

# Die Zukunft der Energieversorgung – Herausforderungen und Chancen

Nicola Armaroli\* und Vincenzo Balzani\*

**Stichwörter:**

Erneuerbare Energien · Kohlenwasserstoffe · Photochemie · Rohstoffe · Solarenergieumwandlung · Wissenschaft und Gesellschaft

## Mit dem Wandel umgehen

*„Fragen sind nie indiskret. Antworten bisweilen.“*

Oscar Wilde

Auf jede Generation warten neue Chancen und Herausforderungen. In einem begrenzten System wie der Erde können aber die Chancen, die eine Generation wahrgenommen hat, folgende Generationen vor Herausforderungen stellen. Die Ausbeutung von fossilen Brennstoffen eröffnete den reichen westlichen Ländern im 20. Jahrhundert große Möglichkeiten, doch nun muss sich die Menschheit mit den Folgen auseinandersetzen. Die Reserven an fossilen Brennstoffen gehen zur Neige,<sup>[1]</sup> und ihr Verbrauch führt zu Gesundheitsschäden und Umweltverschmutzung und erzeugt Treibhausgase, die zur Erderwärmung beitragen. Derzeit verschlingt unser wachsender Durst nach Öl nahezu 1000 Barrel pro Sekunde;<sup>[2]</sup> umgerechnet sind dies 2 Liter pro Erdbewohner und Tag (Abbildung 1).<sup>[3]</sup> Der globale Energieverbrauch beträgt zurzeit 13 Terawatt (TW), also 13 Billionen



**Abbildung 1.** Eine durchschnittliche amerikanische Familie inmitten der von ihr in einem Jahr verbrauchten Ölfässer (1970). Heutzutage ist der Konsum um ca. 40% höher.

Watt. Wie lange kann das so weitergehen?

## „Unser wachsender Durst nach Öl verschlingt derzeit fast 1000 Barrel pro Sekunde.“

Energieproblems beitragen? Werden alle Menschen den Lebensstandard von Industrienationen genießen können, ohne dass die Erde zerstört wird? Werden wir unsere Ziele in den nächsten Jahrzehnten alleine mithilfe von Wissenschaft und Technik erreichen? Sollten wir als Bürger der westlichen Welt uns neue soziale und ökonomische Verhaltensweisen zu eigen machen? Können die Einwohner armer Länder ihre Lebensqualität verbessern?

Vor vierzig Jahren machten uns die ersten Aufnahmen der Erde aus dem All unmissverständlich klar, dass unser Planet wie ein Raumschiff durch das Universum treibt. Als Passagiere dieses Raumschiffs sollten wir sehr daran interessiert sein, Lösungen für die Energiefrage zu finden. Als Eltern wollen wir die Erde für die kommenden Generationen in einem guten Zustand hinterlassen. Als Wissenschaftler sind wir verpflichtet, uns an der Diskussion über die drohende Energiekrise zu beteiligen. Als Chemiker können wir Energietechnologien verbessern und möglicherweise sogar einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, das Energieproblem auf lange Sicht zu lösen. Schließlich reisen wir als Bürger reicher Nationen in der ersten Klasse von Raumschiff Erde, und daher sollten wir uns fragen, wie wir den Passagieren helfen können, die weniger komfortabel untergebracht sind. Gewiss führt unsere konsumorientierte Lebensweise zu einer Ungleichheit. Und genau diese Ungleichheit zwischen den Bewohnern der Erde ist ihr herausragendes Charakteristikum und, langfristig gesehen, das gefährlichste Problem. Bei der Suche nach einem Weg aus der Energiekrise

[\*] Dr. N. Armaroli

Molecular Photoscience Group  
Istituto per la Sintesi Organica  
e la Fotoreattività  
Consiglio Nazionale delle Ricerche  
Via Gobetti 101, 40129 Bologna (Italien)  
Fax: (+ 39) 051-639-9844  
E-Mail: nicola.armaroli@isof.cnr.it  
Prof. Dr. V. Balzani  
Dipartimento di Chimica „G. Ciamician“  
Università di Bologna  
Via Selmi 2, 40126 Bologna (Italien)  
Fax: (+ 39) 051-209-9456  
E-Mail: vincenzo.balzani@unibo.it

Die Energieversorgung ist das zentrale Thema des 21. Jahrhunderts. Hierin liegt unsere wichtigste Aufgabe, hier müssen wir grundsätzliche Fragen beantworten und lebenswichtige Entscheidungen treffen. Können Wohlbefinden, oder gar Glück, an einem hohen Pro-Kopf-Energiekonsum gemessen werden? Sollen wir uns schrittweise vom Verbrauch fossiler Brennstoffe abkehren? Werden wir eine Energiequelle finden, die fossile Treibstoffe ersetzen kann? Kann die Chemie zur Lösung des

sollte daher die Chance nicht ungenutzt verstreichen, ein wenig von dieser Ungleichheit abzubauen und eine friedlichere Welt zu schaffen. Unsere Generation wird letztlich daran gemessen werden, wie wir die Energiekrise bewältigen.

**„Unsere Generation wird letztlich daran gemessen werden, wie wir die Energiekrise bewältigen.“**

### Ein ungesundes Wachstum in einer ungleichen Welt

*„Es gibt nur zwei Familien auf dieser Welt, wie meine Großmutter zu sagen pflegte: die, die etwas haben und die, die nichts haben.“*

Miguel de Cervantes, Don Quixote

Energie ist wohl das wichtigste, aber keinesfalls das einzige Problem der Menschheit: Auch Nahrung, Wasser, Gesundheit, Umwelt, Bildung, Bevölkerung, Krieg und Demokratie wären zu erwähnen. All diese Probleme – mit Ausnahme der Demokratie vielleicht – sind untrennbar mit der Energieversorgung verknüpft.<sup>[4]</sup> Es ist leicht einzusehen, dass ein Krankenhaus viel Energie benötigt. Schwerer tut man sich da schon mit den gigantischen Energie Mengen, die der Bau und Betrieb eines Tarnkappenbombers verschlingen. Die moderne Agrarindustrie, die westliche Konsumenten mit Nahrung und Delikatessen jedweder Art verwöhnt, zählt zu den größten Energieverbrauchern. Beispielsweise muss für 1 kg Rindfleisch die Energie von 7 Litern Öl aufgewendet werden. Überspitzt formuliert nutzt die moderne industrielle Landwirtschaft das Land, um Öl und Gas in Nahrung umzuwandeln.

Abgesehen vom Licht der Sonne ist die Erde ein geschlossenes System. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt nun, dass es in einem geschlossenen System Grenzen gibt, die nicht überschritten werden können; augenscheinlich ist dieses simple Prinzip einigen Ökonomen nicht bekannt. Wir dürfen nie vergessen, dass unser Wirt-

schaftssystem auf das natürliche Kapital des Planeten angewiesen ist (etwa auf Sauerstoff, Wasser oder die Artenvielfalt). Glücklicherweise erneuert sich ein Teil dieses Kapitals selbsttätig durch die Einwirkung von Sonnenlicht auf die Biosphäre, doch wenn wir das natürliche Kapital über seine Regenerationsfähigkeit hinaus beanspruchen, plündern wir die Schatzkammer der Erde. Im Jahr 1961 schöpften die Menschheit 70% der Kapazität der globalen Biosphäre aus, in den 1980ern stieg dieser Wert auf 100%, und 1999 erreichte er 120%.<sup>[5]</sup> Diese Statistik sagt nicht mehr und nicht weniger, als dass wir über unsere Verhältnisse leben. Darüber hinaus nutzen wir freizügig Rohstoffe, die nicht durch die Biosphäre regeneriert werden können. In diese Klasse fallen nicht nur die fossilen Brennstoffe, die beim Gebrauch unwiederbringlich verloren gehen, sondern auch Metalle.<sup>[6]</sup> Die Kapazität von Raumschiff Erde ist begrenzt. Würden alle 6.5 Milliarden Menschen den heutigen Lebensstandard von Nordamerikanern genießen, so bräuchten wir zwei weitere Ausfertigungen unseres Planeten, um sie zu versorgen.<sup>[5]</sup> Selbstverständlich trägt auch Europa maßgeblich zur Ausbeutung der Erde bei: Die terrestrische Biosphäre Europas absorbiert gerade einmal 10% der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Produktion des Kontinents.<sup>[7]</sup>

### Offene und versteckte Energiekosten

*„Der Kampf um das Dasein ist vor allem und wird in immer stärkerem Maße ein*

*Kampf um die Beherrschung und die Erzeugung von Energie.“*  
Ludwig Boltzmann

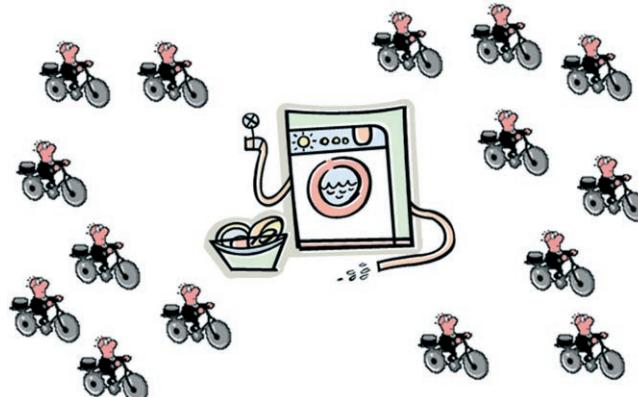
Was ist also Energie? Die Antwort fällt nicht leicht. Wir könnten über die Energie dasselbe sagen wie der heilige Augustinus über die Zeit (Bekenntnisse, XI, 14): „Was ist also die Zeit? Wenn mich niemand danach fragt, weiß ich es, wenn ich es aber einem, der mich fragt, erklären sollte, weiß ich es nicht.“

Energie ist allgegenwärtig – mal äußert sie sich als Wärme, mal als Elektrizität oder als Bewegung, die, ohne dass wir es merken, jeden Augenblick unseres Lebens gestaltet (Abbildung 2). Doch auch gebildete Bürger von Industrienationen sind sich ihrer Bedeutung kaum bewusst, und so ist

**„Unser kümmerliches Wissen über Energie ist in einem unübersehbaren Missverhältnis zu unserem hohen Verbrauch.“**

unser kümmerliches Wissen über Energie in einem unübersehbaren Missverhältnis zu unserem hohen Verbrauch. Diese Situation steht insbesondere Europa nicht gut an, das sich selbst auf dem Weg zur Wissensgesellschaft sieht.<sup>[8]</sup>

Fragen Sie irgendjemanden, wie Energie erzeugt wird, oder wie viel Energie er verbraucht. Meist werden die Antworten ebenso enttäuschend ausfallen wie auf die Frage nach dem



**Abbildung 2.** Energieleistung für Menschen in Wohlstandsländern: Um einen Fernseher anzutreiben, bedarf es der Muskelkraft von 2 Menschen, ein Waschgang mit einer energieeffizienten Waschmaschine benötigt bereits 15 Helfer, und der Start einer voll beladenen Boeing 747 wäre nur unter Mithilfe von 1.6 Millionen „Energiesklaven“ möglich.

Strompreis oder nach Möglichkeiten, wie man Strom sparen könnte. Als Lehrende sollten wir uns daher fragen: Welches Wissen über Energie vermitteln unsere Schulen und Universitäten?

In den vergangenen Jahren sind die Energiekosten spürbar gestiegen, und man ist allgemein der Ansicht, Energie sei nun ausgesprochen teuer. Doch haben wir wirklich Grund, uns zu beklagen? Der aktuelle „hohe“ Preis der wertvollsten Energiequelle, Öl, beträgt etwa 70 US-Dollar pro Barrel, also 0.44 US-Dollar pro Liter. Rohöl ist somit billiger als einige Mineralwässer im Supermarkt. Ein Liter Benzin kostet zurzeit an einer europäischen Tankstelle etwa 1.3 Euro – ein Glas Wasser im Restaurant ist deutlich teurer. Tanken ist also immer noch billiger als Trinken.<sup>[9]</sup>

Diese Energiefülle hat aber ihren Preis, und der wird nicht direkt vom einzelnen Konsumenten oder von den Energieversorgern gezahlt, sondern die gesamte Gesellschaft trägt die Folgen von sozioökonomischen Schäden und Umweltverschmutzung. So geht in Europa die ärztliche Versorgung der Verletzten von Autounfällen (Folge eines energieintensiven Verkehrsmittels) zu lasten des Staatshaushalts. Zu den versteckten Energiekosten zählen direkte negative Auswirkungen bei Entdeckung, Förderung, Transport und Umwandlung von Energiressourcen ebenso wie Langzeiteffekte wie Gesundheitsschäden durch Luftverschmutzung.<sup>[10,11]</sup> Versteckte Kosten sind vermutlich das größte Tabu im Energiegeschäft. Einige Nebenwirkungen des Energiekonsums werden kom-

menden Generationen überlassen (z.B. radioaktiver Abfall); andere, wie die riesigen Aufwendungen für Militäreinsätze zur Sicherung der Energieversorgung, belasten unsere Gesellschaft jetzt schon. Hier muss man sich nur ins Ge-

### **„Einige Nebenwirkungen des Energiekonsums werden kommenden Generationen überlassen, andere belasten unsere Gesellschaft jetzt schon.“**

dächtnis rufen, dass der erste Golfkrieg (1990–1991) ungefähr 80 Milliarden US-Dollar verschlang. Dieser immense Betrag wird aber durch die Kosten des noch laufenden zweiten Golfkriegs um ein Vielfaches übertroffen werden (Abbildung 3). Selbst im Frieden schützt eine gigantische Sicherheitsmaschinerie wichtige Energietransportwege und -anlagen (Pipelines, Seewege, Raffinerien etc.). Diese Kosten finden nicht direkt Eingang in den Ölpreis.

Europa bemüht sich nun um eine fundierte Erfassung der versteckten Energiekosten.<sup>[12]</sup> Die Europäische Union (EU) veröffentlichte kürzlich Schätzwerte für die zusätzlichen Kosten bei der Erzeugung von Elektrizität aus verschiedenen Quellen. Demnach ist Elektrizität, die in Deutschland aus Kohle erzeugt wird, mit Zusatzkosten von 0.73 Euro-Cent pro kWh belastet; der Wert für Windenergie ist zehnmal geringer.<sup>[13]</sup> Diese und ähnliche Daten machen deutlich, dass einige erneuerbare Energieformen bei Berücksichti-

gung der versteckten Kosten – auch ökonomisch gesehen – schon jetzt mit etablierten Technologien konkurrieren könnten.

Eine noch schwerwiegendere Belastung, die Energiekonsumenten der gesamten Weltbevölkerung aufbürden, ist der Eingriff in den Kohlenstoffkreislauf, der zur Erderwärmung führt. Die Kohlenstoffmenge von ungefähr 7 Gt pro Jahr, die wir in die Luft entlassen erscheint zwar klein gegenüber dem natürlichen Austausch zwischen Biosphäre und Atmosphäre (ca. 200 Gt pro Jahr), sie reicht jedoch auf lange Sicht aus, um die CO<sub>2</sub>-Konzentration stetig zu steigern (um 30% seit der industriellen Revolution). Dadurch verändert sich die Strahlungsbilanz der Erde, und zusätzlich zu den natürlichen Klimaschwankungen werden auch unnatürliche Veränderungen ausgelöst.<sup>[14]</sup> Die wahrscheinlichsten Szenarien sehen immer häufigere Wetterextreme – starke Wirbelstürme, Dürren, schwere Niederschläge und Hitzeperioden. Am härtesten treffen diese „externen“ Effekte naturgemäß die sozial Schwachen, wie die Nachwirkungen des Hurrikans Katrina in New Orleans gezeigt haben. Anders ausgedrückt: Die reichen Energiekonsumenten verursachen einen Schaden, unter dem vor allem die Armen zu leiden haben.

### **Energie und Lebensqualität**

*„Man bekommt nie genug von dem, was man nicht braucht, um glücklich zu sein.“*

Eric Hoffer

Energie ist in jeder Ware enthalten, und sie liegt jeder Dienstleistung zu grunde. Deshalb steigert sie den Lebensstandard. Weil mehr Energie mehr Waren erzeugen und mehr Dienstleistungen ermöglichen sollte, könnte man meinen, dass das Wohlbefinden mit wachsendem Energiekonsum automatisch zunimmt. Dies stimmt aber nicht so ganz: Die Lebensqualität ist zwar während des Aufstiegs eines Wirtschaftsraums streng mit dem Energiekonsum verknüpft, doch nach dieser Phase, in industrialisierten Nationen, besteht praktisch kein Zusammenhang mehr.<sup>[11]</sup> Erreicht der Pro-Kopf-Energiever-



**Abbildung 3.** Die „strategische Energieellipse“: Im Gebiet zwischen der Arabischen Halbinsel und Westsibirien lagern ungefähr 70% der bekannten Öl- und Gasreserven.

**„In industrialisierten Ländern besteht praktisch kein Zusammenhang mehr zwischen Lebensqualität und Energiekonsum.“**

braucht das Äquivalent von 2.6 Tonnen Öl pro Jahr (ton of oil equivalents, toe), so erfolgt keine weitere Verbesserung. Dagegen verläuft der übermäßige Konsum von Energie und Nahrung exakt parallel. Die Nation mit dem höchsten Anteil an übergewichtigen oder fettstüchtigen Menschen (USA: 130 Millionen, entsprechend 64 %) ist auch diejenige mit dem höchsten Pro-Kopf-Energieverbrauch (8 toe). Ein Amerikaner konsumiert soviel Energie wie 2 Europäer, 10 Chinesen, 20 Inder oder 30 Afrikaner.<sup>[11]</sup> Kalorien sind aus biologischer wie aus sozialer Sicht nur so lange gesund, wie sie in genau der richtigen Menge aufgenommen werden: gerade „genug“, aber nicht „zuviel“.<sup>[15]</sup> Die Energieaufnahme oberhalb einer Schwelle verringert die Effizienz einer Person (Fettleibigkeit) oder einer Gemeinschaft (Verkehrsstaus), sie erzeugt zusätzlichen Müll, treibt die Behandlungskosten und verstärkt nicht zuletzt die Ungleichheit.

Als in einer Samstagnacht im September 2003 in ganz Italien die Lichter ausgingen, schlugen die meisten Politiker und Ökonomen, wie nach jedem größeren Stromausfall, als Lösung den Bau neuer Kraftwerke vor – obwohl zum Zeitpunkt des Stromausfalls weniger als 30 % der nationalen Produktionskapazität ausgelastet waren. Statt die Energieversorgung auszubauen, sollten Industrienationen angesichts einer „Energiekrise“ besser den Energiebedarf reduzieren. Die reichen Länder könnten ihren Energieverbrauch problemlos um 25 % senken, ohne dass die Bevölkerung in irgendeiner Hinsicht Verzicht üben müsste.<sup>[16]</sup>

**„Statt die Energieversorgung auszubauen, sollten Industrienationen angesichts einer ‚Energiekrise‘ besser den Energiebedarf reduzieren.“**

Da eine erhebliche Energiemenge in die Herstellung industrieller Produkte fließt, sollte viel Energie einzusparen sein, wenn man auf langlebige Produkte setzt. Leider widerspricht dieser Vorschlag dem Mantra vom immerwährenden Wirtschaftswachstum.

fördert und transportiert werden. Aus einigen Anwendungen ist Öl praktisch nicht mehr wegzudenken: Wie sollte ein Jumbojet mit einem festen oder gasförmigen Treibstoff fliegen?

Der Gas-Peak wird später erwartet als der Öl-Peak. Einen Vorgeschnack erlebte Europa aber schon im Winter 2006. Der Versorgungsengpass beim russischen Erdgas zeigte, wie anfällig das Verteilungssystem dieser wertvollen Energiequelle ist. Wir sollten auch berücksichtigen, dass in Zukunft ein erheblicher Teil des russischen Gases seinen Weg nach Süden, in die aufstrebenden Länder Asiens, nehmen könnte. Dem Transportproblem kann prinzipiell durch den Bau von Flüssiggastankern und Wiedervergasungsanlagen begegnet werden. Diese Infrastruktur ist aber extrem kostspielig und unterliegt strengen Sicherheitsauflagen. Aus diesem Grund befinden sich die meisten kalifornischen Wiedervergasungsanlagen vor der mexikanischen Küste.<sup>[20]</sup> Das Unfallrisiko ist gering, aber man weiß ja nie ...

Kohle ist der schmutzigste fossile Brennstoff. Das eigentliche Problem der Kohle wird, über die kommenden 100 Jahre gesehen, nicht die Verfügbarkeit, sondern die Umweltverträglichkeit sein. Man kann sich dies vor Augen führen, wenn man bedenkt, dass ein durchschnittliches 1000-MW-Kraftwerk täglich 100 Zugladungen Kohle benötigt. Außerdem würde die Verwendung derjenigen Energiequelle, die den Treibhauseffekt am stärksten anheizt, allen Ansätzen für eine weltweite Klimapolitik zuwiderlaufen. Ansehnliche Beträge wurden in Projekte investiert, um die Auswirkungen von Kohle auf das Klima durch Kohlevergasung oder durch Kohlenstoffsequestrierung abzumildern. Diese Technik zielt darauf ab, den Austritt von CO<sub>2</sub> aus stationären Quellen (z.B. als Abgase aus Kraftwerken) in die Atmosphäre zu verhindern; es sind aber noch unzählige technische, ökonomische und politische Hindernisse zu überwinden.<sup>[21,22]</sup> Kohle hat einen weiteren ernsten Nachteil: Ihre unterirdische Förderung ist alles andere als ein Traumjob. Und die wenigsten Energiekonsumenten aus den reichen Ländern fühlen sich zu dieser Aufgabe berufen.

Es kann also kein Zweifel daran bestehen, dass wir früher oder später

## Fossile Brennstoffe

*„Kann Sonnenenergie nur in Form fossiler Brennstoffe durch die moderne Zivilisation genutzt werden?“*

*Das ist die Frage.“*

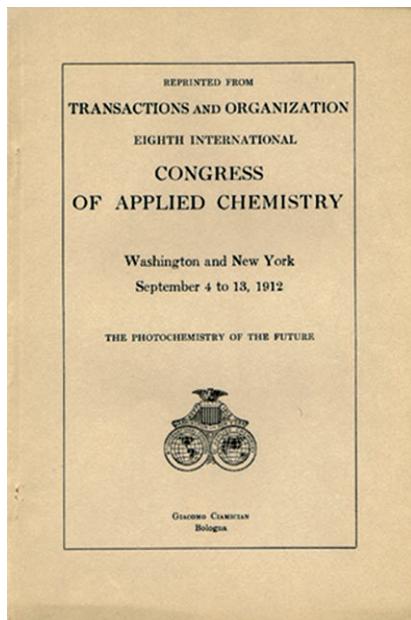
Giacomo Ciamician

Öl ist das wertvollste Luxusgut des Welthandels: Tag für Tag wechselt Öl im Wert von ungefähr sechs Millionen Dollar den Besitzer.<sup>[17]</sup> Wir konsumieren 85 Millionen Barrel Öl pro Tag, und der Bedarf steigt, vor allem wegen der zunehmenden Zahl an Automobilen in Asien. Sollten China und Indien, in denen heute nicht einmal 20 Autos auf 1000 Einwohner kommen, in einer Weise wie Europa mit Autos versorgt werden (ungefähr 700 Autos auf 1000 Einwohner), so würde diese Blechlawine 28 Millionen Barrel Öl pro Tag verbrauchen – annähernd das Dreifache der heutigen Fördermenge von Saudi-Arabien.

Unsere auf Öl versessene Zivilisation wird sich mit einem Problem auseinandersetzen müssen, das das Energieszenario einschneidend verändern wird: dem Öl-Peak.<sup>[18]</sup> Seit Anfang des 20. Jahrhunderts ist der Bedarf an Öl stetig gestiegen, aber die Versorgung konnte stets mithalten: Wir brauchten mehr Öl, und wir bekamen es problemlos. Es zeichnet sich jedoch ab, dass die Versorgung die immer höhere Nachfrage eines Tages nicht mehr wird decken können. An diesem Tag werden die Ölreserven zwar noch nicht aufgebraucht sein, aber er markiert das Ende der Ära des „leichten Öls“. Pessimisten glauben, dass der Öl-Peak bereits erreicht wäre, Optimisten<sup>[19]</sup> geben diesem Ereignis noch 30 Jahre. Doch selbst wenn die Optimisten Recht behalten, liegt der Öl-Peak in nicht allzu ferner Zukunft: Die Kinder von heute werden in 30 Jahren immer noch jung sein.

Öl ist der ideale Treibstoff, denn es ist flüssig und kann dadurch leicht ge-

von fossilen Brennstoffen auf eine, wie auch immer geartete, erneuerbare Energiequelle umschwenken müssen (Abbildung 4),<sup>[23]</sup>



**Abbildung 4.** „*The Photochemistry of the Future*“: In einer entsprechenden *Science*-Veröffentlichung (Lit. [23]) forderte Giacomo Ciamician 1912 den Umschwung von fossilen auf erneuerbare Energiequellen. Fast einhundert Jahre später ist dies notwendiger denn je.

## Kernenergie

„Kernkraftwerke sind so sicher wie Schokoladenfabriken.“

*The Economist*, 29. März 1986

(4 Wochen vor dem Reaktorunglück von Tschernobyl)

Kernenergie wird durch Kernspaltung oder Kernfusion erhalten. Während die Kernspaltung weithin zur Stromerzeugung genutzt wird, kam man bei der Kernfusion noch nicht über das Stadium von Laborexperimenten<sup>[24]</sup> hinaus (Bomben ausgenommen). Die am höchsten technisierten Nationen haben sich vor kurzem zu dem Projekt ITER zusammengeschlossen, dessen Ziel es ist, bis zum Jahr 2050 die Nutzbarkeit der Kernfusion für zivile Zwecke nachzuweisen. Ein Erfolg ist aber selbst in Anbetracht der hohen Investitionen (ungefähr 10 Milliarden Euro,

also ca. 2 Euro pro Erdbewohner) ungewiss.

Zurzeit sind weltweit 441 Kernkraftwerke am Netz. Diese Zahl wird in den nächsten Jahren vermutlich abnehmen, da die 26 in Bau befindlichen Kraftwerke kaum all die alten Reaktoren ersetzen werden, die kurz vor dem Abschalten stehen, und man vor der weiteren Planung eine Klärung der Gesetzeslage abwartet.<sup>[25]</sup> Die Weiterentwicklung der Kernspaltung zur Energiegewinnung stößt auf eine Reihe von Schwierigkeiten. Im Prinzip sind die modernen Reaktoren sicher, aber das Unglück von Tschernobyl, dessen materielle und psychologische Konsequenzen immer noch schwer abzuschätzen sind, ist nicht vergessen. Überdies haben noch nicht einmal die USA einen sicheren Weg zur Abfallbeseitigung gefunden, obwohl viel in ein nationales Endlager im Yucca Mountain investiert wurde.<sup>[26]</sup> Davon abgesehen ist es aus moralischer Sicht fraglich, ob radioaktiver Abfall, der Tausende von Jahren weiterstrahlen wird, zukünftigen Generationen überlassen werden darf. Die zivile Nutzung der Kernenergie ist unzertrennlich mit der Waffentechnologie verknüpft (wie die aktuelle Iran-Affäre einmal mehr zeigt), und eine Verbreitung von Atomwaffen ist mehr als unser zerbrechliches Raumschiff Erde vertragen kann. Kernreaktoren sind vorrangige Angriffsziele für Terroristen und extrem teuer in Aufbau, Sicherung und Demontage.

### „Die zivile Nutzung der Kernenergie ist unzertrennlich mit der Waffentechnologie verknüpft.“

Die Entwicklung der Kernenergie wurde in verschiedenerlei Hinsicht stark subventioniert. In den Vereinigten Staaten stellt beispielsweise das Price-Anderson-Gesetz einen Fundus von 200 Millionen US-Dollar für Versicherungskosten zur Verfügung, die anders nicht aufzubringen wären. Falls nötig, kommt letztlich wieder der Steuerzahler auf. Nach Meinung von Experten ist es fraglich, ob in der USA ohne diese Un-

terstützung auch nur ein einziges Kernkraftwerk gebaut worden wäre.<sup>[10]</sup>

Um wirksam zur Energieversorgung der Zukunft beizutragen, sollte die Kernenergie für einen längeren Zeitraum 10 TW Leistung bereitstellen. Zur Produktion dieser gewaltigen Energiemenge würden 10000 Kernkraftwerke mit einer Elektrizitätsleistung von einem Gigawatt (1 GW<sub>e</sub>) benötigt. Im Laufe der nächsten 50 Jahre müsste also jeden zweiten Tag irgendwo ein neuer Kernreaktor gebaut werden.<sup>[27,28]</sup> Diese Ansammlung von Kraftwerken würde die gesamten Uranreserven der Erde aber binnen 10 Jahren verschlingen. Das verbrauchte Brennmaterial müsste aufbereitet und in Brüterreaktoren genutzt werden, und diese Technologie wäre nach ihrer Entwicklung an Länder weiterzugeben, die ihren zusätzlichen Energiebedarf auf diese Weise zu decken wünschen.<sup>[29]</sup> Die üblichen Aufbereitungsprozesse sehen aber die Abtrennung von Plutonium vom radioaktiven Material vor, sodass es leichter würde, sich Plutonium für Atomwaffen zu verschaffen. Die Bush-Regierung hat vor kurzem den Kongress ersucht, 40 Milliarden US-Dollar als Startkapital für ein ehrgeiziges Programm zur Verfügung zu stellen: Die Globale Kernenergielpartnerschaft (Global Nuclear Energy Partnership, GNEP) verfolgt das Ziel einer verbesserten Wiederverwertung von Nuklearabfällen.<sup>[29]</sup> Im Erfolgsfall könnten die Vereinigten Staaten und ihre Partner Entwicklungsländern ab 2025 neue Kernbrennstoffe und kleine Kernreaktoren zur Verfügung stellen. Diese Empfängernationen würden sich im Gegenzug bereit erklären, auf eine eigene Urananreicherung zu verzichten und den verbrauchten Brennstoff zur Aufbereitung zurückzugeben. Derartige Initiativen würden die Entwicklungsländer allerdings stark von fremder Technologie abhängig machen, und ihre politische Selbständigkeit stünde ernstlich auf dem Spiel.

## Sonnenenergie

„Die Rolle des fallenden Wasser aber wird bei der Maschine des Lebens von den Sonnenstrahlen übernommen; ohne die Sonnenstrahlen kann das Rad des Lebens nicht im Gang erhalten werden und

*wir werden noch genauer erforschen müssen, auf welchen Verhältnissen und Naturgesetzen diese merkwürdige Umwandlung der Sonnenstrahlen in Nahrungsmittel und Wärme beruht.“*

Wilhelm Ostwald, Die Mühle des Lebens

Wie bereits erwähnt ist das Raumschiff Erde ein geschlossenes System. Zu unserem Glück verfügen wir aber über eine unerschöpfliche Energieversorgung: 120 000 TW an elektromagnetischer Strahlung strömen von der Sonne auf die Erdoberfläche – viel mehr, als die Menschheit benötigt. Würde man 0.16% der Landfläche der Erde mit Solarzellen bedecken, die Sonnenenergie mit 10% Effizienz umwandeln, so stünden 20 TW Leistung zur Verfügung (Abbildung 5).<sup>[30]</sup> Das wäre nahezu das Doppelte des weltweiten Konsums an fossiler Energie, und es entspräche der Leistung von 20 000 1-GW<sub>e</sub>-Kernkraftwerken.

Die Sonnenenergie birgt ein außergewöhnliches Potenzial als saubere und ökonomische Energieform. Doch sie kann nicht als solche eingesetzt werden, sondern sie muss erst eingefangen und in eine andere, anwendbare Energieform umgewandelt werden. Da die Sonneneinstrahlung diffus (ca. 170 W m<sup>-2</sup>) und nicht gleichbleibend stark ist, sollte die Umwandlung die Konzentration und Lagerung einschließen. Keines der derzeit gebräuchlichen Verfahren zur Konversion von Sonnenenergie in Wärme, Elektrizität oder

Brennstoffe kann sich bei den heutigen Handelspreisen mit fossilen Brennstoffen messen. Bezieht man aber die versteckten Kosten der Energie aus fossilen Brennstoffen mit ein, dann sieht die Sache schon ganz anders aus.

Einige Wissenschaftler sind der Ansicht, dass es in Zukunft mithilfe von Solarenergiesatelliten (solar power satellites, SPS) möglich sein wird, im Weltall Energie zu sammeln und diese in Form von Mikrowellenstrahlung zur Erde zu senden. Futuristische Anwendungen wie diese werden wir bei der folgenden Diskussion nicht berücksichtigen.

meisten Gebäude gesetzlich vorgeschrieben sind. Die weltweite Kollektorenfläche von 110 Millionen Quadratmetern (77 thermische Gigawatt, GW<sub>th</sub>, als Maß für die Wärmeerzeugungskapazität) kann fast 40 Millionen Haushalte versorgen, also 2.5% der rund 1.6 Milliarden Haushalte der Erde.<sup>[31]</sup> Etwas unerwartet ist es vielleicht, dass über 50% des Energieverbrauchs moderner Haushalte auf eine triviale Tätigkeit entfallen: das Erwärmen von Wasser zum Heizen, Waschen und Kochen. Daher würde die Verbreitung von Solarwärmewandlern die Energie- und Umweltbilanz für den Haushaltssektor schon deutlich verbessern.

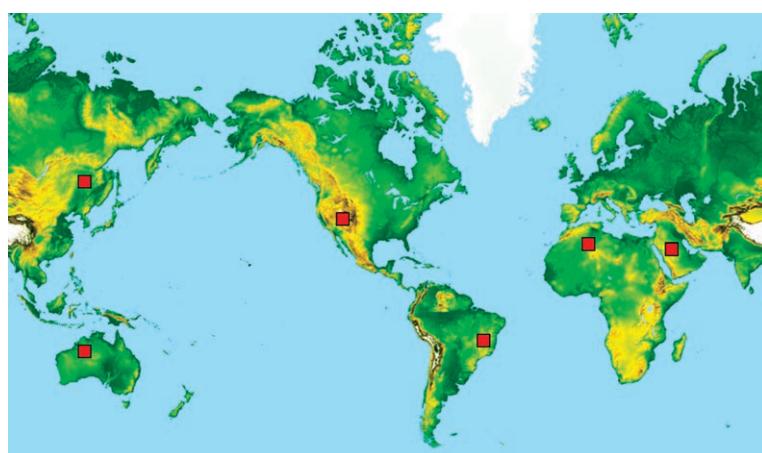
### **„Über 50% des Energieverbrauchs moderner Haushalte entfallen auf das Erwärmen von Wasser zum Heizen, Waschen und Kochen.“**

#### **Umwandlung von Sonnenenergie in Wärme**

Der direkteste Weg, Sonnenenergie zu nutzen, sind Solarwärmekollektoren, in denen eine Flüssigkeit aufgeheizt wird, um Heißwasser zur Verwendung im Haushalt oder für Heizzwecke zu erzeugen. Diese überaus einfachen Systeme sind nicht auf die Konzentration von Sonnenlicht angewiesen. Der Markt für Solarwärmekollektoren ist zwischen 2001 und 2004 um 50% gewachsen; der Anteil der EU beträgt 13%. (2004 wurden 1.6 Millionen Quadratmeter installiert).<sup>[31]</sup> Die höchste Dichte an Solarwärmesystemen findet sich in Israel (740 m<sup>2</sup> pro 1000 Einwohner, zehnmal so viel wie in Deutschland), wo Kollektoren zur Heißwassererzeugung für die

Schätzungen zufolge hat die Bereitstellung von Heißwasser mit Sonnenenergie anstelle von fossilen Brennstoffen im Jahr 2004 den CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 25 bis 30 Millionen Tonnen gemindert. Einige Großstädte, allen voran Barcelona und Oxford, haben Solarwärmesysteme für Neubauten zur Auflage gemacht, und die Ergebnisse können sich sehen lassen. Eine wichtige Verbesserung der Solarwärmewandlung bestünde im Bau von Systemen, die tagsüber Wärme sammeln, diese in Form eines Phasenübergangs speichern und auf Abruf kontrolliert freisetzen.

Mit Sonnenenergie können auch hohe Temperaturen erreicht werden, indem man die Strahlung durch Spiegel bündelt. Das konzentrierte Sonnenlicht kann dann durch Wärmeturbinen in Elektrizität umgewandelt werden oder thermochemische Prozesse wie die Methan-Reformierung und die Reduktion von Metalloxiden antreiben.<sup>[28]</sup> Nach jahrelanger Stagnation haben Hochtemperatur-Solarwärmesysteme kürzlich wieder mehr Aufmerksamkeit auf sich gezogen. In Spanien floriert der Markt, und einige Entwicklungsländer planen Projekte.<sup>[31]</sup> Gesucht werden Materialien, die unter den hohen Temperaturen und korrosiven Bedingungen von Solaröfen beständig sind.



**Abbildung 5.** Zur Erzeugung von 20 TW, dem voraussichtlichen weltweiten Leistungsbedarf in der Mitte dieses Jahrhunderts, müssten 0.16% der Landfläche (rote Quadrate) mit Solarkollektoren von 10% Effizienz bedeckt werden. (Mit freundlicher Genehmigung von Prof. Nathan Lewis, Caltech, Pasadena.)

## Solarelektrizität

Solarelektrizität wird in Photovoltaik(PV)-Zellen oder mithilfe von Hochtemperatursystemen erzeugt. Die erste Methode verspricht mit Abstand am meisten für die verbreitete Stromerzeugung. PV-Zellen eignen sich für viele Anwendungen; besonders wichtig werden sie, wenn kein Stromnetz verfügbar ist. Ungefähr 1.6 Milliarden Menschen leben ohne jede Stromversorgung, und ein Großteil dieser Armen wohnt in Gebieten, die schon aus Kostengründen nicht an ein Stromnetz angeschlossen werden. In Industrienationen können die Solarzellen auf Hausdächern (Module oder Solarbatterien) durch einen Inverter an das Stromnetz angeschlossen werden und Energie in dieses einspeisen (netzgekoppelte PV-Systeme). Zwischen 2002 und 2004 stieg die Zahl der netzgekoppelten Solar-PV-Zellen jährlich um 60%, und heute sind über 400 000 Dächer bestückt (davon 200 000 in Japan und 150 000 in Deutschland).<sup>[31]</sup>

In konventionellen PV-Zellen entstehen Elektronen und Löcher, wenn Photonen mit einer Energie oberhalb der Bandlücke eines Halbleiters absorbiert werden; ihren Energieüberschuss geben diese Elektronen in Form von Wärme ab. Die thermodynamische Obergrenze für die Energiekonversionseffizienz liegt unter diesen Bedingungen bei 31%. Diese Grenze kann prinzipiell durch Systeme der zweiten Generation überwunden werden, die p-n-Halbleiterkontakte in Tandemkonfiguration enthalten („Multi-junction-Solarzellen“).<sup>[28]</sup>

Die üblichen PV-Zellen der ersten Generation aus kristallinem Silicium arbeiten mit 5–15% Effizienz bei einer Lebensdauer von ungefähr 30 Jahren. Die Energiekosten für netzgekoppelte Systeme betragen 0.20–0.40 US-Dollar pro kWh (aus fossilen Brennstoffen gewonnener Strom kostet zwischen 0.03 (Nebenzeiten in Industrieländern) und 0.80 US-Dollar pro kWh (ländliche Gebiete)).<sup>[31]</sup> Bis sich eine Solarzelle amortisiert, vergehen etwa 2–4 Jahre, und über ihre gesamte Betriebszeit produziert sie Elektrizität, deren Wert größtenteils das Zehnfache der Produktionskosten beträgt.<sup>[28]</sup> Im Jahr 2004 waren über die ganze Welt PV-

Zellen mit einer Kapazität von 1.8 GW installiert.<sup>[31]</sup>

Wenn man die versteckten Kosten berücksichtigt, dann kann Solarelektrizität schon heute preislich mit aus fossilen und Kernbrennstoffen gewonnener Elektrizität mithalten. Man kann aber davon ausgehen, dass verstärkte Forschungsaktivitäten neue Konzepte, Bauformen, Materialien und Technologien hervorbringen werden, die die Effizienz der Zellen erhöhen und ihre Kosten reduzieren.

In den vergangenen zehn Jahren wurden Festkörper-PV-Zellen auf der Grundlage molekularer organischer Systeme entwickelt, wie sie auch in Fernsehbildschirmen verwendet werden. Ihre Energiekonversionseffizienz ist noch gering (unter 5%), doch sie sind vielversprechend im Hinblick auf die Konstruktion billiger, leichter und flexibler Solarzellen. Die Entwicklung hoch effizienter organischer Solarzellen könnte sogar zu Solarkonversionsanstrichen führen, die ein großflächiges Einfangen und Umwandeln von Sonnenenergie ermöglichen würden.<sup>[28]</sup>

Sonnenenergie kann auch durch photoelektrochemische Zellen in elektrische Leistung umgewandelt werden, in denen eine Halbleiterelektrode mit einem Elektrolyt in Kontakt steht, der ein Elektronenrelais enthält. Der stabilste, und daher am häufigsten eingesetzte, Halbleiter ist  $\text{TiO}_2$ , das jedoch wegen seiner großen Bandlücke (3.0 eV, ca. 410 nm) nur wenig Sonnenlicht absorbiert. Um dieses Problem zu lösen, wurden Farbstoffmoleküle auf dünnen Filmen gesinterter kristalliner  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel adsorbiert.<sup>[32]</sup> Die Farbstoffmoleküle injizieren bei Anregung durch Sonnenlicht Elektronen in das  $\text{TiO}_2$ , was zu einer Ladungstrennung führt. Der Reiz dieser farbstoffsensibilisierten Solarzellen liegt in den niedrigen Kosten für  $\text{TiO}_2$  und in ihrer leichten Herstellung. PV-Labormodelle erreichten bereits 11% Effizienz, größere Module sind aber noch nicht auf diesem Stand.

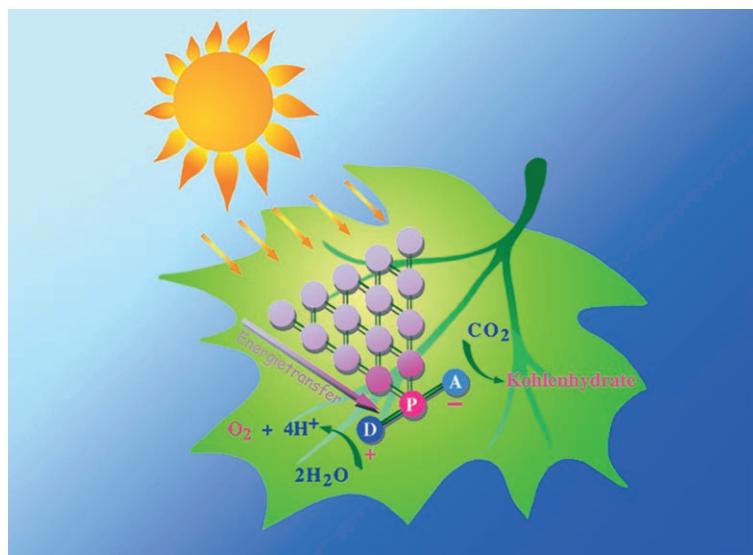
## Brennstoffe aus Sonnenenergie

In punkto Lagerung und Transport sind flüssige Brennstoffe die günstigste Energieform. Da Sonnenenergie nicht gleichmäßig verfügbar ist, sollte sie in

nutzbare chemische Brennstoffe umgewandelt werden. Solarelektrizität kann die Elektrolyse von Wasser zu  $\text{H}_2$  und  $\text{O}_2$  antreiben, dieses Verfahren ist aber sehr teuer. Daher wäre es günstiger, das Sonnenlicht direkt zur Produktion von Brennstoffen zu nutzen (z. B. von Methanol).<sup>[33]</sup>

Die *natürliche Photosynthese* erzeugt mithilfe von Sonnenlicht Brennstoffe, produziert Biomasse und – auf der geologischen Zeitskala – letztlich auch fossile Brennstoffe, die aber zurzeit ungefähr 500 000 mal so schnell verbraucht werden, wie sie neu entstehen. Sonnenlicht kann durch Photosynthese zu maximal 6.7% in chemische Energie umgewandelt werden, doch nur ein Bruchteil dieses Wertes ist realistisch. Global werden nur 0.3% der auf Landflächen einfallenden Sonnenenergie in Pflanzen gespeichert, und hiervon ist wiederum nur ein Bruchteil nutzbar.<sup>[11]</sup> Daher wäre viel gewonnen, wenn man die Effizienz der natürlichen Photosynthese verbessern könnte. Zu diesem Zweck ist es unumgänglich, die molekularen Grundlagen des Prozesses aufzuklären (Abbildung 6). Photosynthetisierende Organismen sammeln Licht mithilfe von Antennensystemen aus Pigment-Protein-Komplexen. Die eingefangene Anregungsenergie wird an Proteine im reaktiven Zentrum weitergeleitet, wo sie durch einen Elektronentransfer unter Beteiligung angeregter Zustände in ein elektrochemisches Potential umgewandelt wird. Die Quanteneffizienz dieses Ladungstrennungsschritts beträgt nahezu 100%. Die entstehenden Oxidations- und Reduktionsäquivalente werden anschließend durch thermische Elektronentransferschritte zu katalytischen Zentren transportiert, wo sie Wasser oxidieren und Brennstoffe wie Kohlenhydrate produzieren können.

Die Möglichkeit einer *künstlichen Photosynthese*<sup>[34]</sup> – und ihre Notwendigkeit – wurde durch den italienischen Chemiker Giacomo Ciamician (Abbildung 7) schon vor knapp einhundert Jahren vorhergesagt:<sup>[23]</sup> „Wo es eine reiche Vegetation gibt, kann die Photochemie den Pflanzen überlassen werden, und durch eine gezielte Kultivierung könnte man das Sonnenlicht für industrielle Zwecke nutzen. In Wüsten, die keinerlei Kultivierung zulassen, sollte die

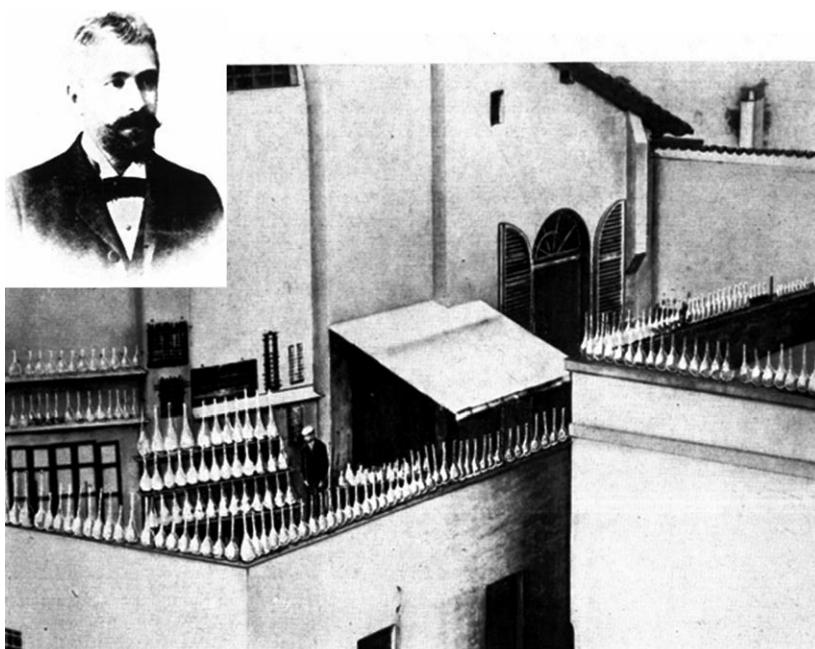


**Abbildung 6.** Die Schlüsselschritte der natürlichen Photosynthese: Sonnenlichtsammlung durch Pigmente, Energietransfer zum Reaktionszentrum, Ladungstrennung, Erzeugung von Kohlenhydraten und Sauerstoff. (Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Lella Serroni, Universität Messina.) D Donor, A Acceptor P Photosensibilisator.

das die Zivilisation nicht berühren, denn das Leben und die Zivilisation werden bestehen solange die Sonne scheint!“.

Die effiziente Erzeugung sauberer Brennstoffe durch Sonnenenergie wäre die größte Entdeckung der modernen Naturwissenschaften. Auf dem Weg zu diesem Ziel sind noch viele Aufgaben zu meistern, einige Resultate stimmen aber schon optimistisch.<sup>[35]</sup>

**„Die effiziente Erzeugung sauberer Brennstoffe durch Sonnenenergie wäre die größte Entdeckung der modernen Naturwissenschaften.“**



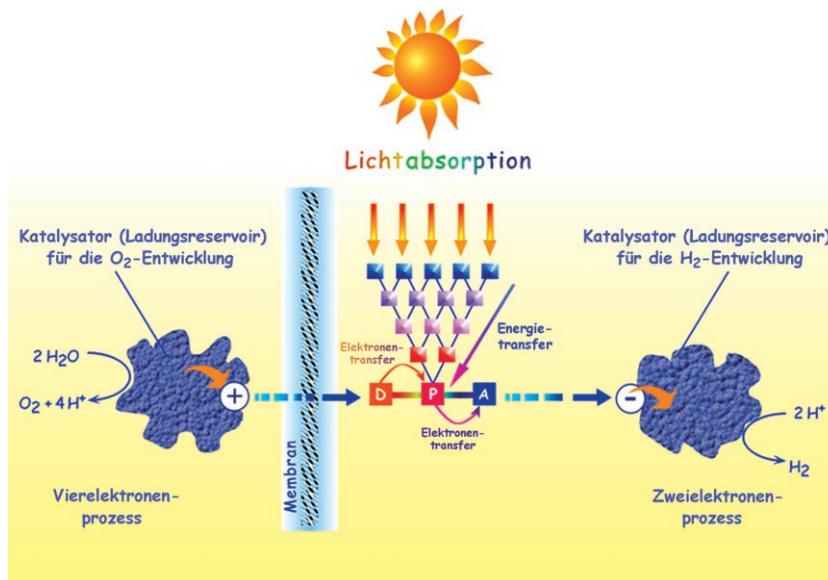
**Abbildung 7.** Giacomo Ciamician, Begründer der Photochemie und Vordenker der Energiewende. Das große Bild zeigt ihn um 1910 auf dem Dach seines Labors an der Universität Bologna beim Betrachten von Reaktionsgefäßen unter Sonnenbestrahlung.

Sonnenenergie mithilfe von Photochemie künstlich für praktische Zwecke nutzbar gemacht werden. In Trockenzo- nen werden Industriegebiete ohne Rauch und Schornsteine entstehen; Wälder von Glaskörpern werden sich über die Pflanzen erstrecken und Glasgebäude werden überall aufschießen; darin werden die

photochemischen Prozesse ablaufen, die bislang das Geheimnis der Pflanzen waren. Doch die Menschheit wird sie durch Fleiß dazu bringen, mehr Früchte zu tragen als in der Natur, denn die Natur kennt – im Unterschied zum Menschen – keine Eile. Und sollte in ferner Zukunft alle Kohle aufgebraucht sein, dann wird

Eine ökonomische und umweltverträgliche Produktion von Brennstoffen mit Sonnenenergie muss von reichlich vorhandenen, billigen Rohstoffen wie Wasser und Kohlendioxid ausgehen. Die aktuelle Forschung konzentriert sich auf zwei Reaktionen: die Spaltung von Wasser in molekularen Wasserstoff und molekularen Sauerstoff<sup>[36]</sup> und die Reduktion von Kohlendioxid zu Ethanol in wässriger Lösung unter Bildung von Disauerstoff. Am besten konstruiert man künstliche Photosynthesesysteme für die praktische Brennstoffproduktion mithilfe von Sonnenenergie, indem man sich an der molekularen und supramolekularen Organisation des natürlichen Photosyntheseprozesses orientiert: Der Lichtsammelschritt sollte zu einer Ladungstrennung führen, auf die hin ein Ladungstransport die Oxidations- und Reduktionsäquivalente an katalytische Zentren befördert, an denen Sauerstoff und Wasserstoff separat erzeugt werden (oder CO<sub>2</sub> reduziert wird). Bezuglich der einzelnen Teilschritte der künstlichen Photosynthese sind durchaus Erfolge zu vermelden, die Integration der Komponenten in einem funktionsfähigen System gelang aber noch nicht.<sup>[37]</sup>

Schwierigkeiten ergeben sich daraus, dass es sich bei der Bildung von Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser (und auch bei der Reduktion von CO<sub>2</sub>) um Mehrelektronenprozesse handelt, während die Lichtabsorption ein Einphotonenprozess ist, der zu einer Enelektronen-Ladungstrennung führt



**Abbildung 8.** Die Schlüsselschritte in der künstlichen Photosynthese: Sonnenlichtsammlung durch molekulare Antennen, Energietransfer zum Reaktionszentrum, Ladungstrennung, Wasserspaltung unter Bildung von Wasserstoff und Sauerstoff auf zwei Seiten einer Membran (abgewandelt aus Lit. [37]).

(Abbildung 8). Katalysatoren müssen diese Einphotonenereignisse zu Prozessen koppeln, die die benötigte Zahl an Redoxäquivalenten für die Brennstoffproduktion aufbringen. Insbesondere für die Erzeugung von Sauerstoff sind aber noch keine effizienten Katalysatoren verfügbar. Kürzlich wurde die Struktur eines Sauerstoff entwickelnden Zentrums der natürlichen Photosynthese aufgeklärt;<sup>[38]</sup> möglicherweise können auf der Grundlage dieser Erkenntnisse effiziente künstliche Katalysesysteme entworfen werden.

Die Untersuchung von Hybridsystemen mit natürlichen und künstlichen Komponenten erwies sich als erfolgreicher: Ein Beispiel hierfür ist die Konstruktion einer Protonenpumpe aus einer künstlichen Donor-Acceptor-Triade und ATP-Synthase, die in ein Liposom inkorporiert war.<sup>[39]</sup>

**Biomasse** ist und bleibt eine wichtige Ressource für die Energieerzeugung. In Entwicklungsländern wird sie häufig genutzt, um Energie für kleine Produktionsstätten bereitzustellen, aber auch allgemein, denn das Verbrennen von Feuerholz in Öfen führt zu schweren Gesundheitsschäden.<sup>[40]</sup> Um nennenswerte Energiemengen aus Biomasse zu erzeugen, benötigt man sehr viel kultivierbares Land und entsprechend gro-

ße Wassermengen. Legt man den momentanen Konsum zugrunde, so müssten Europa oder die USA, um nur 5% ihres Benzin- und Dieserverbrauchs zu decken, schon 20% ihrer Kulturläche zu diesem Zweck abstellen.<sup>[41]</sup>

In den Industrienationen wird feste Biomasse eingesetzt, um Wärme oder Elektrizität zu gewinnen. Flüssige Brennstoffe wie Ethanol und Biodiesel werden aus Nutzpflanzen erhalten (33 Milliarden Liter im Jahr 2004 – ungefähr 3% der 1200 Milliarden Liter Benzin, die global verbraucht wurden).<sup>[31]</sup> Ethanol wird in Brasilien aus Zuckerrohr und in den Vereinigten Staaten aus Mais erzeugt. Das brasilianische Zuckerrohr-Ethanol-System überführt 33% der geernteten Primärenergie in Ethanol;<sup>[42]</sup> im Jahr 2004 lieferte es 44% aller (Nicht-Diesel)Treibstoffe. Getankt wird reines Ethanol (E95) oder eine Ethanol/Benzin(25:75)-Mischung (E25). Über die Hälfte aller Neuwagen, die in Brasilien verkauft werden, fahren mit reinem Ethanol oder mit dem Ethanol/Benzin-Gemisch. Die Mischungen E85 und E10 (mit 85% bzw. 10% Ethanol) erfreuen sich in den USA zunehmender Beliebtheit. Das amerikanische Mais-Ethanol-System verwertet angeblich 54% der geernteten Primärenergie.<sup>[43]</sup> Das Zumischen

von Biotreibstoffen ist in manchen Ländern, auch in Indien und China, mittlerweile vorgeschrieben, und einige europäische Länder gewähren Steuerfreiheit für Biodiesel. Beispielsweise stieg in Deutschland die Biodiesel-Produktion im Jahr 2004 um 50%. Die EU hat sich für das Jahr 2010 einen Biotreibstoff-Anteil von 5.75% zum Ziel gesetzt. Schließlich ist der Nettoenergiegewinn bei der Produktion von Biodiesel aus Sojabohnen noch deutlich höher als bei der Produktion von Bioethanol aus Mais.<sup>[44]</sup>

Die wichtigsten Ziele der aktuellen Biomasseforschung sind 1) die bessere Umwandlung von Cellulose in Zucker für die Ethanolproduktion,<sup>[16,45]</sup> und 2) Vergasungstechniken, um Synthesegas, eine CO/H<sub>2</sub>-Mischung, für den Aufbau von Brennstoffen zu erhalten.<sup>[28,29]</sup>

## Windenergie, Wasserkraft und weitere erneuerbare Energieformen

„Gelobt seist Du, Herr,  
mit allen Wesen, die Du geschaffen,  
der edlen Herrin vor allem,  
Schwester Sonne,  
die uns den Tag heraufführt  
und Licht mit ihren Strahlen,  
die Schöne, spendet;  
gar prächtig in mächtigem Glanze. –  
Gelobt seist Du, Herr,  
durch Bruder Wind, –  
Gelobt seist Du, Herr,  
durch Schwester Quelle, –  
Gelobt seist Du, Herr,  
durch unsere Schwester,  
die Mutter Erde“  
Sonnengesang des heiligen Franziskus

## Windkraft

Die Stromerzeugung aus Windenergie hat eine Reihe unbestritten Vorteile: 1) garantierter Verfügbarkeit des Primär-„Treibstoffs“ – kostenfrei und zeitlich unbegrenzt; 2) keine Emissionen in die Atmosphäre oder unerwünschte Wärmeentwicklung; 3) eine vergleichsweise einfache Technik; 4) kurze Bauzeiten und eine hohe Flexibilität für Kraftwerke von einigen kW bis zu Hunderten von MW. Der Preis der Windelektrizität wird daher auf

lange Sicht sicher sinken, und diese Energieform wird zunehmend mit etablierten Verfahren konkurrieren. Nachteile ergeben sich aus den natürlichen Schwankungen, der Entfernung zwischen Windenergieparks und dem Verbraucher sowie ästhetischen und ökologischen Erwägungen. Weltweit könnten schätzungsweise 2–6 TW<sub>e</sub> durch Nutzung von Windenergie erzeugt werden.<sup>[30]</sup>

Der Windenergiemarkt konzentriert sich auf wenige Länder (Spanien, Deutschland, Indien, die USA und Italien zeigten 2004 den größten Zuwachs), aber neue, umsatzträchtige Märkte tun sich unter anderem in Russland, China und Brasilien auf. Im Jahr 2004 wurden 6000 Windkraftturbinen mit einer durchschnittlichen Größe von 1.25 MW hergestellt.<sup>[31]</sup> Nach Angaben der europäischen Windenergiegesellschaft (European Wind Energy Association, EWEA)<sup>[46]</sup> werden bis zum Ende diese Jahrzehnts in Europa Windkraftturbinen mit 75 000 MW Leistung installiert sein, was dem häuslichen Stromverbrauch von nahezu 200 Millionen Europäern entspricht. Europas großes Windenergiopotenzial könnte prinzipiell unseren gesamten Elektrizitätsbedarf decken.

## Wasserkraft

Wasserkraftturbinen sind eine der ältesten Technologien zur Stromerzeugung. Daher fällt eine Bewertung hier leichter.<sup>[16]</sup> Der schwerwiegendste Nachteil von Wasserkraftwerken ist der Eingriff in die Natur. Ihre Infrastruktur beansprucht weltweit eine Fläche von 300 000 km<sup>2</sup> (etwas so viel wie Italien) für die Produktion von nur 3 % der gesamten Primärenergie (total primary energy supply, TPES).<sup>[47]</sup> In Entwicklungsländern wurden im Laufe des 20. Jahrhunderts beim Bau großer Staudämme 40 bis 80 Millionen (armer) Menschen mit schwerwiegenden sozialen und ökonomischen Folgen zwangs umgesiedelt. Stauseen überschwemmten archäologische Stätten und einzigartige natürliche Ökosysteme, und das Leben in ablaufenden Flüssen war oft stark betroffen (z.B. im Colorado). Unlängst wurde auch nachgewiesen, dass die absterbende Vegetation in

Stauseen erhebliche Mengen an CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> freisetzt. Diesen Nachteilen stehen viele Vorteile der Wasserkraft gegenüber: 1) die niedrigsten Betriebskosten und Kraftwerke mit einer längeren Lebensdauer als bei anderen Stromerzeugungsverfahren; 2) die flexible Umwandlung der potenziellen Energie bei hohem Elektrizitätsbedarf (binnen Sekunden); 3) die zuverlässige Versorgung mit Trink- und Brauchwasser; 4) der Schutz gegen periodische Überflutungen, die in manchen Fällen schädlich sein können. Die Erde verfügt über ein riesiges Wasserkraftpotenzial, doch nur ein kleiner Teil kann unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten nachhaltig genutzt werden. Aktuelle Schätzungen beziffern die noch erschließbaren Wasserkraftressourcen auf weniger als 0.5 TW.<sup>[28]</sup>

Das Potenzial für neue Wasserkraft-Großprojekte in Europa ist zwar minimal, aber auch viele kleine Kraftwerke können zur zukünftigen Stromerzeugung beitragen. Diese Situation trifft man auch in den meisten Entwicklungsländern an: In China erhalten beispielsweise Millionen ländlicher Haushalte ihren Strom schon jetzt von kleinen Wasserkraftwerken.<sup>[16, 31]</sup>

## Weitere erneuerbare Energiequellen

Die Natur hält einige weitere Möglichkeiten zur Energiegewinnung für uns bereit. Die wohl wichtigste ist die geothermische Energie aus dem heißen Inneren unseres langsam abkühlenden Planeten. Schon vor über hundert Jahren wurde gezeigt, dass Erdwärme in bestimmten Gebieten Italiens gewonnen und in Elektrizität umgewandelt werden kann. Die Förderkapazitäten für geothermische Energie zur direkten Nutzung wurden zwischen 2000 und 2005 nahezu verdoppelt (Zunahme um 13 GW<sub>th</sub>); 13 Länder begannen in diesem Zeitraum, die Erdwärme zu nutzen.<sup>[31]</sup> Die gesamte geothermische Energie an der Erdoberfläche beträgt 12 TW (über die kontinentale Landfläche), praktisch kann aber nur ein Bruchteil davon verwertet werden, der 3–5 % des heutigen weltweiten Energiekonsums decken würde. Die Energiequelle ist daher vor allem für ausgewählte Regionen interessant.<sup>[16]</sup>

Als kleinere Energieressourcen könnten sich Temperaturgradienten in Meeren und Seen erweisen, ebenso Strömungen und Wellen. Die Gravitation zwischen Erde und Mond wird in Gezeitenkraftwerken an einigen Küsten der Nordhalbkugel genutzt, da große Wassermassen in einer vergleichsweise kurzen Zeit verschoben werden. Die Gesamtenergie aller Gezeiten- und Meeresströmungen der Welt beläuft sich auf weniger als 2 TW, in einem vielseitigen Energieportfolio sind sie aber – besonders für die regionale Versorgung – zu berücksichtigen. Ein interessantes aktuelles Beispiel stammt aus Toronto, wo kaltes Wasser aus tiefen Schichten des Ontariosees Klimaanlagen in Büros und Wohnungen versorgt.<sup>[48]</sup>

## Die Wasserstoffwirtschaft

*„Ich glaube, daß eines Tages Wasserstoff und Sauerstoff, aus denen sich Wasser zusammensetzt, allein oder zusammen verwendet, eine unerschöpfliche Quelle von Wärme und Licht bilden werden, stärker als Steinkohle. ...“*

*Das Wasser ist die Kohle der Zukunft.“*  
Jules Verne, Die geheimnisvolle Insel

Die Medien vermitteln gelegentlich den Eindruck, das Energieproblem könnte in Kürze durch Wasserstoff gelöst werden (Abbildung 9), der umsonst aus Wasser erhältlich ist, und das Thema ist sogar zum Politikum aufgestiegen.<sup>[49]</sup>

**„Die Medien vermitteln gelegentlich den Eindruck, das Energieproblem könnte in Kürze durch Wasserstoff gelöst werden.“**

Die meisten Forscher halten einen baligen Wechsel zur Wasserstoffwirtschaft aber für unwahrscheinlich oder gar unmöglich, da noch einige wissenschaftliche und technische Hindernisse überwunden werden müssen.<sup>[49–52]</sup>

Die Reaktion von molekularem Wasserstoff, H<sub>2</sub>, mit Sauerstoff liefert Wärme und Wasser. In einer Brennstoffzelle kann aus molekularem Was-



**Abbildung 9.** Ein isländischer Bus mit Brennstoffzellentechnologie. Spaltung und Rekombination von Wasser ereignen sich bildlich beim Öffnen und Schließen der Tür.

serstoff und Sauerstoff Elektrizität erzeugt werden, wobei ebenfalls Wärme und Wasser anfallen. Wenn man Öl einfach so gegen Wasserstoff als Brennstoff austauschen könnte, wären alle unsere Energie- und Umweltprobleme gelöst. Leider kommt Wasserstoff auf der Erde aber nicht in molekularer Form vor: Er kann nicht „gefördert“ werden, sondern man muss ihn unter Energieaufwand aus wasserstoffreichen Verbindungen herstellen. Daher ist Wasserstoff keine alternative Energiequelle, sondern eine sekundäre Energieform, und darin besteht das zentrale Problem der Wasserstoffwirtschaft: Wie Elektrizität muss Wasserstoff mithilfe von fossilen Brennstoffen, Kernenergie oder erneuerbaren Energiequellen erzeugt werden, bevor er als Energieträger verwendet werden kann. Gegenüber Elektrizität hat Wasserstoff aber den Vorteil der Lagerfähigkeit.

Auch wenn seine Anwendung keine Umweltprobleme verursacht, kann man Wasserstoff doch kaum als eine „saubere“ Energieform bezeichnen – er ist so „sauber“ oder „schmutzig“ wie die Primärenergie, aus der er erzeugt wird. Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen oder Kernenergie ist mit allen Problemen dieser Energiequellen behaftet. Die Umwandlung fossiler Brennstoffe in Wasserstoff in abgelegenen Regionen, um einen sauberen Brennstoff für Großstädte zu erzeugen, ist naturgemäß ineffizient, denn die Verschmutzung der Atmosphäre macht nicht an Grenzen Halt.<sup>[53]</sup>

Sauberen Wasserstoff erhält man nur durch Einsatz erneuerbarer Energiequellen. Dazu kann man prinzipiell vor der Elektrolyse von Wasser zunächst

Elektrizität erzeugen (aus Windenergie oder durch Photovoltaikzellen) oder eine direkte photochemische Wasserspaltung anstreben.

## Das Potenzial erneuerbarer Energien

*„Der einzige Weg, die Grenzen des Möglichen zu finden, ist es, dahinter zum Unmöglichen fortzuschreiten.“*

Arthur C. Clarke, *Profile der Zukunft*

In den vergangenen Jahren wurde zunehmend auf erneuerbare Energien gesetzt. Zwischen 2000 und 2004 betrug das durchschnittliche jährliche Wachstum für netzgekoppelte Solar-PV 60%, für Windenergie 28%, für Biodiesel 25%, für Solarwärme 17%, für isolierte Solar-PV 17%, für Erdwärme 13% und für Ethanol 11%.<sup>[31]</sup> Ein solcher Anstieg bei allen erneuerbaren Energieformen trägt entscheidend zur Erweiterung des Energieportfolios eines jeden Landes bei.

Solarwärme ist herkömmlichen Verfahren bei der Erzeugung von heißem Wasser ebenbürtig; in Brasilien steht Ethanol gleichberechtigt neben Benzin; Wasserkraft, geothermische Energie und einige Biomasse-Verfahren reichen an Energie aus fossilen Brennstoffen (2–4 US-Cent pro kWh) und Kernenergie heran (4–6 US-Cent pro kWh); Windenergie ist an günstigen Standorten konkurrenzfähig, und auch Sonnenenergie sollte diesen Stand in Industrienationen um 2010 erreichen (für Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung).

Während die Brennstofferzeugung mit Sonnenenergie noch nicht so weit ist, liefern Solarwärme und -elektrizität bereits beträchtliche Energiemengen. Bis 2015 will China Solarwärmekollektoren auf 230 Millionen Quadratmetern installieren – das ist das Doppelte der weltweit aktuell genutzten Fläche. Solarwärmekollektoren können große Teile des Wärmebedarfs decken, für die heute die Verbrennung von fossilen Brennstoffen und Biomasse aufkommt.

Solarelektrizität kann in Industrie- und Entwicklungsländern vorteilhaft genutzt werden. 2005 bezogen mehr als 2 Millionen Haushalte in Entwicklungsländern Strom aus eigenen Solar-

zellen. Wie wichtig Fortschritte auf diesem Gebiet sind und wie sehr der Markt gewachsen ist, zeigt sich darin, dass weltweit schätzungsweise 350 Millionen Haushalte nicht an eine zentrale Stromversorgung angeschlossen sind. Dezentrale Stromerzeugungssysteme könnten einen teuren Ausbau der Netze überflüssig machen, so wie einige Entwicklungsländer das Stadium eines festen Telefonnetzes ausließen und direkt bei der Mobiltelefonie einsetzen.

In manchen Industrienationen übersteigt die Nachfrage für netzgekoppelte PV-Systeme die Produktionskapazitäten, obwohl Solar-PV zu den am schnellsten wachsenden Industriezweigen der Welt zählt. Die Produktionskapazitäten für Module wurden in China im Jahr 2004 verdoppelt. Indiens wichtigster Solar-PV-Hersteller steigerte seine Produktion von 8 MW (2001) auf 38 MW (2004). Große Kapazitäten entstehen auch an neuen Standorten auf den Philippinen, in Thailand und in anderen Ländern. Eine substanzielle, doch nicht ausreichende Produktionssteigerung ist auch in Europa zu verzeichnen, wo es die beiden führenden Hersteller, QCell in Deutschland und Isofoton in Spanien auf 75 bzw. 53 MW brachten.<sup>[31]</sup>

Die Windenergie erlebt ebenfalls einen weltweiten Aufschwung. Wenn man die, besonders in Europa, zunehmende Zahl an Windparks an Land und auf See betrachtet, ist es kaum noch zeitgemäß, von einer „alternativen“ Energieform zu sprechen.

Auf den Dächern und in die Wände von Neubauten können Solarwärme- und PV-Systeme integriert werden. Auch eine Mischung aus kleinen Windkraftturbinen und PV-Systemen und/oder Solarwärmekollektoren ist denkbar. Betriebsfertige isolierte PV-Systeme sind erhältlich, ebenso wie Container mit Komplettsystemen aus PV-Modulen, kleinen Turbinen und leistungsfähigen Batterien. Die Industrie erneuerbarer Energien macht auf vielen Teilgebieten im Jahrestakt sichtbare Fortschritte.

Weltweit fördern mindestens 48 Länder, darunter alle 25 EU-Nationen und 14 Entwicklungsländer, die Nutzung von erneuerbaren Energien in irgendeiner Weise. So unterstützt eine europäische Solarwärmetechnologie-Organisation seit kurzem aufstrebende

Industriezweige mit hohem technologischem Potenzial.<sup>[54]</sup> Europa will bis 2010 durch erneuerbare Energien 21% des Elektrizitätsbedarfs und 12% des gesamten Energiebedarfs decken. Banken, Investoren und weltweite Großunternehmen interessieren sich verstärkt für erneuerbare Energien. Das Wachstum dieses Zweiges wird von wenigstens 150 namhaften Trägern unterstützt. Über 1.7 Millionen Arbeitsplätze waren 2004 direkt an erneuerbare Energien gekoppelt: 400000 in der brasilianischen Ethanolindustrie, 250000 in der chinesischen Solarwärmeindustrie, 130000 in Deutschland an erneuerbare Energien aller Art und 15000 in der europäischen Windenergieindustrie.<sup>[31]</sup> Detaillierte Schätzungen geben Auskunft darüber, wie viele Arbeitsplätze durch die Entwicklung verschiedener erneuerbarer Energien geschaffen werden könnten.

Vieles deutet also darauf hin, dass Mensch und Umwelt stark von der Sonnenenergie und anderen erneuerbaren Energien profitieren werden. Es liegt an der Politik, diese Entwicklung vorausschauend durch eine zuverlässige Unterstützung und die direkte Einbindung von Entscheidungsträgern vor Ort anzutreiben. In einigen Ländern werden erneuerbare Energien bereits durch vielfältige Initiativen gefördert.

Trotz des schnellen Wachstums ist der Anteil erneuerbarer Energieformen an der gesamten Versorgung sehr gering: Wenn man die Wasserkraft ausnimmt, sind es weltweit 0.5% der TPES und 2% der Elektrizität,<sup>[55]</sup> über ein Drittel davon wird in Europa produziert.<sup>[56]</sup> Die Entwicklung der erneuerbaren Energien muss forciert werden, aber dies kann nur durch wissenschaftliche Fortschritte gelingen. Die Unterstützung von Forschungsprojekten könnte binnen weniger Jahre zu effizienteren und billigeren Materialien für Solarenergiekonversionssysteme führen. Auch die Erzeugung von Brennstoffen durch künstliche Photosynthese ist ein realistisches Fernziel. Wie im April 2005 beim Basic Energy Science Workshop on Solar Energy Utilization betont wurde,<sup>[28]</sup> verschmelzen in der Forschung zur Solarenergiekonversion Physik, Chemie und Biologie mit den Nanowissenschaften. Die größten wissenschaftlichen Fortschritte haben sich stets an Schnittstellen zwischen unter-

schiedlichen Fachrichtungen ereignet. Antworten auf so grundlegende Fragen, wie sie mit dem Energieproblem ver-

### „Die Lösung des Energieproblems wird viele Denkanstöße für andere Wissenschaftsgebiete liefern.“

bunden sind, kann nur ein interdisziplinärer Ansatz geben. Und da schwierige wissenschaftliche Fragen oft bemerkenswerte Antworten hervorbringen,<sup>[57]</sup> wird die Lösung des Energieproblems viele Denkanstöße für andere Gebiete liefern.

### Antworten

*„Lieber mit Vorhersehbarem rechnen als sich von Unerwartetem überraschen lassen.“*

André Isaac

Zu Beginn dieses Essays haben wir darauf hingewiesen, dass das Energieproblem mit vielen sozialen Faktoren verknüpft ist, die wir zunächst betrachten müssen, bevor wir Entscheidungen treffen, die unser Leben und, viel stärker, das Leben unserer Kinder und Enkel verändern. Nach der obigen Diskussion können wir einige Antworten vorschlagen, die naturgemäß kaum weniger komplex sind als die eingangs aufgeworfenen Fragen.

*Können Wohlbefinden, oder gar Glück, an einem hohen Pro-Kopf-Energiekonsum gemessen werden? NEIN.* Eine Erhöhung des Energiekonsums fördert den materiellen Fortschritt, löst aber nicht die übrigen Probleme der Menschen in Industrieländern. Wir müssen unsere Energiepolitik ändern, und einsehen, dass eine Wohlstandsgesellschaft der Energiekrise nicht durch eine Steigerung der Energieproduktion begegnen kann. Glück sollten wir dagegen in immateriellen Werten und Freundschaften suchen.

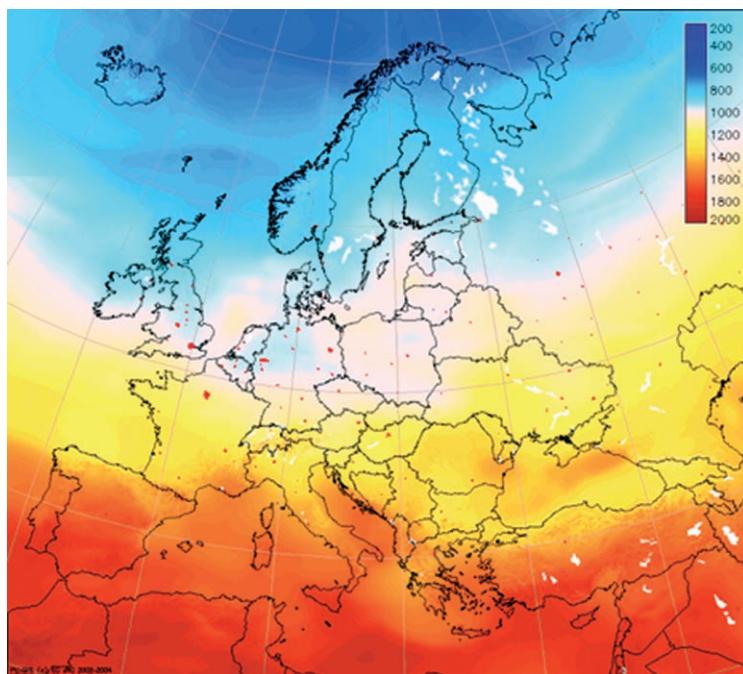
*Sollen wir uns schrittweise vom Verbrauch fossiler Brennstoffe abkehren?* JA, und zwar aus drei Gründen: 1) fossile Brennstoffe sind eine nicht erneuerbare Energiequelle, die zur Neige

geht; 2) der Einsatz fossiler Brennstoffe führt zu schweren Gesundheitsproblemen und zu einer irreversiblen Schädigung der Umwelt; 3) fossile Brennstoffe sollten als Ausgangsmaterial für die chemische Industrie zurückgehalten werden. Energie aus fossilen Brennstoffen sollte nur noch genutzt werden, um einen glatten Übergang zu neuen Energiequellen zu gewährleisten.

*Werden wir eine Energiequelle finden, die fossile Brennstoffe ersetzen kann?* JA. Hier kommen zwei Alternativen infrage: Sonnenenergie (stellvertretend für andere erneuerbare Energieformen) und Kernenergie. Diese beiden Energieformen sind nicht nur technisch, sondern auch unter sozialen Erwägungen vollkommen unterschiedlich.

Kernenergie, die, wie heute üblich, durch Kernspaltung gewonnen wird, ist weder sauber noch unerschöpflich. Darüber hinaus handelt es sich um eine hoch konzentrierte Energieform, die unter strenger technischer, politischer und militärischer Kontrolle gehalten werden muss, denn sie bedarf eines großen Kapitals, kann zu katastrophalen Unfällen führen und ergibt schwer zu entsorgenden Abfall. Ein Missbrauch von Nuklearmaterial und die Verbreitung von Atomwaffen sind weitere Risiken. Die Entwicklung der Kernenergie wird der Energieverschwendungen Vorschub leisten, den Unterschied zwischen reichen und armen Nationen vergrößern und die Weltlage weiter destabilisieren.

Sonnenenergie ist leicht erhältlich und unerschöpflich. Sie kann auf der ganzen Welt durch eine Reihe einfacher, aber noch recht teurer Technologien genutzt werden. Als wenig konzentrierte Energieform kann die Sonnenenergie umgewandelt werden, ohne dass schwere Unglücke oder Missbrauch zu befürchten sind; auch militärische Anwendungen sind unwahrscheinlich. Aus dem gleichen Grund ist ein übermäßiger Verbrauch bei Sonnenenergie unwahrscheinlich, wodurch auch die übrigen Ressourcen der Erde gespart werden. Die gleichmäßige Verteilung (Abbildung 10) über die ganze Welt wird Unterschiede verringern, denn die meisten armen Länder könnten sich ausreichend mit Sonnenenergie versorgen. Entsprechende Technologien helfen daher, die Armut abzumildern.



**Abbildung 10.** Die jährliche Sonneneinstrahlung auf eine waagrechte Oberfläche in Europa in  $\text{kWh m}^{-2}$ . Die Werte für Rom und London unterscheiden sich lediglich um den Faktor 1.6 (Daten des Forschungszentrums der Europäischen Kommission). Rote Punkte markieren Großstädte.

*Kann die Chemie zur Lösung des Energieproblems beitragen? JA. Die Konversion von Sonnenenergie in Solarwärme, Solarelektrizität oder Brennstoffe erfordert spezielle Materialien, und die Umwandlung in zwei dieser drei Energieformen schließt chemische Prozesse ein. Die Entwicklung und experimentelle Erprobung neuer Materialien kann die Leistungsfähigkeit von Lichtsammelsystemen, Energiewandlern und Energiespeichersystemen deutlich verbessern. Die Chemie kann bei der Suche nach neuen Energietechnologien den Weg weisen, daher ist die Lösung der Energiekrise ihre „große Herausforderung“<sup>[27,28,57]</sup>*

*Werden alle Menschen den Lebensstandard von Industrienationen genießen können, ohne dass die Erde zerstört wird? NEIN. Selbst wenn das Bevölkerungswachstum einmal aufhört (wovon man ausgeht), reichen die Ressourcen nicht aus, um allen Menschen den Lebensstandard zu gewährleisten, der heute in Industrienationen üblich ist. Um einen hohen Lebensstandard aufrechtzuerhalten, werden wir die wichtigsten Rohstoffe mithilfe von Sonnenenergie zurückgewinnen müssen.*

*Werden wir unsere Ziele in den kommenden Jahrzehnten alleine mithilfe von Wissenschaft und Technik erreichen? NEIN. Selbst wenn Wissenschaft und Technik die Sonnenenergie in vollem Ausmaß zugänglich machen können, sollten wir nicht vergessen, dass unser Raumschiff Erde ansonsten ein geschlossenes System ist, dessen natürliches Kapital wir schon heute über die Regenerationsfähigkeit hinaus beanspruchen. Angesichts des Bevölkerungswachstums müssen wir daher die Ressourcen so gut es geht wiederverwenden. Wir müssen einsehen, dass wir nicht nur auf der Erde leben, sondern auch ihr Schicksal teilen.<sup>[59]</sup>*

*Sollten wir als Bürger der westlichen Welt uns neue soziale und ökonomische Verhaltensweisen zu eigen machen? JA. Wir sollten unsere Lebensweise aus zwei Gründen ändern: Erstens müssen wir uns von dem Glauben an ein immerwährendes Wachstum abkehren, das dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik widerspricht. Zweitens wissen wir, dass unsere Konsumwut die Ungleichheit fördert.*

*In reichen Ländern verwischt die Grenze zwischen „genug“ und „zuviel“.*

Wir stimmen bestenfalls zu, dass Energie effizienter genutzt werden sollte. Eine höhere Effizienz hat aber nichts von Nachhaltigkeit – im Gegenteil: sie

**„In reichen Ländern verwischt die Grenze zwischen „genug“ und „zuviel“.“**

kann den Energiekonsum sogar noch erhöhen. Wenn wir beispielsweise die Energieeffizienz der Autos verbessern, werden die Verbraucher von dem hier eingesparten Geld andere Dinge erwerben, die möglicherweise noch weniger nachhaltig sind (schnellere Autos zum Beispiel). Im dritten Jahrtausend müssen wir die Probleme der Welt anders wahrnehmen und neue Denkansätze entwickeln: Wenn wir das ökologische Gleichgewicht halten wollen, müssen wir die Zulänglichkeit in den Mittelpunkt stellen, und nicht mehr die Effizienz.<sup>[60]</sup>

*Können die Einwohner armer Länder ihre Lebensqualität verbessern? JA, das können sie. Die Frage ist nur, ob wir ihnen dabei helfen. Auch in dieser Beziehung sollten wir unsere Lebensweise umstellen. Zwischen 2002 und 2030 wird der Energieverbrauch von USA und Kanada voraussichtlich um das Äquivalent von 5.7 Millionen Barrel pro Tag (million barrel of oil equivalent per day, mbpd) steigen, da die Bevölkerung um 88 Millionen Menschen zunehmen wird. Ein Bevölkerungsanstieg um 383 Millionen in Indien wird dagegen nur zu einer Steigerung um 1.4 mbpd führen, ein Bevölkerungsanstieg um 164 Millionen in China zu einer Steigerung um 1.5 mbpd.<sup>[61]</sup>*

Um den großen Unterschied zwischen Reichen und Armen beim Energieverbrauch zu verringern, sollten das Wachstum in den Wohlstandsgesellschaften gestoppt und die Energieversorgung in armen Ländern verbessert werden. Diese Forderung ist sicherlich realistischer als der Versuch, von den Reichen eine Senkung ihres Energieverbrauchs zu verlangen. Doch leider versagt diese Strategie angesichts mangelnder Ressourcen für 6.5 Milliarden Energiekonsumenten. Jeder Schritt in Richtung einer gleichmäßigeren Vertei-

lung und eines höheren Lebensstandards für die Armen muss daher mit Einschnitten bei den Reichen einhergehen.

Als Wissenschaftler können wir dazu beitragen, indem wir Entwicklungsländer darin unterstützen, eigene Forschungseinrichtungen aufzubauen, sodass sie gezielt Lösungen für ihre Probleme finden können, seien es nun die Energiressourcen, Gesundheit und Hygiene, Landwirtschaft, Ökologie oder Ausbildung. Bei der Bekämpfung extremer Armut sprechen die UN-Milleniumsentwicklungsziele einer modernen Energieversorgung eine entscheidende Rolle zu.<sup>[62]</sup>

## Schlussfolgerungen

*„Wenn unsere schwarze und nervöse Kohle-Zivilisation von einer ruhigeren Sonnenenergie-Zivilisation abgelöst würde, wäre das dem Fortschritt und dem Wohlbefinden nicht abträglich.“*

Giacomo Ciamician

Die Lösung der Energiekrise erfordert sofortiges und globales Handeln im Rahmen einer Strategie, die die Begrenztheit der Ressourcen der Erde berücksichtigt. Als erster Schritt sollte der Verbrauch von fossilen Brennstoffen drastisch eingeschränkt werden. Dies betrifft vorrangig die wohlhabenden Länder, deren maßloser Konsum enorme Reserven verschlingt, riesige Abfallmengen produziert und die Unterschiede zwischen Arm und Reich weiter steigert. Der zweite Schritt bestünde darin, unverzüglich eine Forschungsinitiative auf den Weg zu bringen, um erneuerbare Energien besser zu nutzen. Auch diese Aufgabe fällt den Industrienationen zu, in denen die wissenschaftliche Forschung konzentriert ist.<sup>[63]</sup> Die unterschiedlichen Formen erneuerbarer Energie sollten dabei auch unter Standortaspekten abgewogen werden. Mit dem technologischen Fortschritt, wird es für jede Gemeinschaft und jedes Land leichter werden, die verfügbaren Energiequellen zu erschließen und das Energieportfolio zu erweitern.

Die verantwortlichen Politiker aller Nationen sollten Energiefragen höchste Priorität einräumen. Der Weg aus der

Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen ist ein globales Problem und mit vielen Schwierigkeiten verbunden. Da abzusehen ist, dass seine Lösung längere Zeit benötigen wird, bürdet jeder weitere Aufschub den kommenden Generationen nur mehr Verantwortung auf.

Forscher müssen durch technologische Neuerungen zur Energiewende beitragen. Aber das alleine genügt nicht: Sie sind moralisch verpflichtet, die Öffentlichkeit über die Dringlichkeit und Vielschichtigkeit des Energieproblems aufzuklären. Den Entscheidungsträgern gegenüber müssen sie klarstellen, dass die Energiefrage nicht im Zeitrahmen einer Politikerkarriere gelöst werden kann. Jeder Wissen-

**„Wissenschaftler sind moralisch verpflichtet, die Öffentlichkeit über die Dringlichkeit und Vielschichtigkeit des Energieproblems aufzuklären.“**

schaftler, der die Folgen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik kennt, sollte also Ökonomen und Politikern vermitteln, was Nachhaltigkeit bedeutet: die Abkehr vom Glauben an ein immerwährendes Wirtschaftswachstum.<sup>[64]</sup>

Wir dürfen auch nicht vergessen, dass keine erneuerbare Energiequelle der Welt für das aufkommen kann, was wir mit leichter Hand verschwenden. Jede Nation, Gemeinschaft, ja jeder einzelne Bürger sollte sich darüber klar werden, was er wirklich benötigt. Der Konsum oberhalb einer solchen Grenze ist kein Zeichen von gesellschaftlichem Erfolg, sondern ein Hindernis auf dem Weg zu einer friedlichen Welt. Der Schlüssel zu unserer Zukunft liegt letztlich in dem Wort „genug“. Anfangs mag dieses Wort vielleicht schwierig auszusprechen sein, doch das Leben in einer Welt, die kein „genug“ kennt, ist schon heute gefährlich, und in wenigen Jahrzehnten wird es rundweg unmöglich sein. Wenn verantwortungsbewusste Wissenschaftler die Bedeutung des Wortes „genug“ erklären, sollte diese Situation für uns alle Menschen, auch für die Politiker, leichter verständlich werden.

Die Energiekrise ist eine Herausforderung, gleichzeitig eröffnet sie aber auch die Chance, ein neues Bewusstsein für unsere Welt und die von uns geschaffene Gesellschaft zu entwickeln. Für Wissenschaftler wird es leichter werden, aktiv für die Erhaltung der Erde einzutreten und – beim großen Unterschied zwischen Reichen und Armen beginnend – soziale und politische Missstände zu korrigieren. Wir wissen nur zu gut, dass das Zusammenleben umso schwieriger wird, je ungleicher die Menschen sind. Ronald Reagans An-

**„Die Erde liegt in unseren Händen. Wird es uns gelingen, eine weniger ungleiche Zivilisation aufzubauen und eine friedlichere Welt zu schaffen?“**

satz, die Probleme der Welt auf die Armen abzuwälzen, ist untauglich, und wenn sich nichts ändert, werden sich die Armen über kurz oder lang gegen die Reichen erheben. Wir verdrängen das Problem der Ungleichheit allzu gerne, aber auf lange Sicht muss auch dafür eine Lösung gefunden werden. Die Erde liegt in unseren Händen. Werden wir die wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen meistern? Und wird es uns gelingen, eine weniger ungleiche Zivilisation aufzubauen und eine friedlichere Welt zu schaffen? Dazu bedarf es nicht nur weiser Politiker, sondern auch verantwortungsbewusster Wissenschaftler.

Natürlich können in den kommenden Jahrzehnten durch Fortschritte in Wissenschaft und Technik neue Energiequellen erschlossen werden. So würde etwa die Entwicklung einer nutzbaren Kernfusion das Energieproblem an der Wurzel packen. Doch leider können wir uns nicht darauf verlassen. Eine Drosselung des Energiekonsums und der Einsatz erneuerbarer Energien sind dagegen gangbare Alternativen. Zwar könnte man die Ausweitung von Solarenergietechniken für unrealistisch erachten, aber spotteten nicht auch die Pferdehändler über die ersten Automobile – bevor diese ihren Pferden den Rang abließen. Frei nach dem Motto „keine Experimente“ neue Gas- und

Ölreserven auszubeuten, wird von vielen Analysten kühn als Allheilmittel für die Energiekrise vorgeschlagen. Damit erinnern sie an Dinosaurier in einer Welt, die sich stetig weiterentwickelt, oder an Informatiker, die in den 1970ern das Zeitalter der Personalcomputer nicht nahen sahen.

Zum Abschluss dieses Essays wollen wir uns fragen, welche Rolle unserem Kontinent, Europa, zukommen wird. Die EU-Länder genießen die höchste Lebensqualität, obwohl sie über die wenigsten herkömmlichen Energiereserven verfügen.<sup>[56]</sup> Die Ölförderung in der Nordsee erreichte Ende der 1990er einen Höhepunkt, ist aber im Niedergang begriffen. Norwegen und Großbritannien, die beiden größten Förderländer Europas, verfügen über lediglich 1.2% der bekannten Ölreserven der Welt. Die Gasreserven von Norwegen

## „Wenn eine Region der Welt eine Energiewende dringend nötig hat, dann ist es Europa.“

und den Niederlanden machen zusammen 2.1% der gesamten Gasvorkommen aus. Bei Kohle sieht es auch nicht besser aus: Deutschland und Polen verfügen über nur 2.3% aller förderbaren Vorkommen. Und Kernenergiebefürworter, die auf eine „unabhängige Energieversorgung“ pochen, sollten zur Kenntnis nehmen, dass nirgends in Europa Uran- oder Thoriumreserven verzeichnet sind. Wenn eine Region der Welt eine Energiewende dringend nötig hat, dann ist es Europa.

Die geringen Ressourcen schreiben Europa einen Sparkurs vor: Wir müssen unsere begrenzten Energiereserven klüger nutzen. Ein Beispiel: Um eine Einheit Licht mit einer herkömmlichen Wolframdrahtlampe zu erhalten, verbraucht ein Kraftwerk 100 Einheiten Primärenergie – 99 Einheiten werden bei der Stromerzeugung und -übertragung oder in der Glühlampe als Wärme verbraucht. Besser wären eine Kraft-Wärme-Kopplung (CHP)<sup>[65]</sup> und ein Übergang zu Festkörperbeleuchtung.<sup>[66]</sup>

Erneuerbare Energiequellen sind gleichmäßig über die ganze Welt verteilt, auch über Europa. Die Sonnen-

einstrahlung ist in Italien durchschnittlich nur 1.5-mal so hoch wie in Deutschland (Abbildung 10). Europa muss auch weiterhin eine Vorreiterrolle bei erneuerbaren Energien spielen, damit wir nicht, wie heute, Energieresourcen von anderen Kontinenten kaufen müssen, sondern bald in der Lage sein werden, Energie an die übrige Welt weiterzugeben. Die europäischen Institutionen stimmen uns optimistisch, dass dies im Rahmen von internationalen Beziehungen geschehen kann, die fairer sein werden als im bestehenden Ölzeitalter. Europa muss eine einschneidende, wenn auch abgestufte, *wirtschaftliche Strukturreform* in die Wege leiten: weg von nicht erneuerbaren Energieresourcen wie fossilen Brennstoffen, hin zur unerschöpflichen, weit weniger schädlichen Sonnenenergie. Unser Kontinent ist intellektuell, kulturell und wirtschaftlich in der Lage, diesen Um schwung einzuleiten.

Europäischen Universitäten fällt eine wichtige Rolle dabei zu, eine neue Generation verantwortungsbewusster Bürger zu formen, die sich als aktive Mitglieder einer Gesellschaft fühlen,<sup>[67]</sup> um, gemäß dem Strategiepapier aus dem Treffen des Europäischen Rats in Lissabon (2000): „die Union zum wettbewerbsfähigsten und dynamischsten wissensbasierten Wirtschaftsraum in der Welt zu machen – einem Wirtschaftsraum, der fähig ist, ein dauerhaftes Wirtschaftswachstum mit mehr und besseren Arbeitsplätzen und einem größeren sozialen Zusammenhalt zu erzielen“.<sup>[8]</sup> Eine solche Wissensgesellschaft muss auf Werten wie bewusstem Handeln, Mitgefühl und Solidarität gründen. Und wenn wir durch die geringere Konzentration der Sonnenenergie gezwungen sein werden, unser Lebensweise deutlich zu verändern, wird das nicht notwendigerweise bedeuten, dass unser Leben in einer friedlicheren Welt weniger angenehm sein wird. Sicher aber werden Milliarden heute noch Unterprivilegierter ein besseres Leben führen können.

Online veröffentlicht am 14. November 2006

Übersetzt von Dr. Volker Jacob, Mannheim

*Saudi-Arabien – Chancen und Risiken*, Wiley, Hoboken, NJ, 2006.

- [2] P. Tertzakian, *A Thousand Barrels a Second*, McGraw-Hill, New York, 2006.
- [3] R. A. Kerr, R. F. Service, *Science* **2005**, 309, 101.
- [4] Kurioserweise werden „Kriege um Energie“ gelegentlich als „Kreuzzüge für die Demokratie“ verkauft.
- [5] M. Wackernagel, N. B. Schulz, D. Deumling, A. C. Linares, M. Jenkins, V. Kapos, C. Monfreda, J. Loh, N. Myers, R. Norgaard, J. Randers, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2002**, 99, 9266–9271.
- [6] R. B. Gordon, M. Bertram, T. E. Graedel, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2006**, 103, 1209–1214.
- [7] I. A. Janssens, A. Freibauer, P. Ciais, P. Smith, G. J. Nabuurs, G. Folberth, B. Schlamadinger, R. W. A. Hutz, R. Ceulemans, E. D. Schulze, R. Valentini, A. J. Dolman, *Science* **2003**, 300, 1538–1542.
- [8] *Sondertagung des Europäischen Rats in Lissabon 2000, Schlussfolgerungen des Vorsitzes*: [http://www.europarl.europa.eu/summits/lis1\\_de.htm](http://www.europarl.europa.eu/summits/lis1_de.htm), 2000.
- [9] In Wohlstandsländern ist die Qualität des Leitungswassers hervorragend, und zudem ist es sehr billig. Dennoch bevorzugen viele Menschen Mineralwasser oder andere Getränke, die etwa das Tausendfache kosten. An diesem Beispiel zeigt sich gut der verschwenderische Umgang mit Energie: Einerseits wird viel Energie aufgewendet, um Haushalte mit Trinkwasser zu versorgen, das dann zum größten Teil in Toilettenspülungen und zum Bewässern von Gärten verwendet wird. Andererseits fließt viel Energie in die Produktion einer großen Palette von Getränken, die teilweise richtiggehend ungesund sind.
- [10] D. M. Kammen, S. Pacca, *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2004**, 29, 301–344.
- [11] V. Smil, *Energy*, Oneworld, Oxford, 2006.
- [12] Siehe zum Beispiel <http://www.externe.info/>.
- [13] EU-Kommission, *2003, External Costs – Research Results on Socio-Environmental Damages due to Electricity and Transport*: <http://www.externe.info/externpr.pdf>.
- [14] R. A. Kerr, *Science* **2006**, 311, 1698–1701.
- [15] I. Illich, *Die sogenannte Energiekrise*, Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, 1974.
- [16] V. Smil, *Energy at the Crossroads*, MIT Press, Cambridge, MA, 2003.
- [17] D. O'Rourke, S. Connolly, *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2003**, 28, 587–617.
- [18] K. S. Deffeyes, *Beyond Oil*, Hill and Wang, New York, 2005.
- [19] P. W. Huber, M. P. Mills, *The Bottomless Well*, Basic Books, New York, 2005.

- [20] P. Roberts, *The End of Oil*, Mariner Books, Boston, **2004**.
- [21] S. Anderson, R. Newell, *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2004**, *29*, 109–142.
- [22] R. H. Socolow, *Sci. Am.* **2005**, *293*, 49–55.
- [23] G. Ciamician, *Science* **1912**, *36*, 385–394. Die Zitate wurden aus dem Englischen übertragen.
- [24] W. E. Parkins, *Science* **2006**, *311*, 1380.
- [25] M. Inman, *Science* **2005**, *309*, 1170–1171.
- [26] J. Johnson, *Chem. Eng. News* **2005**, *83* (June 6), 32–34.
- [27] R. Eisenberg, D. G. Nocera, *Inorg. Chem.* **2006**, *45*, 6799–6801.
- [28] US Department of Energy Office of Science, *Basic Research Needs for Solar Energy Utilization*: [http://www.er.doe.gov/bes/reports/files/SEU\\_rpt.pdf](http://www.er.doe.gov/bes/reports/files/SEU_rpt.pdf), **2005**.
- [29] G. Hess, *Chem. Eng. News* **2006**, *84* (March 27), 34–36.
- [30] R. F. Service, *Science* **2005**, *309*, 548–551.
- [31] Worldwatch Institute, Washington, DC, **2005**, *Renewables 2005—Global Status Report*: <http://www.worldwatch.org/press/news/2005/11/06/>.
- [32] M. Grätzel, *Inorg. Chem.* **2005**, *44*, 6841–6851.
- [33] G. A. Olah, A. Goeppert, G. K. S. Pra-kash, *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy*, Wiley-VCH, Weinheim, **2006**.
- [34] *Artificial Photosynthesis* (Hrsg.: A. Collings, C. Critchley), Wiley-VCH, Weinheim, **2005**.
- [35] K. Maeda, K. Teramura, D. L. Lu, T. Takata, N. Saito, Y. Inoue, K. Domen, *Nature* **2006**, *440*, 295.
- [36] V. Balzani, L. Moggi, M. F. Manfrin, F. Bolletta, M. Gleria, *Science* **1975**, *189*, 852–856.
- [37] V. Balzani, A. Credi, M. Venturi, *Molecular Devices and Machines*, Kap. 5, Wiley-VCH, Weinheim, **2003**.
- [38] K. N. Ferreira, T. M. Iverson, K. Maghlaoui, J. Barber, S. Iwata, *Science* **2004**, *303*, 1831–1838.
- [39] G. Steinberg-Yfrach, J. L. Rigaud, E. N. Durantini, A. L. Moore, D. Gust, T. A. Moore, *Nature* **1998**, *392*, 479–482.
- [40] Millionen Einwohner armer Länder leiden an schweren Atemwegserkrankungen, die auf den Einsatz von Biomasseöfen in unzureichend gelüfteten Wohnräumen zurückzuführen sind.
- [41] Internationale Energiebehörde, *Bio-fuels for transport—An international perspective*, **2004**: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/biofuels2004.pdf>.
- [42] K. S. Kheshgi, R. C. Prince, G. Marland, *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2000**, *25*, 199–244.
- [43] Eine Neubewertung der Energiebilanz für Bioethanol: R. Hammerschlag, *Environ. Sci. Technol.* **2006**, *40*, 1744–1750.
- [44] J. Hill, E. Nelson, D. Tilman, S. Polasky, D. Tiffany, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2006**, *103*, 11206–11210.
- [45] G. Hess, *Chem. Eng. News* **2006**, *84* (March 6), 50–56.
- [46] Die europäischen Windenergiegesellschaft und die Europäische Kommission, **2003**, *Wind Energy, the facts. An Analysis of Wind Energy in the EU-25*: <http://www.ewea.org/index.php?id=91>.
- [47] Eine deutlich kleinere Fläche (150000 km<sup>2</sup>) von Photovoltaikzellen mit 10% Effizienz würde prinzipiell ausreichen, um den gesamten Weltenergiebedarf zu decken.
- [48] <http://www.enwave.com/enwave/>.
- [49] S. G. Chalk, J. Romm, M. Jacoby, *Chem. Eng. News* **2005**, *83* (August 22), 30–35.
- [50] N. Armaroli, V. Balzani, *Energia Oggi e Domani*, Bononia University Press, Bologna, **2004**.
- [51] R. Coontz, B. Hanson, *Science* **2004**, *305*, 957.
- [52] U. Bossel, *The Hydrogen „Illusion“*: <http://www.efcf.com/reports/>, **2004**.
- [53] H. Akimoto, *Science* **2003**, *302*, 1716–1719.
- [54] [http://www.esttp.org/cms/front\\_content.php](http://www.esttp.org/cms/front_content.php).
- [55] Internationale Energiebehörde, *Key World Energy Statistics*, **2005**: <http://www.iea.org/dbtw-wpd/Textbase/nppdf/free/2005/key2005.pdf>.
- [56] US Energy Information Administration Database: <http://www.eia.doe.gov/>.
- [57] D. Kennedy, C. Norman, *Science* **2005**, *309*, 75.
- [58] R. E. Smalley, *MRS Bull.* **2005**, *30*, 412–417.
- [59] R. W. Kates, *Annu. Rev. Energ. Environ.* **2001**, *26*, 1–26.
- [60] T. Princen, *The Logic of Sufficiency*, MIT Press, Cambridge, MA, **2005**.
- [61] EU-Kommission, *Anhang zum Grünbuch: Eine europäische Strategie für nachhaltige, wettbewerbsfähige und sichere Energie*, **2006**.
- [62] <http://www.un.org/millenniumgoals/>.
- [63] D. King, *Nature* **2004**, *430*, 311–316.
- [64] Ein Gutachter bemerkte kritisch, dieser Essay zeige, warum es Wissenschaftlern nicht erlaubt sein sollte, über Wirtschaft oder Politik zu schreiben: Sie wüssten ein paar Textbruchstücke, kannten aber die Melodie nicht. Wir fragen uns, welches „Lied“ den Ökonomen und Politiker durch den Kopf geht, die auf einer Steigerung des Bruttonsozialprodukts (BSP) der Industrienationen bestehen, wo doch bekannt ist, dass diese die Menschen nicht glücklicher macht (siehe dazu D. Kahneman et al., *Science* **2006**, *312*, 1908–1910). Auch begreifen sie nicht, dass ein höheres BSP für einen höheren Verbrauch von Ressourcen steht, die zumeist aus ärmeren Ländern genommen werden, und eine größere Menge an Abfall produziert, der sofort über die ganze Welt verteilt (z.B. Kohlendioxid) oder später in arme Länder abgeschoben wird (z.B. Elektronikschrott). Die massiven Umweltverschmutzungen und die damit verbundenen sozialen Unruhen in China, der „Fabrik der Welt“, sollten Grund zur Besorgnis geben.
- [65] J. Johnson, *Chem. Eng. News* **2003**, *81* (October 6), 20–23.
- [66] Siehe zum Beispiel: <http://www.olla-project.org>.
- [67] R. R. Ernst, *Angew. Chem.* **2003**, *115*, 4572–4578; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2003**, *42*, 4434–4439.