig: Vieweg 1997.

[8] K. Heinloth: *Die Energiefrage: Notwendigkeit und Möglichkeiten für eine umweltverhaltende Versorgung mit Energie*. *Bulletin SEV/VSE* 21(1998), 29–33.

[9] H. J. Herzog, Ed.: *Carbon Dioxide Removal. Energy Conversion and Management* 38(1997) Supplement (Proc. of the Third International Conference on Carbon Dioxide Removal).

[10] H. Herzog, E. Drake, E. Adams: CO<sub>2</sub> Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change. A White Paper, Final Report, January 1997, DOE Order No. DE-AF22-96PC01257 (<http://web.mit.edu/energylab/www/>).

[11] B. Eliasson, P. F. W. Riemer, A. Wokaun, Eds.: *Greenhouse Gas Control Technologies*. Amsterdam: Pergamon 1999.

[12] T. Ohsumi: CO<sub>2</sub> Disposal Options in the Deep Sea. *Marine Technology Society Journal* 29(1995)3, 58–66.

[13] B. Eliasson: CO<sub>2</sub> chemistry: An option for CO<sub>2</sub> emission control? in *Carbon Dioxide Chemistry: Environmental Issues*, ed. by J. Paul and C. M. Pradier, Cambridge, The Royal Society of Chemistry 1994, 5–15.

## Les combustibles fossiles et le problème global du CO<sub>2</sub>

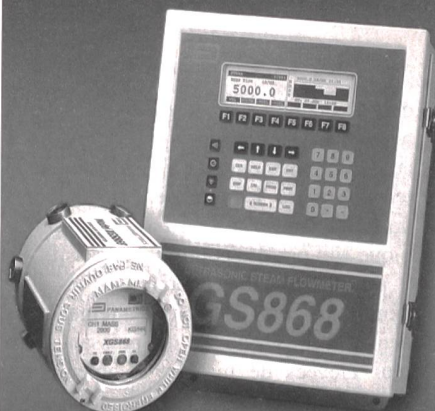
La prise de conscience du fait que les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux phénomènes de combustion ont une influence néfaste sur le climat mondial a abouti pour la première fois, lors de la conférence climatique mondiale de décembre 1997 à Kyoto, à des décisions contraignantes en droit international qui, pour les 39 nations industrialisées, prévoient une réduction sensible des six principaux gaz de serre. Les objectifs convenus de réduction ne pourront être atteints que si l'on exploite toutes les possibilités d'une utilisation économique de l'énergie et de réduction ou de suppression des émissions de CO<sub>2</sub> dans la production de courant électrique. La part d'énergies renouvelables continuera de croître fortement et apportera d'ici dix ans déjà une contribution sensible à la production d'énergie électrique. Les autres options comprennent une meilleure utilisation des combustibles par amélioration du rendement, le passage à des combustibles contenant moins de carbone, la séparation et l'élimination ou le recyclage du dioxyde de carbone et la production de courant électrique exempte de carbone par énergie nucléaire. Il faut partir de l'idée que les combustibles fossiles continueront de jouer un rôle déterminant au 21<sup>e</sup> siècle également mais avec des techniques de combustion à plus faibles émissions.



**NEU:**  
DAMPF-Durchflussmessung  
ohne Druckverlust

## GS868 und XGS868

Dampf kostensparend und  
wartungsfrei messen



- kein Druckverlust und damit erhebliche Energieeinsparung
- bidirektionale Messung bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0,03 bis 46 m/s
- durch den hohen dynamischen Bereich nur eine Messstelle für Schwach- und Volllastbereich
- Messung an Rohrgrößen von 50 bis 2000 mm bei Drücken von 1 bis 240 bar
- direkte Messung bei Temperaturen bis 450 °C und mehr
- hohe Genauigkeit durch patentiertes Verfahren
- wartungs- und verschleißfreie wirtschaftliche Messung

Bitte per Fax oder Post  
an PANAMETRICS.

- ☐ Schicken Sie mir Unterlagen zur  
Durchflussmessung von Sattedampf  
und überhitztem Dampf

Mich interessieren auch Ihre Geräte zur  
Durchflussüberwachung von

- ☐ Fackelgasen ☐ Gasen

- ☐ Informieren Sie uns auch über die  
leicht nachträglich zu installierende  
Durchflussmessung an Rohrleitungen  
von 12 bis 5000 mm für Flüssigkeiten  
aller Art (vom Reinstwasser bis zu Ab-  
wässern, zweiphasigen Flüssigkeiten)

Name/Vorname

Firma

Funktion

Telefon

Fax

Straße

PLZ/Ort



**PANAMETRICS**  
Mess- und Prüftechnik

Telefax:

0 61-2 25 44 10

PANAMETRICS

Birsigstr. 2

CH-4054 Basel

Tel.: 0 61-2 25 44 33

*Globalisierung der Energiemärkte  
bedeutet auch Kostendruck  
und höhere Ansprüche der Kunden.*

*Neubau oder Revision  
von Kraftwerken und Unterwerken  
werden aus dieser Sicht  
neu beurteilt.*

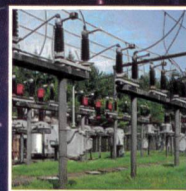
*Anlagen-Engineering  
kann hier Gleichgewicht schaffen  
zwischen Kosten, Verfügbarkeit  
und Sicherheit.*

*Bei Projektierung, Komponenten,  
Leitsystemen, Montage  
und Inbetriebnahme.*

*Kontaktieren Sie uns.*

*Wir freuen uns darauf,  
mit Energie an Ihrer Zukunft zu  
arbeiten.*

# ENERGIE FÜR DIE ZUKUNFT



**ESATEC**  
Energiesysteme und Anlagentechnik AG  
CH 8201-Schaffhausen

Tel. 052 624 62 80 Fax 052 624 62 84

www.esatec.ch Mail: energie@esatec.ch