
Gert Blumenthal

Die stoffwandelnde Industrie im Solarzeitalter - einige Überlegungen¹

1. Einleitung

Im Vergleich zu 1856, dem Beginn der weltweiten systematischen Messungen, ist die bodennahe Durchschnitts-Temperatur um etwa 0,7 K angestiegen (56, S. 37). Obwohl diese Erwärmung durch die komplexe Wechselwirkung vieler Faktoren hervorgerufen sein kann (14, S.412), festigt sich doch bei der überwiegenden Anzahl der Klimaforscher die Ansicht, daß die Hauptursache mit hoher Wahrscheinlichkeit in dem zusätzlichen Treibhauseffekt zu suchen ist, bewirkt vor allem durch die anthropogenen Anteile von Kohlenstoffdioxid, CO₂, Methan, CH₄, und Distickstoffmonoxid, N₂O (39). Die Hauptquellen des anthropogenen CO₂ werden in der Verbrennung der fossilen Energierohstoffe, die des Methans in Förderung und Transport von Erdgas, in Brandrodungen, der Rinderzucht und im Naßreisbau gesehen.

Zunehmend werden auch Argumente vertreten, wonach der Treibhauseffekt *nicht* die Ursache für die Klimaerwärmung sei (6) (19). Sollten sich diese Auffassungen bestätigen, wäre die Menschheit ihrer drückendsten Verantwortung enthoben, zum Wohle künftiger Generationen eine neue Technik aufzubauen, die die Ökosphäre nicht mit klimarelevanten Emissionen belastet. Solange aber die „Anti-CO₂-Theorien“ nicht auf einer breiteren wissenschaftlichen Grundlage verifiziert sind, wovon bisher keine Rede sein kann, ist nach dem Hauptsatz der Ökologie zu verfahren:

Wenn es auch nur möglich erscheint, daß ein Umweltproblem zu einer größeren, lebensbedrohenden Gefahr werden könnte, darf das Fehlen diesbezüglicher letzter wissenschaftlicher Klarheit nicht davon abhalten, sofort Vorsichtsmaßnahmen zu treffen.

Beunruhigend sind das hohe Wachstumstempo der atmosphärischen Treibhausgas-Konzentrationen sowie die überwiegend negativen bis katas-

1. Vortrag in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 20. September 2001

trophalen Auswirkungen der daraus resultierenden Erwärmung auf das Klima und damit auf die gesamte Biosphäre.

Will die Menschheit die auf sie zukommenden existentiellen Bedrohungen in Grenzen halten und, in den nächsten Generationen, schließlich beseitigen, besteht die einzig erfolg-versprechende und nachhaltige Handlungsweise darin, schnellstmöglich die Förderung und Verwendung aller fossilen Kohlenstoff-Rohstoffe einzustellen und diese sowohl für die Energie- als auch für die Stoffproduktion durch solare Quellen zu ersetzen. Über alle Klima-diskussionen hinaus wird diese Handlungsrichtung zudem aufgezungen durch die nicht länger zu leugnende Erschöpfung der fossilen Ressourcen, zunächst des Erdöls (30) (72).

Gerade weil in dieser Beziehung die energiepolitischen Entwicklungen der letzten Jahre in den USA, in einigen Ländern Osteuropas und der Dritten Welt nicht optimistisch stimmen können, soll im Folgenden versucht werden, das Szenario des Solarzeitalters auszuleuchten.

Im „Fossilzeitalter“, in dem die Menschheit seit etwa zweihundert Jahren lebt, beruht die Energieversorgung stark überwiegend und die Stoffversorgung weitgehend auf fossilen Kohlenstoff-Rohstoffen. Der Übergang in das „Solarzeitalter“, in dem *ausschließlich* regenerative Energie- und Stoffquellen genutzt werden, wäre eine derart tiefgehende Umwälzung der Gewohnheits- und Gedankenwelt von Generationen, daß gegenwärtig nicht einmal auch nur die wichtigsten Folgen dieses Übergangs erahnt werden (16).

Die hier vorliegenden Betrachtungen sind auf das Wechselverhältnis zwischen Solarzeitalter und chemischer Industrie konzentriert. Das erschien deshalb angebracht, weil in den diesbezüglichen Diskussionen dieser, das moderne Leben tief prägende Bereich weitgehend vernachlässigt wird.

Dabei ist eine diesbezügliche Untersuchung der chemischen Industrie besonders interessant, denn sie ist der größte industrielle Verbraucher an Primärenergie! Zudem stellt der Übergang in das Solarzeitalter anspruchsvolle Herausforderungen an die chemische Industrie, denn

- diese muß sich an eine neue energetische Basis anpassen;
- sie muß sich neue Stoffquellen erschließen und
- sie muß sich auf neue, solarophile Verfahren umstellen.

Angesichts des Umfangs und der Komplexität der Thematik sind die hier vorgelegten Erwägungen nur qualitativ und teilweise spekulativ, denn viele Annahmen sind unvermeidlicherweise unsicher.

2. Das Solarzeitalter - was ist das?

2.1 Charakterisierung

Das zugrundegelegte Szenario beruht auf dem *Konzept der solaren Vollversorgung* und wird durch folgende Punkte umrissen:

1. Der *gesamte* Energiebedarf der Menschheit wird aus regenerativen Quellen gedeckt.
2. Es ist bewiesen und akzeptiert, daß es einen anthropogenen Anteil am Treibhauseffekt gibt. Als die am schwersten zu beherrschenden und darum folgenreichsten anthropogenen Treibhausgase wurden Kohlenstoffdioxid, CO₂, und Methan, CH₄, erkannt.
3. Die Konsequenzen: Fossile Kohlenstoff-Ressourcen werden weder für die Energieerzeugung noch für die Stoffproduktion mehr verwendet. Als Kohlenstoff-Quellen für die Stoffwirtschaft stehen nur noch zur Verfügung:
 - das freie Kohlenstoffdioxid aus der Luft, dem Meer, aus spontanen Quellen sowie als technisches Abprodukt;
 - Biomasse.
4. Kernspaltungsenergie wird nicht mehr genutzt, vor allem wegen
 - ihrer erwiesenen hohen Störungssensibilität (Harrisburg, Tschernobyl, Tokai Mura),
 - der praktisch unvermeidbaren radioaktiven Emissionen von Bergbau, Brennelementefertigung, Kraftwerk, Wiederaufarbeitung, Transport sowie Zwischen- und Endlagerung;
 - der sozial und ethisch unververtretbaren Folgen des Uranbergbaus und
 - der geringen Reichweite der zu annehmbaren Kosten gewinnbaren Uran-Reserven.

Kernfusionsenergie wird nicht verwendet, weil sie inakzeptabel große Kapitalmengen bindet, hochzentralisierte Eigentumsstrukturen begünstigt, unvertretbar große Abwärmemengen liefert und ebenfalls nicht frei von radioaktiven Emissionen ist.

2.2 Bedarfsdeckung

Die entscheidende Grundlage für die hier zu behandelnde Problematik ist die Beantwortung der elementaren Frage:

Können die regenerativen Energiequellen den weiter steigenden Energiebedarf der Menschheit decken?

Man darf nicht übersehen, daß im Solarzeitalter der Energieaufwand auch für die gesamte Stoffproduktion aus regenerativen Quellen zu decken ist, denn fossile Energie-Rohstoffe stehen nicht mehr zur Verfügung. Ein Beispiel möge die Schärfe des Problems verdeutlichen: Großtonnagige organische Basispolymere, wie z.B. Polyethylen, können nicht länger aus Erdöl hergestellt werden, sondern sind z.B. aus Biomasse zu gewinnen oder durch die hoch-endergonische Reaktion von Kohlenstoffdioxid mit Wasser technisch zu synthetisieren - ein Reaktionsprinzip, das bisher nur in der natürlichen Photosynthese verwirklicht ist.

Die Frage, ob die regenerativen Energien den Bedarf der Menschheit decken können, ist längst positiv beantwortet:

Die Energien der auf die Kontinente fallenden Sonne, des Wassers, des Windes und der Meereswellen, der Biomasse, der Meereswärme und der Geothermie bieten jährlich rund das 3000fache des derzeitigen Welt-Jahresenergieverbrauchs. Die technische Nutzung nur eines Promille dieser Energieströme kann also die Energiebedürfnisse der Menschheit auch bei noch steigendem Bedarf prinzipiell vollständig befriedigen (42, S. 9).

Die auf die Erde treffende Sonnenstrahlung entspricht dem 15 000fachen des Weltenergie-angebots von 1990 (13, S. 50).

Oder: Der Primärenergieverbrauch der Menschheit 1996 betrug $1,1 \cdot 10^{14}$ kWh (18, S. 54), aber allein die Landmassen absorbieren jährlich eine Sonnenenergie von $1,7 \cdot 10^{17}$ kWh, also das 1500fache des Bedarfs (69, S. 17).

Über diese Berechnungen des *globalen* Potentials hinaus wurden *regionale* Potentiale in einer Vielzahl von Studien abgeschätzt, die für verschiedene Territorien diverser geographischer Lagen die globalen Aussagen prinzipiell bestätigen. Besonders aufschlußreiche Untersuchungen betreffen die USA (32) und die BRD (48). In dem „Sustainable Szenario“ des Wuppertal-Instituts wird gezeigt, „daß Europa in der Lage ist, sich 100% aus erneuerbaren Energiequellen zu versorgen“ (44).

2.3 Energieeffizienz

Die Feststellung, daß regenerative Energien in der Lage sind, den Energiebedarf der Menschheit vollständig zu decken, wird noch überzeugender, wenn die gewaltigen Potentiale der Effizienzerhöhung in „Produktion“ und „Konsumtion“ von Energie berücksichtigt werden. Diese Erhöhungen zu verwirk-

lichen, erfordert nicht nur höhere technische Wirkungsgrade, sondern vor allem Veränderungen gesellschaftlicher Strukturen und Gewohnheiten.

Hier seien nur einige besonders schwerwiegende Beispiele für Energieverluste in der gegenwärtigen Technik genannt:

- Die *Umwandlungsverluste* in Kraftwerken und Heizkraftwerken der Bundesrepublik, einschließlich der Leitungsverluste, betragen 1995 etwa 10^{12} kWh/a und damit 28 % des Primärenergieverbrauchs - ein größerer Betrag als die Endenergie für Warmwasser und Raumheizung (42, S. 17).
- Die *Leerlaufverluste* bei Elektrogeräten in Büros und Haushalten in der Bundesrepublik betragen 1995 mindestens 20,5-Milliarden kWh (34, S. 24). Die Kernkraftwerke Obrigheim, Stade, Biblis A und Brunsbüttel produzierten 1997 zusammen 20,8-Milliarden kWh! (23)
- *Gleichstrom* hat beim Antrieb von Motoren einen 2,5mal so großen Wirkungsgrad wie Wechselstrom (68, S. 77). Die Größe dieses Potentials wird erst deutlich, wenn man weiß, daß Elektromotoren über die Hälfte des Welt-Strombedarfs verbrauchen (68, S. 91) (21, S. 64)!

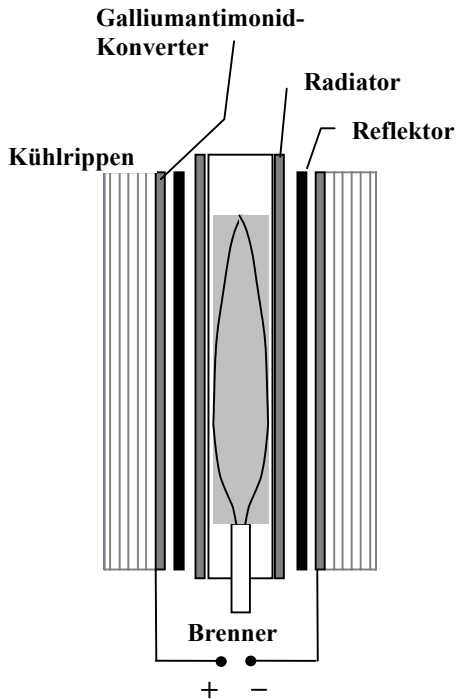
2.4 Technische Abwärme

Gerade die volkswirtschaftlich bedeutendsten Wandlungsprozesse arbeiten mit riesigen Wärmeverlusten. So wird eingeschätzt, daß in der Glasindustrie etwa 2/3 der verbrauchten Energie als Abwärme freigesetzt werden (12). Eine kostengünstige Möglichkeit, derartige Verluste zu vermindern, besteht darin, Prozeß-Abwärme in das Fernwärmenetz einzuspeisen, wie das eine in Nordrhein-Westfalen gelegene Aluminium-Schmelzanlage praktiziert (66).

Der Verbrennungsmotor gestattet lediglich, etwa 20 % der im Brennstoff enthaltenen Energie für die Fortbewegung zu nutzen, der Rest heizt die Atmosphäre.

Vielversprechend sind Wandler, die aus technischer Abwärme Strom gewinnen. Dafür seien hier einige neuere Beispiele wiedergegeben:

Der Organic-Rankine-Cycle (ORC): In derartigen Anlagen wird eine niedrig siedende Flüssigkeit, z.B. Pentan, durch die Abwärme in Dampf übergeführt, der eine Turbine mit Elektrogenerator treibt. Die weltweit erste Block dieser Art wandelt im Zementwerk Lengfurt die Abwärme der Klinkerkühler von 275 °C und deckt einen Teil des Strombedarfs (34, S. 131), zwei andere Blöcke arbeiten in Holzkraftwerken (27). ORC-Anlagen werden vor allem für Betriebe der Metall-, Steine- und Erdenindustrie als aussichtsreich eingeschätzt.



Der Thermophotovoltaik-Generator: Dieses Aggregat (Abb.) wird seit einigen Jahren intensiv untersucht. Das Funktionsprinzip: Eine Hochtemperatur-Quelle, z.B. Flammengase, erhitzt einen Radiator (aus Siliciumcarbid oder Seltenerdoxid), der dann Photonen im Infrarot-Bereich abstrahlt. Der Reflektor wirft all die Photonen zurück zum Radiator, die im Konverter, das sind Gallium- oder Indium-antimonid-Photovoltaik-Zellen, nicht photovoltaisch aktiv werden können. Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen, müssen Radiator, Reflektor und Konverter optimal aufeinander abgestimmt sein. Das erste auf dem US-Markt befindliche Gerät dient der Wärme- und Stromversorgung von Segelbooten. Es wurde auch schon als Antriebsaggregat in ein Personenauto eingebaut. Das Haupteinsatzgebiet aber wird in der Umwandlung industrieller Abwärme in Gleichstrom gesehen, vor allem in der Glas-, Aluminium- und Stahlindustrie (12).

Der thermoelektrische Generator (TEG): Die auf dem Seebeck-Effekt beruhende technisch adaptierte Thermosäule soll zunächst einmal zusammen

mit Photovoltaik-Zellen ein Hybrid-Aggregat bilden. Dieses liefert auch in Dunkelphasen Strom, wenn der TEG mit Öl- oder Wasserstoff-Flammen erhitzt wird (52). Es liegt nahe, mit Hilfe des TEG auch Abwärme in Gleichstrom zu wandeln.

2.5 Fazit

Die fließenden Energien der Natur reichen bei weitem aus, den Energiebedarf auch einer noch weiter wachsenden Erdbevölkerung zu decken! Diese Einsicht ist für die Technik und die gesamte Gesellschaft richtungsweisend und läßt die energetische Zukunft erheblich anders beurteilen, als das noch vor etwa zwanzig Jahren möglich war.

Besonders hervorzuheben ist: Um den Energiebedarf zu decken, ist Kern-energie-technik im Solarzeitalter nicht erforderlich.

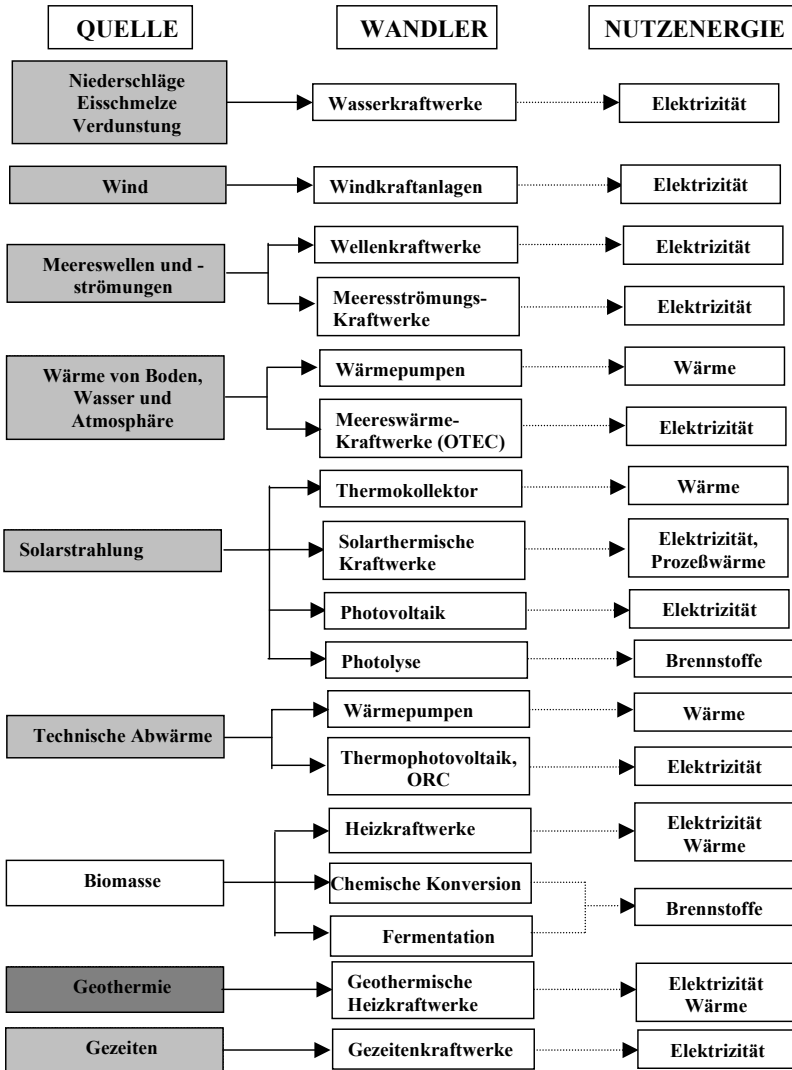
3. Wird die Sonne die stoffwandelnde Industrie verändern?

Die technischen Eigenschaften der regenerativen Wandler sowie die erforderliche allgemeine Effizienzerhöhung in der Energiewandlung werden die stoffwandelnde Industrie tiefgehend verändern. Die größten Probleme werden aber nicht aus der Energie-, sondern vielmehr aus der Rohstoffproduktion erwachsen, und das aus zwei Gründen:

- Die Gewinnung anorganischer Roh- und Grundstoffe, wie Erze, Salze, Stahl, erfordert, aus der dezentralen Energieerzeugung lokal konzentrierte Energie bereitzustellen.
- Die Gewinnung organischer Rohstoffe, wie Brennstoffe, Kunststoffe, Gummi, setzt voraus, Kohlenstoff (in Form von Verbindungen) aus atmosphärischem CO₂ oder Biomasse zu konzentrieren.

Die wichtigsten der neuen Wandler sind in der folgenden Abbildung zusammengestellt. Darüber hinaus ist die Brennstoffzelle zu berücksichtigen, der für das Solarzeitalter auf Grund ihrer vielfältigen Vorteile grundlegende Bedeutung beizumessen ist (73)!

REGENERATIVE ENERGIEQUELLEN UND WANDLER



Obwohl die Prinzipien dieser Wandler wohlbekannt sind, eröffnen sie doch eine neue technische Welt. Zudem werden ständig neue Ideen entwickelt, wie z.B. die des Osmosekraftwerks (14, S. 187) und des Meeresströmungskraftwerks (28). Auch der MHD-Generator (17) und der AMTEC-Generator (14, S. 328) sollten solarthermisch zu betreiben sein.

Was charakterisiert die regenerativen Energietechniken?

- *Das andere Prinzip.* Regenerative Wandler sind *Konzentratoren* der „fließenden“ Energien der Natur, die Wandler der Fossiltechnik dagegen *Dissipatoren* der „ruhenden“ Energie von Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran. Diese Wandler erhöhen dabei die Entropie in einem außerordentlich großen Ausmaß, demgegenüber die spontane Entropieerhöhung bei der natürlichen Umwandlung von Sonnenstrahlung in Wärme zu vernachlässigen ist.
- *Die geringe Energiedichte.* Die Energiedichte der regenerativen Quellen ist wesentlich geringer als die der fossilen. Sie beträgt z.B. bei einer Windkraftanlage 3 kW/m^2 , bei einem Kohlekraftwerk aber 300 kW/m^2 .
Erforderlich werden also Flächen für die regenerativen Wandler.
- *Die Vielfalt der Wandlungsprinzipien.* Zu der seit reichlich hundert Jahren in der Elektroenergieerzeugung ausschließlich angewandten Kombination „Antriebsmaschine + Elektrogenerator“ werden neue Wandlungsprinzipien hinzutreten:
 - Wärmegewinnung aus Sonnenstrahlung und Geothermie, Wärmepumpe, Solararchitektur;
 - Stromgewinnung aus Photovoltaik, Photo-Elektrochemie und Brennstoffzelle;
 - Biomassenutzung in großer Vielfalt.

Die Energietechnik wird vielfältiger und ist z.T. abhängig von der Natur.

- *Der fluktuierende Charakter.* Einige der regenerativen Energien fließen nicht kontinuierlich, so die Sonne, der Wind, die Wasserkraft und die Gezeiten.
Um trotzdem ein stetiges Energieangebot zu ermöglichen, werden also Netze, Energie-Speicher und Hybrid-Anlagen erforderlich.
- *Der dezentrale Charakter.* Charakteristisch für die solare Energietechnik wird die dezentrale Aufstellung der verschiedenen Wandler in optimaler Kombination, angepaßt dem natürlichen lokalen Energieprofil, sein. Demgegenüber wird die große Wandlerzentrale mit ausgedehnten Leitungssystemen an Bedeutung zurücktreten.

Notwendig wird eine spezifische Systemtechnik für Steuerung und Überwachung mit dem Ziel hoher Versorgungssicherheit.

4. Die neuen Wandler und die chemische Industrie

4.1 Solarwärme

Eines der Charakteristika des Solarzeitalters wird die allgemeine Verfügbarkeit solarer Niedertemperaturwärme im Bereich 80-120 °C sein. Dadurch werden in der chemischen Industrie Niedertemperatur-Verfahren wieder verstärkte Bedeutung erlangen. Solare Niedertemperaturwärme in der chemischen Industrie ist z.B. überall dort vorteilhaft, wo große Volumina wäßriger Lösungen eingedampft werden müssen - ein verbreiteter und energieaufwendiger Prozeß!

Vor allem aber die solare Mittel- und Hochtemperatur-Wärme aus solarthermischen Wandlern, wie Parabolrinnenkollektor, Parabolspiegel, Turmreaktor und Sonnenofen (40) (49) (69, S. 92), wird es sein, die über neuartige thermochemische Verfahren die Struktur der stoffwandelnden Industrie tiefgehend verändern wird. Welche technologischen und energiewirtschaftlichen Konsequenzen das in einigen Fällen zeitigen kann, wird an folgendem Vorschlag deutlich: Die Temperatur des Salzschnmelzbadens der Kryolith-Elektrolyse zur Gewinnung von Aluminium beträgt etwa 950 °C. Die letztlich dem elektrischen Strom entnommene erforderliche Wärmeenergie könnte zumindest teilweise aus Solarwärme gedeckt werden, was wertvolle Elektroenergie einsparen würde (69, S. 90).

Die solaren Hochtemperatur-Wandler sind konzentrierende Systeme, die einen Bereich von etwa 600 bis > 2000 K abdecken. Theoretisch kann ein schwarzer Receiver im Brennpunkt eines Parabolspiegels 6000 K erreichen (40, S. 65). Obwohl Parabolspiegel-Anlagen hauptsächlich in Hinblick auf die Energiegewinnung untersucht werden, sind sie doch auch vielversprechend für die Versorgung chemischer Prozeßeinheiten (49, S. 52).

Ein nichtkonzentrierender solarthermischer Wandler ist das Aufwindkraftwerk, in dem die von der Sonne erhitzte Luft durch einen Schlot nach oben entweicht und dabei eine Turbine treibt (15) (69, S. 134). Künftige Großanlagen sollen Schlothöhen von 1000 m sowie Durchmesser der folienüberdachten Bodenfläche von 2-5 km aufweisen. Der etwa in mittlerer Schlothöhe befindliche Turbinen/Generator-Satz soll auf 200 MW ausgelegt werden. Zum Vergleich: Eine Aluminiumhütte (also ohne Aluminiumoxid-Herstellung!) mit einer Jahresproduktion von 100 000 t Al benötigt eine elek-

trische Anschlußleistung von 200 MW - wie eine mittlere Großstadt. Aufwindkraftwerke erscheinen geeignet für den Sonnengürtel (zwischen 40° nördlicher und südlicher Breite) zur Elektroenergie-Versorgung von Großstädten und Industrieanlagen. Das Unternehmen EnviroMission plant, 2003 in Australien mit dem Bau eines 700 Millionen Dollar teuren Aufwindkraftwerks zu beginnen (59).

Das Konzept des Fallwindkraftwerks nutzt die kinetische Energie einer durch Wasserverdunstung abgekühlten, in einem Schlot herabstürzenden Luftsäule (69, S. 135).

Das Potential solarthermischer Kraftwerke wird als beträchtlich eingeschätzt: Allein auf geeigneten Flächen im Mittelmeerraum könnten derartige Anlagen das Vierfache des derzeitigen Weltstromverbrauchs erzeugen (49, S. 47)!

4.2 Biomasse

Für eine nachhaltige Biomasse-Nutzung stehen folgende Ressourcen sofort zur Verfügung: Restholz aus Wald und Industrie, organische Abfälle aus der Landwirtschaft, der Viehzucht, aus Schlachtbetrieben, der Lebensmittelindustrie sowie aus Gaststätten und Haushalten.

Beispiele für eine nachhaltige Biomasse-Konversion sind die modernen Anlagen in Schwarze Pumpe (Brandenburg) und Malchin (Mecklenburg-Vorpommern), in denen aus tierischen Abfällen Methanol bzw. Dieselkraftstoff erzeugt wird. Auch die Biomassenutzung mit Hilfe einer Brennstoffzelle wurde beschrieben (43)

Biomasse für die Energie- und Stoffversorgung läßt sich auch durch Plantagenwirtschaft erzeugen. Z. B. werden in Spanien in Kürze zwei Biomasse-Kraftwerke in Betrieb gehen, von denen jedes jährlich 105000 t Disteln und Stroh verbrennen soll. Die auf Plantagen wachsenden, gentechnisch veränderten (!) Disteln werden bis zu 3 m hoch.

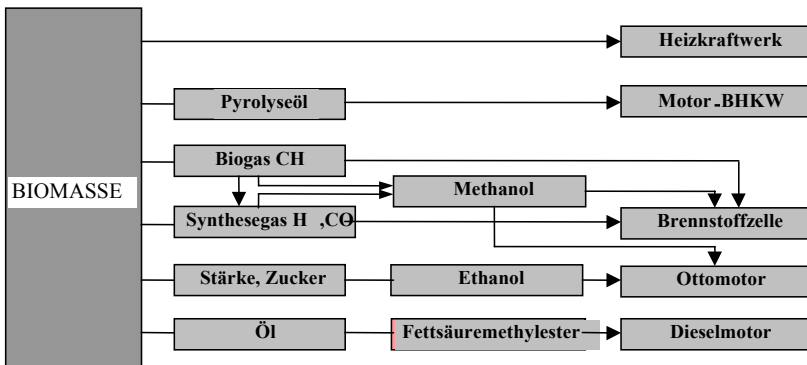
Energie-Plantagenwirtschaft droht aber, im Interesse hoher Energie-Flächendichte, alle Belastungen moderner Intensiv-Landwirtschaft mit sich zu bringen, nämlich

- großen Wasserbedarf,
- Anwendung von Düngemitteln, Pestiziden und der Gentechnik,
- Überbeanspruchung des Bodens, die zur Erosion führt (Boden ist nicht regenerativ!)
- die Konkurrenz zu den Bodenflächen der Nahrungsmittel-Landwirtschaft.

Bei der Orientierung auf Biomasse-Nutzung darf auch nicht übersehen werden, daß die Wälder dieses Planeten seit Jahrzehnten immer weiter zerstört werden (71, S. 58).

Biomasse kann auch in Algenkulturen produziert werden, vorteilhafterweise auf küstennahen Meeresflächen, sowie auch in Absorptionsanlagen für das anfallende Kohlenstoffdioxid aus regenerativen Produktionsanlagen und Kraftwerken.

Biomasse, potentiell eine wichtige nicht fluktuierende Quelle für Stoff und Energie, kann auf vielfältige Weise technisch verarbeitet werden (s. Abb., nach (54, S. 34)).



Landwirtschaftlich gezogene Biomasse ist zum Verbrennen zu schade. Die synthetischen Leistungen der Natur in Form der hochorganisierten molekularen Strukturen der Pflanzen wären vorteilhafter in der organischen Synthese zur Gewinnung komplizierter Verbindungen, wie Pharmaka, Farbstoffe, Polymere u.ä. zu nutzen. Elektroenergie sollte besser solarthermisch oder photovoltaisch und Brennstoff durch Hydrierung von atmosphärischem CO₂ produziert werden.

4.3 Methanwirtschaft

Einige Entwicklungen sprechen dafür, daß im Solarzeitalter Methan besondere Bedeutung zukommen könnte, dessen Hauptquellen dann Biogas, Depo-niegas und Grubengas wären. Methan läßt sich sowohl energetisch als auch stofflich nutzen.

4.3.1 Energetische Nutzung

Thermische Energie läßt sich durch Direktverbrennung von Methan, Strom in Blockheizkraftwerken sowie in Hochtemperatur-Brennstoffzellen gewinnen. Die Vielfalt der Nutzung und die dabei sich entwickelnde Anlagen-*Miniaturisierung* und Dezentralisierung zeigt das folgende Beispiel einer Berliner Firma: In einer mobilen, automatischen Reaktoranlage entsteht aus den Abfällen von Gewerbeküchen und Großveranstaltungen Biogas, aus dem in einem kleinen Blockheizkraftwerk, künftig mit Brennstoffzelle, Wärme und Elektroenergie gewonnen werden. Der Hauptabsatz wird in Japan gesehen (67).

Deponiegas kann auch in Motoren genutzt werden, muß aber vorher von den korrodierenden Verunreinigungen Schwefelwasserstoff, Ammoniak und Chlorwasserstoff befreit werden. Aus dem so vorgereinigten Gasgemisch läßt sich mittels Membrantechnik, die hier an Bedeutung zunimmt, nahezu reines Methan gewinnen (51).

Weitere Beispiele für eine nachhaltige energetische Nutzung von Methan sind zwei Pilot-Heizkraftwerke im Ruhrgebiet, die seit Frühjahr 2000 aus dem Grubengas benachbarter Zechen Strom und Fernwärme produzieren (1, S. 266) (57).

4.3.2 Stoffliche Nutzung

Die stoffliche Nutzung von Methan ist seit langem technisch bekannt und wird auch im Solarzeitalter, dann mit einer veränderten Rohstoffbasis, ihre Bedeutung behalten. In den heute wichtigsten chemischen Umsetzungen, die auch unter solarthermischen Bedingungen untersucht wurden (63), werden zunächst CO/H₂-Gemische, sogen. Synthesegas, erzeugt (Gll. 1-3).

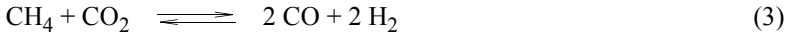
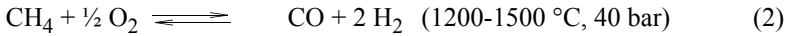
Die Umsetzung des Methans mit Wasserdampf an Nickel-Katalysatoren (Steam Reforming) ist das derzeit wichtigste Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff und Synthesegas:



Etwa 30 % des gesamten hierfür verbrauchten Methans werden verbrannt, um die erforderliche Reaktionswärme für diese endotherme Reaktion zu erzeugen!

Die Umsetzung nach Gl. 1 ermöglicht Speicherung und Transport von Hochtemperatur-wärme: Solarthermisch wird aus Methan und Wasserdampf

ein CO/H₂-Gemisch erzeugt, das, gegebenenfalls nach Ferntransport, katalytisch unter Wärmeabgabe in die Ausgangs-komponenten überführt wird (EVA/ADAM-Prozeß) (63, S. 34). Bedeutend sind auch die exotherme, nichtkatalytische partielle Oxidation (Gl. 2) und das endotherme CO₂-Reforming (Gl. 3).



Aus Synthesegas ist durch die Fischer-Tropsch-Synthese die ganze Palette grundlegender organischer Verbindungen zugänglich, wie Alkane, Alkene, Methanol, weitere Alkohole, Ether, Ester, Aldehyde und Ketone.

In manchen Fällen (s. Ammoniaksynthese) wird in exothermer Reaktion des Kohlenstoffmonoxids mit Wasserdampf (*Konvertierung*) an Eisen/Chrom- oder Cobalt/Molybdän-Katalysatoren weiterer Wasserstoff gewonnen:



Eine solarophile Variante dieser Umsetzung ist die homogenkatalytische CO-Konvertierung: Sie verläuft in saurer wäßriger Lösung mit einem Platinchlorid/Zinnchlorid-Katalysator bei normalen Temperaturen (29, S. 48)!

4.3.3 Probleme der Methanwirtschaft

Bei allen denkbaren Vorteilen des Methans im Solarzeitalter ist aber nicht zu übersehen, daß eine Methanwirtschaft auch Probleme mit sich bringt (31). Es ist nämlich unvermeidbar, daß dabei ständig große Mengen Methan in die Atmosphäre entweichen, wie schon die heutige Technik beweist: Bei Förderung, Transport und Verarbeitung von Erdgas gelangen 10-30 % der Fördermenge in die Atmosphäre! Hinzu kommen weitere anthropogene Methanquellen, wie der Naßreis-Anbau, die Rinderhaltung und die großen Stauseen (infolge der Vergärung der überfluteten Biomasse), insgesamt etwa 410 Mio. t/a (9, S. 192) (62, S. 761).

Methan ist darum so problematisch, weil es einen doppelten Treibhauseffekt ausübt (45, S. 169). Es wirkt einmal in der Troposphäre (bis 12 km) als eines der wirksamsten Treibhausgase (direkter Treibhauseffekt). Große Anteile jedoch gelangen bis in die Stratosphäre (bis 50 km, Obergrenze der

Ozonschicht) und werden dort oxidiert zu Wasserdampf, der Eiswolken bildet. Diese üben eine doppelte Schädigung aus:

- Sie sind treibhauswirksam (indirekter Treibhauseffekt), und
- sie wirken mit am Ozonabbau.

Es ist darum fraglich, ob ein großtechnischer Abbau von Methanhydraten zur Schonung oder eher zur Belastung der Atmosphäre führen würde. Nach James Lovelock, Biologe und Schöpfer der GAIA-Hypothese, ist Methan „wahrscheinlich der gefährlichste Stoff, den wir in die Atmosphäre entlassen.“ (45, S. 165).

Andererseits birgt die Biomasse-Vergärung ein großes technisches Potential. Es erhebt sich die Frage, ob sich der Gärprozeß auf ein anderes Endprodukt umlenken läßt, z.B. auf Wasserstoff, Methanol oder Aceton.

4.4 Wasserstoffwirtschaft

4.4.1 Solare Wasserstoffwirtschaft

Darunter versteht man ein Energiekonzept auf der Basis von solar erzeugtem Wasserstoff, der darin zugleich als Sekundärenergie-Träger sowie als Speicher- und Transportmedium für Energie dient (33).

Die Wasserstoffwirtschaft bietet einige bestechende Vorteile: Wasserstoff läßt sich

- 1) großtechnisch einfacher speichern und transportieren als Elektroenergie;
- 2) sowohl energetisch als auch stofflich vielfältig nutzen;
- 3) in der Brennstoffzelle verbrennen, ohne Schadstoffe freizusetzen.

Erfahrungen über den technischen Umgang mit großen Wasserstoff-Mengen sind bereits seit Jahrzehnten vorhanden. Die Speicherung großer Wasserstoff-Volumina wird infolge des Betriebs von Großraketen seit Jahren technisch beherrscht (29, S. 52). Ein Fortschritt in der Wasserstoffspeicherung wäre die Druckgasflasche aus Kohlefaserkomposit-Werkstoff (55, S. 27). Für den Transport von Flüssigwasserstoff (-253 °C) eignen sich Rohrleitungen und Tankwagen. Im Ruhr-Gebiet, in den USA und in Südafrika wird seit längerem komprimierter Wasserstoff durch Rohrleitungsnetze von bis zu 200 km Länge transportiert.

In der Forschung zur möglichst effizienten Herstellung von Wasserstoff sind folgende Hauptrichtungen zu erkennen:

- *Zersetzung von Wasser*: Elektrolytisch, photo-elektrochemisch, photochemisch, thermo-chemisch (über anorganisch-chemische Kreisprozesse).

- *Zersetzung anderer Wasserstoffverbindungen*: Insbesondere von Schwefelwasserstoff, H_2S (33, S. 71), und Ammoniak, NH_3 .
- *Zersetzung von Biomasse*.

Ein wesentlicher Prozeßschritt von allgemeiner Bedeutung ist die Abtrennung von Wasserstoff aus Gasgemischen, wofür sich immer mehr die Membrantechnik bewährt (43, S.99).

4.4.2 Fossile Wasserstoffwirtschaft

Seit einigen Jahren existieren zwei Konzepte, um aus *fossilen* Energierohstoffen Wasserstoff zu gewinnen.

Reforming und Untergrundverpressung. Erdöl wird vor Ort durch Steam-Reforming (s. 4.3.2) umgewandelt in Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid, das in den Untergrund verpreßt wird! Der Wasserstoff wird in der Brennstoffzelle verstromt. Die Energieeffizienz dieser Art Wasserstoffnutzung ist infolge des höheren Wirkungsgrades der Brennstoffzelle größer als bei der Verbrennung des Benzins im Ottomotor!

Decarbonisierung. Darunter versteht man die thermische Spaltung von Kohlenwasserstoffen in Kohlenstoff und Wasserstoff. Der Kohlenstoff (als Ruß!) soll in stillgelegte Bergwerke verbracht werden (69, S. 153). Es wäre lohnend zu untersuchen, ob sich die Pyrolyse so durchführen läßt, daß möglichst viel Fullerene oder Nanotubes anfallen. Allerdings dürften im Interesse des Klimaschutzes diese Produkte niemals in CO_2 übergehen!

Die Wasserstoffgewinnung durch die Decarbonisierung von Kohlenwasserstoffen ist energetisch viel günstiger als die Elektrolyse von Wasser!

Sollte es gelingen, die unterirdische und unterseeische CO_2 -Deponierung dauerhaft zu gestalten, was skeptisch zu beurteilen ist (25), ließe sich mit Hilfe der oben dargestellten Verfahren, beide mit Sonnenenergie durchgeführt, die noch riesige Gesamtreserve an Methan, Erdöl, Ölsanden, Ölschiefer und Kohle unter Wasserstoffgewinnung nutzen, ohne klimarelevantes Kohlenstoffdioxid zu emittieren! Trotzdem wäre diese „solarophile“ Fossil-Technik zweischneidig, denn sie würde den Übergang zu einer echten dezentralen Solartechnik wahrscheinlich stark verzögern.

4.4.3 Probleme der Wasserstoffwirtschaft

Auch bei einer weltweiten Wasserstoffwirtschaft werden unvermeidbarer Weise ständig größere Mengen Wasserstoff in die Stratosphäre gelangen. Dieser Wasserstoff würde dort zu Wasser oxidiert, das genauso ozonschädigend

wirkt, wie beim Methan bereits erläutert. Schon heute werden Schädigungen der Ozonschicht durch die Wasserdampf-Emissionen hochfliegender Flugzeuge befürchtet, und ein weiteres Wachstum des internationalen Flugverkehrs wird erwartet.

4.5 Energie-Export aus dem Sonnengürtel

Vermutlich werden im Solarzeitalter große Kapazitäten der energiewandelnden Industrie im Sonnengürtel installiert werden. Dann wäre ein großer Teil der dort gesammelten Energie zu exportieren, wofür folgende Transportformen in Frage kommen:

Wasserstoff: In Form von komprimiertem oder Flüssig-Wasserstoff; auch als Druckgas in Mikro-Glashohlkugeln (33, S. 77).

Synthesegasgemische: Sie sind durch solarthermische Umsetzung von Methan mit Wasserdampf zugänglich.

Wasserstoffverbindungen: In Form von Methan oder Ammoniak sowie der flüssigen Verbindungen Methylcyclohexan, Dekalin und Methanol sowie der festen Metallhydride, z.B Calciumhydrid, CaH_2 , und Magnesiumhydrid, MgH_2 (33, S. 80) (14, S. 346).

Metalle: Sie wären elektrolytisch oder solarthermisch zu gewinnen. Durch Elektrolyse sind beispielsweise zugänglich: Aluminium, Natrium (aus Natriumhydroxid, NaOH), Zink. Zink ließe sich außerdem relativ einfach gewinnen durch solarthermische Zersetzung (Solarpyrolyse) von Zinkoxid. Das Metall ist Bestandteil der Zink/Luft-Zelle - einer besonderen Art Brennstoffzelle, die auf Grund ihrer verschiedenen Vorteile vor allem als mobile Stromquelle intensiv untersucht und erprobt wird (46).

Gleichstrom: Die Technik der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) hat inzwischen einen so hohen Entwicklungsstand erreicht, daß über sehr weite Strecken direkt Gleichstrom anstatt Wasserstoff exportiert werden könnte (15) (11).

4.6 CO_2 -Wirtschaft

Heutzutage ein wertloses Abfallprodukt, von dem jährlich etwa 22 Milliarden Tonnen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre gehen, wird Kohlenstoffdioxid im Solarzeitalter zu einem der wertvollsten Rohstoffe:

Das CO_2 der Atmosphäre und des Meeres wird neben Biomasse-Kohlenstoff zur hauptsächlichen Kohlenstoffquelle für die Technik! Dementspre-

chend wäre industriell freigesetztes Kohlenstoffdioxid aufzufangen und zu speichern, wodurch wahrscheinlich Untergrundspeicher und Rohrleitungsnetze für CO_2 erforderlich werden.

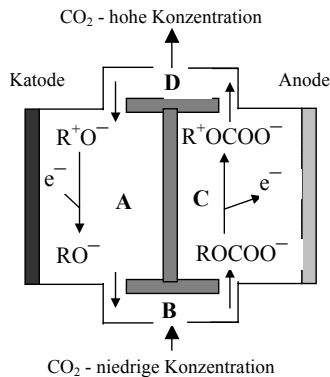
4.6.1 Stoffliche Nutzung von CO_2

4.6.1.1 Konzentrierung von CO_2

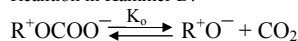
Um Kohlenstoffdioxid stofflich nutzen zu können, ist es vorher möglichst effizient zu konzentrieren - ein energieaufwendiger Prozeß und eine technische Herausforderung.

Absorption. Die Absorption von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid in einer Kalilauge-Füllkörperkolonne wurde als Laborprozeß entwickelt. Das dabei gebildete Kaliumcarbonat wurde durch Schwefelsäure zersetzt, wobei Kaliumsulfat, K_2SO_4 , und, als Zielprodukt, Kohlenstoffdioxid entstehen. Die K_2SO_4 -Lösung wurde mittels Membran-Elektrodialyse in Kalilauge, KOH , und Schwefelsäure, H_2SO_4 , zerlegt (61).

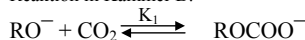
Besonders effektiv ist die Absorption aus den an CO_2 hochkonzentrierten Abgasen von Kraftwerken und Industrieanlagen, wie z.B. in einem Erdgas-kraftwerk in North-Carolina, USA. Das dort gewonnene Kohlenstoffdioxid dient in der Lebensmittelindustrie als Prozeßgas (69, S. 168).



Reaktion in Kammer D:



Reaktion in Kammer B:



Elektrochemische Konzentrierung (3, S. 94). Einen neuen Weg eröffnet die mit Gleichstrom betriebene „elektrochemische Pumpe“ (s. Abb.). Die bisher untersuchten Trägermoleküle sind Phenanthrenchinon und Tetrachlorobenzochinon

Membrantechnische Konzentrierung (69, S. 168). Technische Trends lassen die vorteilhafte Möglichkeit erkennen, atmosphärisches CO₂ durch Kunststoffmembranen zu konzentrieren.

4.6.1.2 Synthesen mit CO₂

4.6.1.2.1 Chemische Reduktion von CO₂

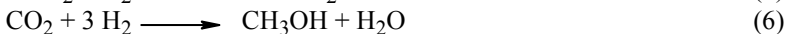
CO₂ läßt sich thermokatalytisch mit Wasserstoff zu CO reduzieren, und aus CO + H₂ ist das Produktspektrum der FISCHER-TROPSCH-Synthese zugänglich, darunter auch Methanol. Damit gewinnt der MTG-Prozeß („Methanol-To-Gasoline“, Mobil Oil Corp.) zur Gewinnung von Benzin aus Methanol für das Solarzeitalter besonderes Interesse.

Aber selbst ein derart stabiler und wohl-bekannter Stoff wie Kohlenstoffdioxid erweist sich noch als überraschende reaktiv. So wurde gezeigt, daß in der Umsetzung von CO₂ mit Wasser bei Katalyse durch Magnetit, Fe₃O₄, bei 350 °C und 10 bar nach einigen Stunden geringe Mengen von Ethanol, Acetaldehyd und Essigsäure nachweisbar waren (58, S.7)!

4.6.1.2.2 Elektrochemische Reduktion von CO₂

CO₂ läßt sich auch durch den elektrischen Gleichstrom reduzieren. Dafür zeichnen sich gegenwärtig zwei Verfahrenstypen ab.

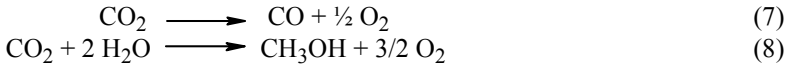
In flüssigen Elektrolyten und an katalytisch wirkenden Elektroden lassen sich zwei grundlegend wichtige Umsetzungen verwirklichen: Die Gewinnung des reaktionsfähigen Kohlenstoffmonoxids (Gl. 5) wie auch die Synthese von Methanol (Gl. 6).



Durch Variation von Elektrolyt und Elektrodenart werden auch andere Produkte zugänglich, wie Ameisensäure, Formaldehyd, Methan, Oxalsäure, Ethan, Ethen, Ethanol, Acetaldehyd und n-Propanol (3, S. 217).

Ein weites Feld für die Stoffwandlung eröffnet die Hochtemperatur-Elektrolyse mit oxidischem Festelektrolyten, meist Zirconiumdioxid, ZrO₂, bei

der nicht Wasserstoffatome, sondern die Elektronen des Gleichstroms als Reduktionsmittel fungieren:



Die Reaktion nach Gl. 8 ist formal verwandt mit der Photosynthese, insofern, als aus CO_2 und Wasser durch Zufuhr von Elektroenergie eine energiereiche Verbindung, hier Methanol, und Sauerstoff gebildet werden!

Die elektrochemische Katalyse hat gegenüber der thermischen Katalyse (die unter hohem Druck durchgeführt wird!) wesentliche Vorteile: Sie zeigt schon bei milden Temperaturen höhere Reaktionsgeschwindigkeiten als die thermischen Katalyse bei höheren Temperaturen. Das wurde sowohl bei der Methanisierung von CO_2 als auch bei der Methanolbildung gefunden (3, S. 213).

Fazit: Die elektrochemische Reduktion von atmosphärischem CO_2 könnte im Solarzeitalter zum Hauptweg für die Versorgung mit Brennstoffen werden. Dabei wächst offensichtlich dem vielfältig zugänglichen Methanol eine besondere Bedeutung zu (60) (50). Könnte sich eine Methanolwirtschaft herausbilden, Methanol zum „Erdöl des Solarzeitalters“ werden? Zusätzlich interessant wird Methanol angesichts der Aussicht, die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle zur Anwendungsreife zu bringen (35).

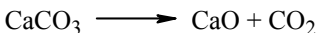
4.6.2 Carbonate

Die Verbrennung fossiler Kohlenstoff-Rohstoffe ist aber nicht die einzige Quelle für anthropogene CO_2 -Emissionen! Auch Carbonate, die in der Technik thermisch oder durch Säuren zersetzt werden, setzen CO_2 frei.

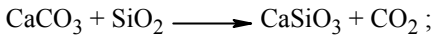
4.6.2.1 Kalkstein

Kalkstein, im wesentlichen Calciumcarbonat, CaCO_3 , ist der weltweit in der größten Menge der Natur entnommene Rohstoff: 1990 etwas über 12,5 Milliarden t! Ein großer Teil davon wird thermisch oder chemisch zersetzt, wobei die äquivalente Menge CO_2 in die Atmosphäre entweicht. Derartige Reaktionen werden u.a. in folgenden Einsatzgebieten angewendet:

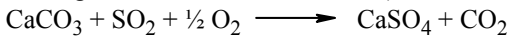
- Herstellung von Calciumoxid („Kalkbrennen“):



1. Metallurgie und Zementindustrie:



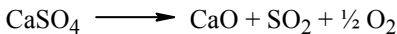
- Rauchgasentschwefelung (20, S. 96):



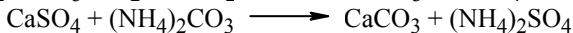
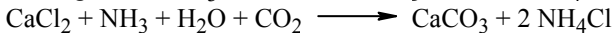
*Klimaschutzgründe diktieren: Für diese und ähnliche Anwendungen darf natürlicher Kalkstein im Solarzeitalter nicht mehr abgebaut und eingesetzt werden!*¹

Daraus resultiert eine der größten Herausforderungen für die chemische Technik des Solarzeitalters: Wie läßt sich Calciumoxid, CaO, produzieren, ohne dabei klimarelevantes Kohlenstoffdioxid freizusetzen? Hierzu einige Vorstellungen, bei denen allerdings die Verwendung der Koppelprodukte noch offen bleiben muß:

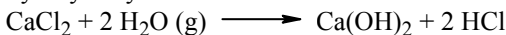
1. Thermische Spaltung von Anhydrit, CaSO₄, oder Gips im Sonnenofen bei etwa 1300 °C:



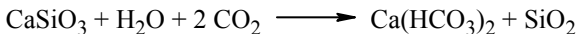
2. Fällung von CaCO₃ aus CaCl₂-Lösungen oder CaSO₄-Suspensionen:



3. Pyrohydrolyse von Calciumchlorid:

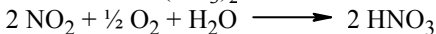
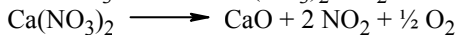
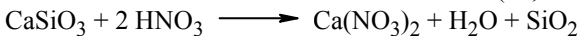


4. Hydrothermal-Aufschluß von Calciumsilicaten oder -titanaten mit Kohlensäure:



Diese in der Natur ablaufende Umsetzung mit Calciumsilicaten ist es, nach der atmosphärisches CO₂ hauptsächlich gebunden wird, wobei dieser Prozeß mit Mikro-organismen bis zu 1000mal schneller abläuft als im sterilen Fall (45, S. 111).

5. Aufschluß von Calciumsilicaten mit Salpetersäure, hergestellt nach einem modernisierten BIRKELAND-EYDE-Verfahren (65, S. 216):



Neben den oben erwähnten anthropogenen CO₂-Quellen existiert noch eine weitere, über die kaum gesprochen wird:

Der allgegenwärtige Kalkstein in Böden, Gebirgen und von Bauten wird durch sauren Regen unter Entbindung von Kohlenstoffdioxid zersetzt!

1. Das betrifft aber nicht die Verwendung von CaO für Mörtel, denn dieser absorbiert beim Abbinden wieder CO₂ und ist darum klimaneutral!

Unter stark vereinfachenden Annahmen errechnet sich diese Menge zu etwa 2 % des gesamten anthropogenen Kohlenstoffdioxids.

4.6.2.2 Zement

Schätzungsweise 5 % des anthropogenen CO₂ stammen aus der Zementproduktion, etwa die Hälfte davon aus der thermischen Zersetzung des Kalksteins (69, S. 98) (70, S. 94), eines Bestandteils des Zement-Rohmehls. Obwohl es angesichts der Schlüsselrolle der Zementproduktion aussichtslos erscheint, diese Emissionen vermeiden zu wollen, seien doch hier einige Denkmöglichkeiten angeführt:

- Sollte sich das bisherige Verfahren als unentbehrlich erweisen, wären die Drehrohröfen voll zu kapseln und mit Absaugvorrichtungen zu versehen. Das anfallende Kohlenstoffdioxid darf aber aus Klimaschutzgründen in keiner Weise genutzt werden, sondern wäre in den Untergrund zu verpressen.
- Der Kalkstein in der Zementproduktion wäre durch einen anderen Stoff zu ersetzen. Hierfür käme zunächst Calciumoxid in Frage, das aber nicht durch Pyrolyse von natürlichem Kalkstein gewonnen werden dürfte (s. Kalkstein).
- Es darf nur noch Portlandzement aus den Rückständen des MÜLLER-KÜHNE-Verfahrens (thermische Zersetzung von Calciumsulfat zur SO₂-Gewinnung für die Schwefelsäureproduktion) hergestellt werden.
- Die Zementproduktion wird eingestellt. In diesem rigorosesten der Fälle müßte Zement durch andere Stoffe ersetzt werden, z.B. durch Kalksandstein, Stahl und Kunststoffe. Obwohl auf den ersten Blick absurd, wurde bereits mehrfach in diese Richtung gedacht: Bernal schlug schon 1950 vor, Zement seiner Energieintensität wegen durch einen anderen Baustoff zu ersetzen (5, S. 78)! Zumindest für Hochspannungsmasten wird Stahl gegenüber Beton als ökonomisch und ökologisch vorteilhafter eingeschätzt (68, S. 112). Kunststoff ist dabei, das Feld der Hochfestigkeitsbaustoffe zu erobern: In Kürze wird eine US-Firma die erste Kunststoff-Brücke der Bundesrepublik errichten.

4.6.2.3 Soda

Aus ähnlichen Gründen wie Calciumcarbonat ist auch Soda, Natriumcarbonat, Na₂CO₃·10 H₂O, kritisch zu betrachten: Soda wird zu einem großen Anteil zur Neutralisation von Säuren wie auch als Bestandteil von

Glasschmelzen verwendet, wobei stets die äquivalente Menge CO_2 emittiert wird. Daraus folgt:

Im Solarzeitalter darf Soda nur noch für solche Prozesse eingesetzt werden, bei denen dessen Zersetzung unter CO_2 -Emission ausgeschlossen ist!

Für die meisten Anwendungen läßt sich Soda durch Natriumhydroxid ersetzen, am besten gewonnen aus der solaren Membran-Elektrodialyse wäßriger Lösungen von Natriumchlorid, -sulfat oder -nitrat.

4.7 Stickstoffchemie

4.7.1 Die Ammoniaksynthese

Ammoniak, NH_3 , ist unter allen technisch synthetisierten Verbindungen die in der größten Stoffmenge (also molar gerechnet!) produzierte, übertroffen nur noch durch das Element Wasserstoff. Ammoniak wird heute fast ausschließlich nach dem HABER-BOSCH-Verfahren durch eine katalytische Hochdruckreaktion aus dem Stickstoff der Luft und Wasserstoff gewonnen. Dieser wird hergestellt in thermokatalytischen Umsetzungen zwischen Wasserdampf und kohlenstoffhaltigen Rohstoffen, überwiegend Erdöl oder Erdgas, zunehmend Kohle. Dieser Kohlenstoff und auch der aus der Prozeßwärme-Erzeugung werden als CO_2 freigesetzt.

"Die Synthese von Ammoniak ist mit einem Bedarf von etwa 1 % der Weltenergieproduktion einer der größten Einzelenergieverbraucher der industriellen Welt" (7). Die für die NH_3 -Synthese erforderliche Stickstoffentnahme aus der Atmosphäre und die entsprechende CO_2 -Emission sind heute einer der größten Eingriffe des Menschen in die Natur (70, S. 95)!

Doch Ammoniak läßt sich, selbst nach dem HABER-BOSCH-Verfahren, durchaus auch CO_2 -frei gewinnen! Das wäre auf folgendem Wege möglich:

Der Wasserstoff wird durch die solare, effiziente Hochtemperatur-Dampfphasen-Elektrolyse („HOT ELLY“ (69, S. 154) (14, S. 389)) hergestellt, der Stickstoff mittels Membrantechnik aus der Luft gewonnen.

Diese Vorstellungen sind nicht utopisch, denn:

- Auch bei der ersten Ammoniak-Synthese durch die BASF 1913 in Oppau-Ludwigshafen kam der benötigte Wasserstoff aus der Wasser-Elektrolyse.
- Seit Jahren dient Elektrolyse-Wasserstoff aus Wasserkraft in Kanada, Norwegen und Ägypten auch zur Versorgung von Ammoniak-Fabriken.

- Stickstoff läßt sich heute in einer Reinheit bis 99,5 % in mobilen Membran-Anlagen aus der Luft gewinnen. Einheiten bis 2000 m³/h sind verfügbar (64, S. 293).

4.7.2 Andere Methoden der Stickstoff-Fixierung

Neuere Versuche lassen ahnen, daß die HABER-BOSCH-Synthese nicht das Verfahren des Solarzeitalters sein wird. Dafür deuten sich vielmehr andere Wege an:

An einem Molybdän-Komplex fixierter N₂ wurde mit Wasserstoff zu NH₃ hydriert. In anderen Untersuchungen konnte unter Katalyse durch einen Wolfram(0)-Komplex Stickstoff elektrochemisch (Gleichstrom!) zu Ammoniak hydriert werden (37, S. 240).

In Anwesenheit eines Magnetit-Katalysators (Fe₃O₄) reagierte Stickstoff in Wasser bei 350 °C und 10 bar zu Ammoniak (58, S. 7). Sind so präbiotisch die Aminosäuren entstanden?

Einiges spricht dafür, daß sogar der *isolierte* FeMo-Kofaktor der Nitrogenase die Hydrierung von Stickstoff zu Ammoniak katalysieren kann (47).

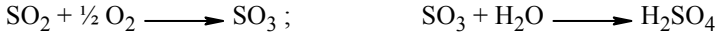
Angesichts der großen wirtschaftlichen Bedeutung von Ammoniak wäre es von unschätzbarem Wert, wenn derartig milde, naturnähere Synthesen entwickelt werden könnten. Sie würden auch die Erwägung gestatten, die „Wasserstoffwirtschaft“ durch eine „Ammoniakwirtschaft“ zu ergänzen oder gar zu ersetzen, denn gegenüber Wasserstoff bietet Ammoniak einige Vorteile:

- Es läßt sich mit viel geringerem Energieaufwand verflüssigen und speichern;
- Es läßt sich stoffwirtschaftlich breiter anwenden;
- Es ist schwerer entflammbar und durch seinen scharfen Geruch schon in Spuren wahrnehmbar und dadurch sicherer.

Es ist anzunehmen, daß in der Landwirtschaft biologische Methoden zunehmend bedeutsam werden, wie z.B. der Einsatz Stickstoff-fixierender Bakterien (*Azospirillum*) und Cyanobakterien (*Anabaena azollae*) (65, S. 143) (24, S. 130). Das würde gestatten, die für Mineraldünger unbedingt erforderliche Menge großtechnisch zu synthetisierenden Ammoniaks stark zu vermindern.

4.8 Schwefelsäure

4.8.1 Kontakt-Verfahren



Nach diesem Verfahren wird heute allgemein Schwefelsäure aus Schwefeldioxid bei einer Arbeitstemperatur von 400-600 °C hergestellt.

Kontakt-Fabriken sind sehr große Anlagen mit beträchtlichen Energieumsätzen. Bei einer Produktion von 750 t H₂SO₄/Tag fallen 25 MW thermischer Energie an, die, gewandelt über Turbine und Generator, einer elektrischen Leistung von etwa 7 MW entspricht (29, S. 933).

Im Solarzeitalter bietet es sich an, Schwefelsäure in einem Prozeß mit solarer Niedertemperatur-Wärme zu gewinnen, wofür sich sich zwei Wege abzeichnen:

4.8.2 Nitrose-Verfahren

In diesem bis etwa 1930 fast ausschließlich betriebenen Verfahren wurde Schwefeldioxid durch Sauerstoff, katalysiert durch Stickstoffoxide, in wäßriger Phase zu Schwefelsäure oxidiert („Bleikammerverfahren“). Vorteilhaft hierbei sind die niedrigen Prozeßtemperaturen von max. 80 °C.

4.8.3 Der Waterloo-Prozeß

Ein neues, solarophiles Verfahren zur Herstellung von Schwefelsäure wurde an der Universität von Waterloo, Ontario, entwickelt (58). Hierbei wird feuchtes SO₂ bei 25 °C an Aktivkohle mit Luft zu Schwefelsäure oxidiert, die von der Aktivkohle aufgenommen wird. Diese wird dann mit einem organischen Lösungsmittel extrahiert, das nach Destillation konzentrierte Schwefelsäure hinterläßt. Die Vorteile:

- Die Reaktion verläuft bei Normaltemperatur quantitativ;
- die Reaktionsgeschwindigkeit ist einige hundert Male höher als in dem konventionellen Verfahren bei 300-400 °C;
- es entstehen keinerlei Abgase.

4.9 Solar-photokatalytische Verfahren

Die Photochemie mit solaren Photonen erweist sich als äußerst vielseitig und zeigt eine Reihe von Vorteilen gegenüber der Kunstlicht-Photochemie. Beispiele:

In einem Dünnfilm-Festbettreaktor sowie in einem Parabolrinnenreaktor wurden sowohl der Abbau als auch die Synthese chemischer Verbindungen durch solare Photokatalyse untersucht. Z.B. gelang es dabei, organische Wasserschadstoffe durch Oxidation mit Luft-sauerstoff an einem TiO_2 -Katalysator vollständig zu Kohlenstoffdioxid, Wasser, Chlorwasserstoff und Stickstoff abzubauen (4).

Ein neuer Typ chemischer Verfahren ist die solare Hochtemperatur-Photochemie, bei der Reaktionen unter gleichzeitiger Einwirkung von Hochtemperaturwärme und Photonenstrom durchgeführt werden. Diese Reaktionstechnik wird als aussichtsreich eingeschätzt. Sie könne evtl. sogar Lichtbogen- und Laserverfahren ersetzen.

Beispielsweise wurden sensibilisierte Photoreaktionen der Oxygenierung, Nitrosierung und Doppelbindungsisomerisierung untersucht, die im Rohr eines senkrecht stehenden, nachgeführten Parabolrinnenkonzentrators abliefern - einem kontinuierlichen Photoreaktor.

Bei diesen Untersuchungen wurde gefunden: Chemische Reaktionen, die bei hohen Temperaturen unter hochkonzentriertem solaren Photonenfluß ablaufen, gehorchen anderen Geschwindigkeitsgesetzen als rein thermochemische Reaktionen! (26)

4.10 Ausblick auf weitere Stoffwandlungsverfahren

Für nahezu jedes heute praktizierte chemische Verfahren lassen sich solarophile Varianten bezüglich der Versorgung mit Energie und Stoffen sowie der Prozeßgestaltung auffinden, und neuartige, für das Solarzeitalter spezifische Trends sind erkennbar. Diese lassen erwarten, daß einige Verfahrensprinzipien in den Vordergrund drängen werden:

- Die *Elektrochemie*, denn durch die Photovoltaik und Thermophotovoltaik, die Brennstoffzelle und die Gleichstromgeneratoren der leistungsstarken Off-shore-Windturbinen könnte der Gleichstrom in der Industrie, vielleicht aber auch allgemein, eine weitaus größere, eventuell sogar dominierende Bedeutung erlangen.
- Die *Solar-Photochemie*, ein zukunftssträchtiges Verfahrensprinzip mit Vorteilen im Vergleich zur Kunstlicht-Photochemie und zu anderen che-

misch-technischen Verfahren.

- Die *Membrantechnologie*, die zunehmend auf energiesparende Weise sowohl Gas- als auch Flüssigphasen-Trennungen im technischen Maßstab gestattet.
- Die *Biotechnologie*, die mit ihren sanfteren und naturnäheren Prozessen die der harten Chemie verdrängen und zudem neue Möglichkeiten der Stoffversorgung eröffnen wird.

All diese Verfahren werden sich in der Stoffversorgung und in der Synthesegestaltung immer stärker orientieren auf die Prinzipien der Sanften Chemie (22) bzw Grünen Chemie (2).

5. „...das Einfache, das schwer zu machen ist.“

5.1 Neue Probleme und Fragen

Die Eingriffstiefe der Technik. Die wachsende Menschheit stößt auf immer mehr Tätigkeitsfeldern in planetare Größenordnungen vor und muß lernen, schon aus Gründen des Selbstschutzes, die sensiblen Grenzen des Planeten wahrzunehmen und zu respektieren! Das erfordert eine neue Philosophie, ein Umdenken bis in die Tiefen unserer „stillschweigenden Infrastruktur“ (10) - wahrscheinlich das Allerschwierigste auf diesem Weg.

Auch die Technik des Solarzeitalters ist nicht widerspruchsfrei. Das ist u.a. am Problem der Energiespeicherung zu erkennen: Wenn fließende Energien in planetaren Größenordnungen sehr lange Zeit gespeichert werden, z.B als Wasserstoff, könnte eine unkontrollierte Abkühlung des Bodens und der Atmosphäre erfolgen, da ja die fixierte Energie dem thermischen Gleichgewicht des Planeten entzogen ist.

Der Energieüberfluß. Im Solarzeitalter darf es nicht mehr technisches Ziel sein, einen *Überfluß* an verfügbarer Energie zu produzieren, weil das unnötig viel technische Tätigkeit und unnötig großen Ressourcenverbrauch bedeute. Jegliche Technik führt unvermeidbar zu irreversiblen Verletzungen des irdischen Lebensraumes. Das ist erst in den letzten Jahren deutlich geworden. So hat sich erwiesen, daß Aufrisse der Erdkruste und Erdbewegungen zunächst nicht sichtbare, aber darum umso folgenswerere Prozesse auslösen, nämlich

- Kationenverluste durch Auswaschung,
- Bodenerosion und
- starke Emissionen von CO_2 und SO_2 aus dem Boden, wobei *die daraus resultierenden SO_2 -Emissionen weltweit größer seien als die SO_2 -Emissionen*

sionen aller industriellen Verbrennungsprozesse zusammengenommen!
(8, S. 149) (68, S. 267)

Bezüglich der Großtechnik bewies Bernal schon vor 50 Jahren eine verblüffende Weitsicht in Hinblick auf die Kernfusion: „Eine jährliche Steigerung der Energieerzeugung um 5 Prozent - ein keineswegs schwer erreichbares Ziel - hätte nach etwas mehr als zwei Jahrhunderten zur Folge, daß fast genau so viel Wärme erzeugt wird, wie die Erdatmosphäre durch das auf die Erde fallende Sonnenlicht erhält. Die entstehende Wärme würde schon lange vorher unerträglich werden, wenn die Erde nicht mit einer Kühlvorrichtung ausgestattet werden könnte, die die Wärme ableitet.“ (5, S. 86)

5.2 Die zwei Wege

Die Menschheit hat das Jahrhundert der „Globalen Revolution“ betreten (King, A. und B. Schneider, Die Globale Revolution, Ein Bericht des Rates des Club of Rome, Spiegel Spezial 2 (1991), 130 S.). Auch in der Energiepolitik muß sie sich für ihren Weg entscheiden. „*Der Übergang zur Versorgung mit Alternativenergien ist eine Revolution im klassischen Sinne! Revolutionen sind immer vom Volk ausgegangen. Es ist dabei keine Zeit zu verlieren!*“ (41).

Für Wilhelm Ostwald war die Antwort bereits 1910 eindeutig:

„Die dauerhafte Wirtschaft muß ausschließlich auf die regelmäßige Benutzung der jährlichen Strahlungsenergie gegründet werden.“ (53, S. 19)

Ein bekanntes Buch trägt den Titel „Sonnen-Strategie - Politik ohne Alternative“ (53). Aber auch eine andere Möglichkeit ist denkbar, nämlich die pessimistische Vision:

5.2.1 Die pessimistische Vision

Energiefragen sind immer Machtfragen. Es besteht die Gefahr, daß herrschende Kreise verschiedener Länder aus Gründen des Profits und der Machterhaltung verbohrt an der fossilen Energietechnik festhalten und sie sogar weiter auszubauen suchen.

Mit verengtem Blick allein auf die Ressourcen ließe sich eine derartige Politik durchaus begründen, denn: Mit allen fossilen Ressourcen, den Ölschiefern und Teersanden, den Methanhydraten der Kaltgebiete und der Meeresböden, den Bodenschätzen Antarktikas, den Potenzen der Kerntechnik mit Schnellem Brüter, Plutoniumwirtschaft und Transmutation könnte wahr-

scheinlich noch mindestens fünfhundert Jahre Fossil-Energie produziert werden.

DOCH: Nach allem, was wir bisher wissen, mit verheerenden Folgen für die Menschheit!

Nur reiche Staaten könnten sich noch einige Zeit mit hohem und steigendem Aufwand vor den Auswirkungen des ökologischen und zivilisatorischen Niedergangs schützen.

5.2.2 Die optimistische Vision: Das Solarzeitalter

Eine dauerhafte und nachhaltige Lösung bietet allein die Nutzung der Sonne. Der Übergang in das Solarzeitalter setzt titanische, koordinierte Anstrengungen aller Länder dieser Welt voraus, und es ist aus humanistischen Erwägungen zu fordern und auf Grund der wissenschaftlich-technischen Gegebenheiten allein auch nur möglich, daß die industrialisierten Staaten dabei zunächst die größten Leistungen auch für die Entwicklungsländer erbringen.

Das Solarzeitalter würde erlauben, wesentliche Schadpotentiale des Fossil-Zeitalters zu beseitigen, nämlich:

- Förderung, Transport und Verarbeitung fossiler Energie-Rohstoffe und die damit verbundenen Umweltbelastungen und Katastrophen;
- die technisch bedingten Emissionen von klimarelevantem Kohlenstoffdioxid und Methan. Stark reduziert wären die Emissionen von Schwefeldioxid, Stickstoffoxiden und Schwermetallen sowie einer wachsenden Vielzahl organisch-chemischer Verbindungen;
- die Risiken sowie die ökologischen und finanziellen Belastungen der Kernenergie-Technik;
- den hohen Grad an Zentralisierung der Energieerzeugung wie auch der Großindustrie mit ihren riesigen globalen Stoffströmen und ihren insgesamt schnell zunehmenden Risiken.
- die wirtschaftliche und politische Abhängigkeit der meisten Länder von den Zentren monopolisierter Energierohstoff-Vorkommen - eine Hauptquelle für politische Herrschaftsansprüche, Unterdrückung, Korruption, Rüstung und Kriege.

Die Vision läßt erkennen: Der Planet ist dicht überzogen von Primärenergie-Wandlern relativ kleiner Leistung, zwar miteinander vernetzt, aber über nur kurze Ketten.

Energie steht jedem überall und jederzeit zur Verfügung, sie kann nicht mehr monopolisiert werden. Das Versagen eines Wandlers wird spielend aus-

geglichen und führt keinesfalls zu Engpässen oder gar Katastrophen. Das System ist anpassungsfähig, dadurch stabil, wenig empfindlich gegenüber Störungen, fehlertolerant und damit menschenfreundlich.

Es ist einfach, für jeden durchsichtig, demokratisch, aber nicht einfach zu verwirklichen, denn starke, zu allem entschlossene Kräfte stehen dem entgegen - *und der Ausgang ist offen!*

6. Literatur

(Abkürzungen: DLR = Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; HMI = Hahn-Meitner-Institut; FVS = Forschungsverbund Sonnenenergie)

1. Aktuell 2001, Harenberg Lexikon Verlag, Dortmund 2000, 756 S.
2. Anastas, P. T. and J. C. Warner, Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press: New York, 1998, p.30.
3. B. P. Sullivan, K. Krist, H. E. Guard (Hrsg.), Electrochemical and Electrocatalytic Reactions of Carbon Dioxide, Elsevier Amsterdam 1993, 299 S.
4. Bahnemann, D., Photocatalytic Detoxification of Polluted Waters, The Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 2, Part L, Environmental Photochemistry, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg 1999, 285-352.
5. Bernal, J. D., Welt ohne Krieg, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1960, 498 S.
6. Berner, U., Bild der Wissenschaft 11/2001, 62-65.
7. Bielawa, H. et al., Angew. Chem. 113, 6 (2001) 1093.
8. Bliefert, C., Umweltchemie, VCH Weinheim 1994, 453 S.
9. Bliefert, C., Umweltchemie, VCH Weinheim, 2. Aufl. 1997, 510 S.
10. Bohm, D und F. D. Peat, Das neue Weltbild, Naturwissenschaft, Ordnung und Kreativität, Goldmann Verlag 1990.
11. Brumshagen, H., Hochspannungs-Gleichstrom zur Übertragung elektrischer Energie zwischen Ländern und Kontinenten, Klimaverträgliche Energienutzung, 59. Physikertagung Berlin 1995, 170-202.
12. Coutts, T. J. and M. C. Fitzgerald, Scientific American, Sept. 1998, 90-95.
13. Davis, G. R., Spektrum der Wissenschaft 11/1990, 50-58.
14. Diekmann, B. und K. Heinloth, Energie, B. G. Teubner Stuttgart 1997, 456 S.
15. Eisenbeiß, G. und J. Schlaich, Bild der Wissenschaft 3/1996, 91-93.
16. Eisenbeiß, G., Spektrum der Wissenschaft, Dossier Klima und Energie, 1996, 12-16.
17. Encyclopedia Britannica CD 97, Energy Conversion.
18. Energie Daten 1999, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Bonn 1999, 72 S.
19. Essenhigh, R. H., Chemical Innovation, May 2001, 44-46.

20. Fellenberg, G., Chemie der Umweltbelastung, B. G. Teubner Stuttgart 1997, 273 S.
21. Fickett, A.P., C. W. Gellings und A. B. Lovins, Spektrum der Wissenschaft 11/1990, 60-68.
22. Fischer, H., Plädoyer für eine Sanfte Chemie – über den nachhaltigen Gebrauch der Stoffe, Reihe Sanfte Chemie, Verlag C. F. Müller; Alembik Verlag 1993, 212 S.
23. Franken, M. und Ralf Köpke, Neue Energie 7/99, 30-32.
24. Fritsche, W., Mikrobiologie, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg·Berlin 1999, 622 S.
25. Froböse, R., Krause Konzepte, Bild der Wissenschaft 5/1995, 92-93.
26. Funken, K.-H., Solarchemische Forschungen, FVS, Themen 1993/1994, DLR Köln, 85-93.
27. Gailfuß, M., Sonne, Wind & Wärme, 7/2001, 56-59.
28. Gailfuß, M., Sonne, Wind & Wärme, 8/2001, 53-55.
29. Greenwood, N. N. und A. Earnshaw, Chemie der Elemente, VCH Verlagsgesellschaft Weinheim 1990, 1707 S.
30. Hatfield, C. B., Oil back on the global agenda, Nature, 387, 8 May 1997, 121.
31. Heyer, J. Der Kreislauf des Methans, Akademie-Verlag Berlin 1990, 250 S.
32. Hoagland, W., Spektrum der Wissenschaft, Dossier Klima und Energie, 1996, 100-103.
33. Hoffmann, V. U., Wasserstoff - Energie mit Zukunft, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart-Leipzig; Verlag der Fachvereine Zürich, 1994, 172 S.
34. Jahresbericht 1999, Umweltbundesamt Berlin, 156 S.
35. Jörisen, L., H. Dohle, U. Stimming und M. Zedda, Stand und Zukunft der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle, FVS, Themen 1999/2000, HMI Berlin, 32-39.
36. Jörisen, L., J. Garche, B. Rohland, H. Dienhart, A. Heinzel und U. Büniger, Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung - eine Energieoption für die Zukunft? FVS, Themen 1998/1999, DLR Köln, 86-93.
37. Kaim, W. und B. Schwederski, Bioanorganische Chemie, B. G. Teubner Stuttgart 1995, 460 S.
38. King, A. und B. Schneider, Die Globale Revolution, Ein Bericht des Rates des Club of Rome, Spiegel Spezial 2 (1991), 130 S.
39. Klimastatement der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, der Österreichischen Gesellschaft für Meteorologie und der Schweizerischen Gesellschaft für Meteorologie vom 18. September 2001, 4 S.
40. Köhne, R. und J. Kleih, Punktkonzentrierende Systeme und Komponenten zur solarthermischen Stromerzeugung, FVS, Themen 1993/1994, DLR Köln, 65-74.
41. Kronberger, H., Info-Radio, 04.07.1999.
42. Langniß, O., J. Nitsch, J. Luther und E. Wiemken, Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung, Workshop des FVS, Fraunhofer ISE, Freiburg 1997, 7-64.

43. Ledjeff, K. und A. Heinzel, Biomassenutzung mit Brennstoffzellen, FVS, Themen 1994/1995, DLR Köln, 98-101.
44. Lehmann, H., Solare Vollversorgung für Europa, FVS, Themen 2000, HMI Berlin, 59-61.
45. Lovelock, J., Gaia: Die Erde ist ein Lebewesen, Wilhelm Heyne Verlag München 1991, 191 S.
46. Mobile Stromquellen, Spektrum der Wissenschaft 10/1996, 96-104.
47. Nachrichten aus der Chem. 48, 3 (2000) 249 ff.
48. Nitsch, J., H. Klaiß und J. Meyer, Spektrum der Wissenschaft, Dossier Klima und Energie, 1996, 104-105.
49. Nitsch, J., H. Klaiß, W. Meinecke und F. Staiß, Thermische Solarkraftwerke und solare Prozeßwärme im Mittelmeerraum, FVS, Themen 1993/1994, DLR Köln, 44-56.
50. Pasel, J., R. Peters und M. Specht, Methanol - Herstellung und Einsatz als Energieträger für Brennstoffzellen, FVS, Themen 1999/2000, HMI Berlin, 46-53.
51. Rautenbach, R., K. Welsch und R. Mellies, Deponie, EF-Verlag f. Energie u. Umwelttechnik GmbH, Berlin 1990, 397-428.
52. Roth, W., J. Schilz und A. Steinhüser, Thermoelektrische Wandler als Zusatzstromerzeuger, FVS, Themen 1996/1997, DLR Köln, 77-83.
53. Scheer, H., Sonnen-Strategie - Politik ohne Alternative, Piper Verlag München 1998, 293 S.
54. Scheffer, K., Biomasse - gespeicherte Sonnenenergie aus der Vielfalt der Pflanzenarten - Potenziale, Bereitstellung, Konversion, FVS, Themen 2000, HMI Berlin, 34-39.
55. Scholta, J. und M. Zedda, Portable Anwendungen mit PEM-Brennstoffzellen, FVS, Themen 1999/2000, HMI Berlin, 26-31.
56. Schönwiese, C.-D., Der Treibhauseffekt - Zum Stand der Klimaforschung und öffentlichen Diskussion, Klimaverträgliche Energienutzung, 59. Physikertagung Berlin 1995, 16-44.
57. Schröder, T., Energie aus alten Zechen, Berliner Zeitung 08.03.2000.
58. Severin, K., Chemical Innovation, March 2001, 44-45.
59. Solar-Gigant in Australien, Neues Deutschland 07.01.2002, 10.
60. Specht, M. und A. Bandi, Der „Methanol-Kreislauf“ - nachhaltige Bereitstellung flüssiger Kraftstoffe, FVS, Themen 1998/1999, DLR Köln, 59-65.
61. Specht, M. und A. Bandi, Herstellung von flüssigen Kraftstoffen aus atmosphärischem Kohlendioxid, FVS, Themen 1994/1995, DLR Köln, 41-46.
62. Springer Umweltlexikon, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York 2000.
63. Tamme, R., M. Böhmer und H. Bauer, Solare Methanreformierung, FVS, Themen 1994/1995, DLR Köln, 34-40.
64. Trueb, L. F., Die chemischen Elemente, S. Hirzel Verlag Stuttgart-Leipzig 1996, 416 S.

65. Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5. Edition, Vol. A 2, VCH 1985, 216 und Fifth Completely Revised Edition, Vol. A 17, VCH 1991, 471-484.
66. Umweltmagazin, Juni 1999, 60.
67. Umweltmagazin, November/Dezember 2000, 66.
68. von Weizsäcker, E. U., A. B. Lovins und L. H. Lovins; Faktor vier, Droemersch Verlagsanstalt Th. Knaur Nachf. München 1997, 352 S.
69. Wokaun, A., Erneuerbare Energien, B. G. Teubner Stuttgart-Leipzig 1999, 236 S.
70. Worldwatch Institute Report, Zur Lage der Welt 1999, Fischer Taschenbuch Verlag Frankfurt/Main 1999, 334 S.
71. Worldwatch Institute Report, Zur Lage der Welt 2001, Fischer Taschenbuch Verlag Frankfurt/Main 2001, 335 S.
72. Zittel, W., Keine signifikanten neuen Funde (Interview), Sonnenzeitung 4/2000, 24-25.
73. Zukunftstechnologie Brennstoffzelle, FVS, Themen 1999/2000, HMI Berlin, 92 S.

