



Energie

Nova Acta Leopoldina
Band 91 Nummer 339

Vorträge
anlässlich der Jahresversammlung
vom 17. bis 20. Oktober 2003
zu Halle (Saale)

Herausgegeben von
Harald zur Hausen, Heidelberg
Vizepräsident der Akademie





Das Auditorium zur Jahresversammlung »Energie« 2003 im Tagungsgebäude Kempinski Kongress & Kultur Halle

NOVA ACTA LEOPOLDINA

Abhandlungen der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina

Im Auftrage des Präsidiums herausgegeben von

HARALD ZUR HAUSEN

Vizepräsident der Akademie

NEUE FOLGE

NUMMER 339

BAND 91

Energie

Vorträge anlässlich der Jahresversammlung
vom 17. bis 20. Oktober 2003
zu Halle (Saale)

Herausgegeben von:

HARALD ZUR HAUSEN, Heidelberg

Vizepräsident der Akademie

Mit 175 Abbildungen und 25 Tabellen



**Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle (Saale) 2004
In Kommission bei Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart**

Redaktion: Dr. Michael KAASCH und Dr. Joachim KAASCH
Fotos von der Jahresversammlung »Energie«: Jens SCHLÜTER (Halle/Saale)

Auf der Titelseite des Bandes ist das Siegel der Urkunde abgebildet, mit dem Kaiser LEOPOLD 1687 die der Akademie verliehenen Privilegien erneut bestätigt hat. Siegel und Urkunde befinden sich noch im Besitz der Leopoldina.

**Die Schriftenreihe Nova Acta Leopoldina erscheint bei der Wissenschaftlichen Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart, Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart, Bundesrepublik Deutschland.
Jedes Heft ist einzeln käuflich!**

Die Schriftenreihe wird gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie das Kultusministerium des Landes Sachsen-Anhalt.

Die Publikation wurde durch eine großzügige Spende von Frau Annemarie Kaßmann (Bonn) unterstützt.

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdruckes, der fotomechanischen Wiedergabe und der Übersetzung, vorbehalten.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen und dgl. in diesem Heft berechtigt nicht zu der Annahme, daß solche Namen ohne weiteres von jedermann benutzt werden dürfen. Vielmehr handelt es sich häufig um gesetzlich geschützte eingetragene Warenzeichen, auch wenn sie nicht eigens als solche gekennzeichnet sind.

© 2004 Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
06019 Halle (Saale), Postfach 11 05 43, Tel. (03 45) 4 72 39 34
Hausadresse: 06108 Halle (Saale), Emil-Abderhalden-Straße 37
Herausgeber: Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Harald ZUR HAUSEN, Vizepräsident der Akademie
Printed in Germany 2004
Gesamtherstellung: Elbe-Druckerei Wittenberg
ISBN 3-8047-2171-0
ISSN 0369-5034

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.

Inhalt

| | |
|---|-----|
| TER MEULEN, Volker: Vorwort | 7 |
| TREUSCH, Joachim: Energie – Problemlösung oder Problem?. | 9 |
| OESTERHELT, Dieter: Photosynthese und andere Energieumwandlungsprozesse in Zellen | 17 |
| NEUPERT, Walter: Mitochondrien: Energiewandler für die Organisation des Lebendigen | 41 |
| WERNER, Jürgen H.: Stromerzeugung mit Solarzellen – Technischer Stand und zukünftige Möglichkeiten | 65 |
| WAGNER, Hermann-Josef: Stromerzeugung aus Windenergie – Stand und Perspektiven | 101 |
| WEINREBE, Gerhard: Das Aufwindkraftwerk – Wasserkraftwerk der Wüste. | 117 |
| BRADSHAW, Alexander M., und HAMACHER, Thomas: Kernfusion: Eine nachhaltige Energiequelle der Zukunft | 143 |
| WAGNER, Hermann-Josef: Erneuerbare Energien – energetisch ganzheitlich betrachtet | 161 |
| WEIZSÄCKER, C. Christian VON: Ökonomische Probleme der Strommarktliberalisierung | 179 |
| KELLER, Bruno: Eine universell gültige Strategie für energieeffiziente Gebäude und ihre praktische Umsetzung. | 193 |
| APFEL, Holger, CREMERS, Carsten, and STIMMING, Ulrich: Fuel Cells: State of the Art and Future Developments. | 209 |
| SPECHT, Michael, ZUBERBÜHLER, Ulrich, und BANDI, Andreas: Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen – Potentiale, Herstellung, Perspektiven | 239 |

| | |
|---|-----|
| WELTE, Dietrich H.: Fossile Kohlenwasserstoffe – Wirklichkeit und Wahrnehmung heute und morgen | 265 |
| KÖRNER, Christian: Die Biosphäre als Energiequelle und Kohlenstoffsенke | 287 |
| KALTSCHMITT, Martin: Energetische Nutzung von Biomasse. Technik, Potentiale, Kosten, Umweltaspekte | 305 |
| GUGERLI, David: Kernenergienutzung – ein nachhaltiger Irrtum der Geschichte? | 331 |
| HEINLOTH, Klaus: Energie für unsere Zukunft – Was sollen und was können wir tun? .. | 343 |
| WALTHER, Herbert: Zusammenfassung der Podiumsdiskussion »Energiepolitische Konsequenzen: Vor- und Nachteile der erneuerbaren Energien« | 371 |
| Deutsche Energieforschung und Energiepolitik auf dem Prüfstand. Thesenpapier als Ergebnis der Leopoldina-Jahresversammlung »Energie« vom Oktober 2003 | 375 |

Vorwort

Zu den großen Zukunftsanliegen der Gesellschaft gehört die langfristige Sicherstellung der Energieversorgung. In den 60er und 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts waren Energieerzeugung und -nutzung noch vornehmlich eine Angelegenheit von Technik, Wirtschaft und Staat. In den 80er Jahren wurden einzelne Energieträger Gegenstand von Auseinandersetzungen, wie Erdöl *versus* Kernenergie. Seit den 90er Jahren entwickelte sich aus einer ursprünglich naturwissenschaftlich-technischen eine gesellschaftswissenschaftlich-kulturelle Diskussion. Gegenwärtig ist eine Debatte entbrannt, an der sich neben Wissenschaft und Wirtschaft auch Bürgerinitiativen, Umweltgruppen, Medien, Gewerkschaften, Parteien und Kirchen beteiligen, die mitunter die Diskursrichtung bestimmen.

Kein Energieträger ist heute noch unumstritten. Die gegenwärtige Form der Nutzung fossiler Energieträger wird als Hauptverursacher für globale Klimaveränderungen und Umweltschäden angesehen. Die Risiken der Kernenergie lassen viele den Ausstieg aus dieser Technik fordern. Windkraft und Solarenergie verfügen nur über ein eingeschränktes Potential. Die Debatte vermittelt jedoch den Eindruck, daß naturwissenschaftliche und technische Argumente mitunter in den Hintergrund treten und durch ökologische, soziale und kulturelle Aspekte verdrängt werden. In der Öffentlichkeit wird kaum noch wahrgenommen, daß Energie eine naturwissenschaftliche Basis hat. Energiefragen bedürfen jedoch vor allem der wissenschaftlichen Expertise. Sie lassen sich nur noch in globalen Zusammenhängen betrachten und bedürfen internationaler Lösungsansätze.

Experten und Politiker verunsichern die kritisch eingestellte Öffentlichkeit hingegen durch eine Vielzahl sehr verschiedener Prognosen zum Weltenergiebedarf und zur Entwicklung der Energienutzung. Die emotionale Diskussion wird geschürt, jedoch die sachliche Auseinandersetzung verhindert. Sie muß aber im Zeichen von Nachhaltigkeit, Generationengerechtigkeit und Sozialverträglichkeit geführt werden.

Auf ihrer Jahresversammlung vom 17. bis 20. Oktober 2003 in Halle beschäftigten sich daher die Mitglieder der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina und ihre Gäste sowohl mit den naturwissenschaftlichen als auch den gesellschaftspolitischen Problemen der Energie-Thematik. Der Tagungsband legt die Beiträge der Referenten vor, in denen verschiedene Energieszenarien auf den Prüfstand gestellt werden. Kritisch analysiert werden einerseits die Potentiale der erneuerbaren Energien, wie Wind- und Wasserkraft, Solarenergie, Geothermie und Nutzung von Biomasse und Biotreibstoffen. Andererseits werden aber auch die Tendenzen im Einsatz fossiler Energieträger und der Kernenergie sowie in der Entwicklung der Kernfusion umfassend hinterfragt. Energiesparpotentiale (z. B. im Architekturbereich), technische Konzepte (Solarzellen, Brennstoffzellen, Aufwindkraftwerke, energieeffizientes Gebäudemanagement) und ökonomische Fragen (z. B. der Strommarktliberalisierung) bilden weitere Schwerpunkte. Gestaltbarkeit von Gesellschaft, die Risiken von Technologien und die

Volker ter Meulen

Planbarkeit technischer Anlagen werden wissenschaftshistorisch am Beispiel der Kernenergie untersucht.

Mit einem abschließenden Thesenpapier versucht die Akademie, für die Behandlung der Energie-Thematik einen Kontext aufzuzeigen, in dem Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit effektiv miteinander kommunizieren können, um die Zukunft Deutschlands in der Energieversorgung und am Energiemarkt zu sichern.

Volker TER MEULEN

Präsident

Energie – Problemlösung oder Problem?

Joachim TREUSCH (Jülich)

Senator der Akademie



Zusammenfassung

Seit Robert MAYER und Herrmann VON HELMHOLTZ scheint es klar, daß über die Frage des Erhaltungssatzes der Energie unter verständigen Leuten nicht mehr diskutiert werden muß. Auch die tiefgründigen Weiterungen, die wir Ludwig BOLTZMANN verdanken, scheinen unbestreitbar. Dennoch gibt es politische Diskussionen und Meinungen, die den Eindruck erwecken, als könne das Heil der Menschheit ohne konsequenten Respekt vor den Gesetzen der Physik und insbesondere vor denen der Thermodynamik gewonnen werden. Diese Diskussionen müssen von der Wissenschaft ernst genommen und ergebnisorientiert geführt werden, denn von einem vernünftigen Gebrauch der vorhandenen energetischen Ressourcen hängt in der Tat die Zukunft der auf diesen Globus als Lebenswelt beschränkten Menschheit ab. Dabei müssen sowohl das Versorgungsproblem, d. h. die Reichweite der vorhandenen Vorräte sinnvoll wandelbarer Energie, wie auch die Entsorgungsprobleme, d. h. zum Beispiel die Problematik radioaktiven Mülls oder klimaändernden Kohlendioxids, bedacht werden. Jede Ideologie ist hier fehl am Platze, denn das vorhersehbare Wachstum der Erdbevölkerung in den nächsten Dekaden mit seiner extrem asymmetrischen Dynamik verlangt nach einem Wohlstandsausgleich, der mit einer mindestens mittelfristigen Steigerung des Energieumsatzes verbunden sein muß. Hier einen „optimalen Weg“ zu finden, zwischen Ressourcenknappheit auf der einen und Umweltbelastung auf der anderen Seite, wird die vordringlichste Aufgabe der nächsten Jahrzehnte sein. Gefordert sind gleichermaßen die nationale und internationale Politik, die globalisierte Wirtschaft und schließlich Wissenschaft und Technologie. Einige generelle Hinweise in Vorbereitung der Einzelvorträge der Jahresversammlung werden versucht – eine Lösung kann von den genannten Akteuren nur gemeinsam gefunden werden.

Abstract

Since the time of Robert MAYER and Herrmann VON HELMHOLTZ it has seemed obvious that the question of the law of the conservation of energy is no longer a matter of dispute for knowledgeable people. Even the profound extensions that we owe to Ludwig BOLTZMANN seem to be unassailable. Nevertheless, there are political discussions and opinions which give the impression that the salvation of mankind could be achieved without respecting the laws of physics, and in particular the laws of thermodynamics. Science must take this discussion seriously and the dispute must be pursued in a result-oriented manner since the future of mankind, who are restricted to this planet for their habitat, does indeed depend on prudent use of existing energy resources. In this context, consideration must be given to both the problem of *supply*, i.e. the extent of existing reserves of meaningfully convertible energy, and also to problems of *disposal*, i.e., for example, the issue of radioactive waste or the climate-changing effects of carbon dioxide. There is no room for ideology here since the foreseeable growth of the world's population in the next few decades with its extremely asymmetrical dynamics requires a balance in the distribution of prosperity that, at least in the medium term, will be associated with a rise in the conversion of energy. The most pressing task of the coming decades will be to find the »optimum path« between shrinking resources, on the one hand, and environmental pollution, on the other. This makes demands on both national and international policy as well as on the globalized economy and ultimately also on science and technology. It will be attempted to give some general indications as a preparation for the individual lectures at the annual meeting – but a solution can only be found jointly by all the above-mentioned actors.

Sehr geehrter Herr Präsident TER MEULEN,
meine sehr verehrten Damen und Herren,

Energie als Problemlösung oder Problem – darf man als Physiker überhaupt einen solchen Titel wählen, wo man doch weiß, daß Energie spätestens seit Robert MAYER und Hermann VON HELMHOLTZ eine wohldefinierte Größe ist, die den Hauptsätzen der Thermodynamik folgt und nicht den Gesetzen psychologischer oder politischer Wahrnehmung? Wäre es doch so einfach! Zwar wird man wenig Widerspruch ernten, wenn man die beiden ersten Hauptsätze in ihrer popularisierten Form: 1. »von nichts kommt nichts«, und 2. »Veränderung hat ihren Preis« in die politische Öffentlichkeit bringt. Aber dieselben Leute, die hier nicht widersprechen, können im nächsten Atemzug sagen: »Es wird doch jedes Jahr genau so viel Erdöl neu exploriert, wie verbraucht wird, wo liegt das Problem?« oder »Nutzt doch den außerhalb der Spitzenlast verfügbaren Strom, um Wasserstoff zu produzieren. Mit dem könnt ihr dann anschließend ganz umweltfreundlich wieder Strom erzeugen.« Und wenn man dann gar im Wirtschaftsteil einer höchst angesehenen deutschen Wochenzeitung lesen muß: »Kraftwerke, die 50 statt 40 Prozent der in der Kohle chemisch gebundenen Energie in Strom umwandeln, machen womöglich Ingenieure stolz; Klimaprobleme lösen sie nicht. Die Investition in solche Kraftwerke ist deshalb riskant. Nur wenn ihre Nutzung CO₂-frei erfolgt, hat die Kohle eine Zukunft. Ihre Vergasung oder Umwandlung zu Wasserstoff macht das möglich«, dann spätestens weiß man, daß die Leopoldina gut daran tut, das Thema Energie in ihrer Jahresversammlung 2003 aufzuarbeiten. Noch einmal also die Frage: Wo ist das Problem mit der Energie, wo können wir zur Problemlösung beitragen?

Als der *Club of Rome* 1972 seinen aufsehenerregenden Bericht über »Die Grenzen des Wachstums« veröffentlichte, lebten auf unserer Erde knapp vier Milliarden Menschen, jedes Jahr kamen etwa 2 %, d. h. weitere 80 Millionen, dazu – überwiegend in den armen Ländern. Bei Fortsetzung dieses Anstiegs, bei festgehaltenem prozentualem Zuwachs eine Exponentialkurve mit einer Verdoppelungszeit von 35 Jahren, sähen wir die Erde heute mit fast acht Milliarden Menschen bevölkert. Wir wissen, es sind nur etwas mehr als sechs Milliarden, der jährliche Zuwachs liegt bei nur noch knapp 1,3 %. Ist das Grund genug zur Entwarnung?

Aus der Sicht der reichen Länder konnte es eine Weile so aussehen: die mittlere Lebenserwartung steigt, die Zuwachsraten der Bevölkerung nähern sich der Null, das Wirtschaftswachstum wurde vom Energieverbrauch entkoppelt. Daß hier eine Scheinblüte vorliegt, daß eine alternde Bevölkerung Probleme ganz eigener Art bekommt, das zeigt uns die derzeitige Diskussion über Renten- und Gesundheitsreform deutlich genug. Aber das eigentliche, weltweit drängende Problem liegt an anderer Stelle: Wenn man die Welt einteilt in Länder mit einem Bevölkerungszuwachs von weniger als 1 % jährlich und solche mit einem jährlichen Zuwachs von mehr als 2 %, bekommt man eine erschreckende Nord-Süd-Teilung des Globus, und die trennende Grenze läuft fast überall durch die aktuellen Krisengebiete der Bürgerkriege und des Terrorismus. Nur wenige Länder, wie z. B. China und Südkorea, liegen mit einer Zuwachsraten zwischen einem und zwei Prozent im hoffnungsvollen Zwischenbereich.

Dabei ist es natürlich nicht die demographische Entwicklung allein, die Krisen bedingt, sondern die gefährliche Rückkopplung zwischen den steigenden Bedürfnissen einer wachsenden Bevölkerung und der mit eben diesem Wachstum sich verringernden Chance, diese Bedürfnisse zu befriedigen.

Was sind denn diese Bedürfnisse? Die UNO definiert kurz und pragmatisch: Nahrung, Kleidung, Unterkunft, ein Radio, ein Fahrrad und eine Kücheneinrichtung sind Mindestanforderungen zum Glücklichen auf Erden.

Etwas allgemeiner ausgedrückt könnte man formulieren: Der Mensch braucht Energiezufuhr in verschiedener Form, eine gewisse Grundausstattung mit Material, als soziales Wesen Information und Kommunikation und Rahmenbedingungen wie sauberes Wasser, saubere Luft, die gesundes Leben ermöglichen. Genauerer Hinsehen zeigt, daß die Voraussetzung aller Voraussetzungen zur angemessenen menschlichen Lebensführung die Versorgung mit Energie ist. Genau deswegen ist das Thema *Energie* stärker als alle anderen Themen auch politisch geprägt. Denn, in der Tat: Die Zukunft der auf diesen Globus als Lebenswelt beschränkten Menschheit hängt von einem vernünftigen Gebrauch und einer vernünftigen Verteilung der vorhandenen energetischen Ressourcen ab.

Dabei müssen sowohl das Versorgungsproblem, d. h. die Reichweite der vorhandenen Vorräte sinnvoll wandelbarer Energie, wie auch die Entsorgungsprobleme, d. h. zum Beispiel die Problematik radioaktiven Mülls oder klimaändernden Kohlendioxids, bedacht werden. Jede Ideologie ist hier fehl am Platze, denn das vorhersehbare, extrem asymmetrisch über den Globus verteilte Wachstum der Erdbevölkerung verlangt nach einem Wohlstandsausgleich, der mit einer mindestens mittelfristigen Steigerung des Energieumsatzes verbunden sein muß. Hier einen »optimalen Weg« zu finden, zwischen Ressourcenknappheit auf der einen und Umweltbelastung auf der anderen Seite, wird die vordringlichste Aufgabe der nächsten Jahrzehnte sein. Gefordert sind gleichermaßen die nationale und internationale Politik, die globalisierte Wirtschaft und schließlich Wissenschaft und Technologie.

Wir werden in den nächsten Tagen in Vorträgen und Diskussionen diese Felder ausschreiten, von der Windenergie bis zur Kernkraft und von der Photovoltaik bis zur Fusionstechnologie. Gestatten Sie mir deswegen heute Abend einige eher generelle Hinweise im Vorfeld dieser Diskussion.

Zum Beispiel diesen: Das »energetische Verhältnis« zwischen einem Menschen in Nordamerika und einem in China liegt am Beginn des 21. Jahrhunderts bei rund 10 : 1 – ein Nordamerikaner verbraucht pro Jahr die zehnfache Menge an Primärenergie im Vergleich zu einem Chinesen. Dieses Verhältnis im Energieverbrauch pro Kopf steigt gar für das Vergleichspaar Nordamerika/Afrika auf 20 : 1 oder für Nordamerika/Südasiens auf 30 : 1. Auf unserem Planeten ist der Energieverbrauch höchst ungleich verteilt: Die derzeit hochindustrialisierten Länder, in denen ein Viertel der Weltbevölkerung lebt, verbrauchen zwei Drittel der weltweit verfügbaren Energie, d. h. 8,5 von 13 Milliarden Kilowattjahren pro Jahr.

Der Energiebedarf der Menschheit wird in den kommenden Jahrzehnten parallel zum Bevölkerungswachstum und zur steigenden Industrialisierung in den jetzt noch armen Ländern mitwachsen. Die Internationale Energieagentur IEA prognostiziert für das Jahr 2030 – bei dann 8,5 Milliarden Menschen – einen globalen Bedarf von rund 23 Milliarden Kilowattjahren, also fast eine Verdopplung gegenüber dem Momentanwert. Diese Zahl ist nicht nur beängstigend groß. Sie wirft auch beängstigend große Probleme auf: Denn es geht nicht nur darum, eine solch gigantische Energiemenge überhaupt zur Verfügung zu stellen, sondern darüber hinaus auch darum, dies so zu tun, daß die Umwelt und wir in ihr es überleben.

Den Löwenanteil am gegenwärtigen Energieverbrauch tragen die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas. Sie decken mehr als 80% des weltweiten Energiebedarfs. Aller Voraussicht nach werden sie den Energiemix auch noch in den kommenden Jahrzehnten dominieren. Doch den »eigentlichen Preis« für diese Energie zahlt (zunächst) nicht der Verbrau-

cher, sondern die Umwelt, Stichwort: anthropogener Treibhauseffekt. Knapp 7 Gigatonnen (Milliarden Tonnen) Kohlenstoff, freigesetzt als CO₂, gelangen durch den Menschen pro Jahr in die Atmosphäre. Ein steigender CO₂-Gehalt greift dabei massiv in den globalen Wärmehaushalt ein, indem er die von der Erde abgestrahlte Wärme einfängt und sie nahe der Oberfläche festhält. Die globale Erwärmung könnte das Erdklima weit aus seiner natürlichen Schwankungsbreite hinaustreiben und die Lebensbedingungen auf dem Planeten dramatisch verändern. Solche Schreckensszenarien zwingen zum energetischen Umdenken. Aber auch wenn das Glück auf unserer Seite sein sollte und sich diese Szenarien nicht einlösen, was wir allerdings erst im Nachhinein wissen werden, sind Kohle, Öl und Erdgas keine Zukunftsenergien – die Ressourcen sind endlich. Genaueres hierzu wird Dietrich WELTE berichten.

Wir stehen an einer energetischen Wendemarke. Das globale Muster der künftigen Energieversorgung, das wir wählen können oder wählen müssen, ist unbekannt. Das einfachste der Zukunftsszenarien: »Weiter wie bisher« hätte – so es sich einlöst – gute Chancen, das letzte Weltzenario überhaupt zu werden. Also müssen Alternativ-Szenarien entworfen und verfolgt werden, auch wenn sie gegen die »Trägheitsgesetze« der gegenwärtigen Energietechnik, eines reinen Ökonomismus oder der politischen und gesellschaftlichen Akzeptanz, ankämpfen müssen. Die heutige Suche nach der Energiezukunft von morgen muß mehrgleisig fahren. Zu viele Unbekannte sind im »Spiel«, als daß eine eindeutige Strategie auszumachen ist:

- Wir müssen lernen, Energie zu sparen: Autos sind zu konstruieren, die mit weit weniger Benzin als heute auskommen; Wohnhäuser und Büros sind so intelligent zu bauen, daß sie die Sonnenstrahlung als kostenlose Heizung nutzen; elektrische Geräte sind zu optimieren, so daß sie ein Minimum an elektrischer Leistung verbrauchen; die Wirkungsgrade von Kraftwerken und allen industriellen Prozessen müssen an die theoretischen Grenzen getrieben werden. Das Verbindende zwischen den Elementen dieser längst nicht vollständigen Liste ist der Imperativ »Steigere die Effizienz!«. Das kann den Energiehunger zwar verringern, stillen aber kann es ihn nicht.

Wir müssen also in Energiequellen für das Post-fossile-Zeitalter investieren.

- Drei dieser Quellen, nämlich Biomasse, Wasserkraft und Wind, tragen mit etwa 10 % zur weltweiten Primärenergie bei. Ihre Zuwachsraten sind aber aus natürlichen Gründen begrenzt. Daß es, insbesondere bei der Nutzung der Windenergie, auch technische und ökonomische Begrenzungen gibt, wird uns morgen Herrmann-Josef WAGNER verdeutlichen.
- Ein ganz anderes Bild bietet die Kernenergie, die mit 6 % zur Primärenergie, aber mit bemerkenswerten 18 % zur weltweiten Stromerzeugung beiträgt. Ihre Zuwachsraten sind politisch begrenzt.

Wenn man allerdings die jüngsten Schlagzeilen im *Spiegel* – »Rückkehr der Reaktoren« – oder in *News Week* – »The Last Great Hope« (gemeint ist der Hochtemperatur-Reaktor Jülicher Bauart) – liest, ist man versucht, auf eine neue, rationale Diskussion über inhärent sichere Kernkraftwerke zu hoffen. Vielleicht gibt auch diese Jahresversammlung der Leopoldina einen Anstoß dazu.

- Die höchste Zuwachsrate, nämlich über 25 % jährlich, hat zweifellos die Photovoltaik, aber sie wächst auf einem noch extrem niedrigen Promille-Niveau, weil Probleme der Verfüg-

barkeit und des Preises sie gegenwärtig nur für Sondersituationen attraktiv erscheinen lassen. Daß eine gute Förderpolitik und intensive Forschung dafür sorgen können, daß Photovoltaik langfristig einen erkennbaren Anteil unserer Versorgung mit Elektrizität liefert, ist unbestreitbar. Aber selbst die besten Lernkurven und Kostensenkungen durch Produktionssteigerung können keine Wunder bewirken. Also werden Beiträge von nur einigen Prozent zum Strommarkt als Perspektive für die nächsten zwanzig Jahre uns auf der einen Seite nicht entmutigen dürfen im Blick auf längere Zeiträume. Auf der anderen Seite macht diese Perspektive die Notwendigkeit deutlich, daß man für die »Übergangszeit« der nächsten Dekaden die politische Diskussion über den richtigen Energiemix sehr ernsthaft und unvoreingenommen führen muß.

- Dazu gehört natürlich auch die Diskussion über die letzte erkennbare Option, die Energiegewinnung aus der Verschmelzung von Wasserstoff und Helium, die Fusion. Sie trägt viele Hoffnungen, hat aber noch einen weiten Weg bis zur technischen Realisierung vor sich. Wer jedoch diese Option voreilig verschenken wollte, würde gefährlich handeln. Denn wenn die physikalischen und technischen Probleme lösbar sind, dann wird die Fusion die mächtigste der irdischen Energiequellen sein. Wir können gespannt sein, was Alexander BRADSHAW uns über den gegenwärtigen Stand der Kernfusion und ihre zukünftigen Entwicklungen erzählen wird.

Diese kurzen Hinweise zusammenfassend lautet meine persönliche Energie-Vision für 2020–2030:

- Fossile Kraftwerke erreichen einen Wirkungsgrad von 65 %, und dies möglichst weltweit.
- Der inhärent sichere Hochtemperaturreaktor setzt sich international durch (dies darf ich als Jülicher sagen und hoffen!).
- Photovoltaik liefert 2 – 5 % der verfügbaren elektrischen Energie.
- Brennstoffzellen haben den Markt erobert.

Und wenn wir mutig noch zwanzig Jahre weiterschauen, dann haben sich die Zuwachsraten von Energieverbrauch und Wohlstand weltweit entkoppelt, die Fusion beginnt Energie zu liefern, Photovoltaik, Wasserstoff und Brennstoffzelle liefern 20 – 30 % der weltweiten Nutzenergie und die Entsorgung der Hochtemperaturreaktoren ist gesichert.

Dies wäre dann ein Szenario, auf dessen Hintergrund man mit mehr Berechtigung als heute über die Hoffnung auf Weltfrieden reden könnte.

Gestatten Sie mir, meine sehr verehrten Damen und Herren, in diesem Sinne und zum Abschluß eine Zusammenfassung in Form eines aristotelischen Syllogismus:

Prämisse I: Die Verfügbarkeit von Energie ist eine unabdingbare Voraussetzung zur *Lösung der Probleme* einer nachhaltigen Zukunft alles menschlichen Lebens.

Prämisse II: *Die Probleme* ihrer Nutzung können nur in Kooperation zwischen Wissenschaft (fächerübergreifend) und Politik (nationenübergreifend) gelöst werden.

Conclusio: Die Zukunft der Menschheit kann nur gesichert werden in der Kooperation zwischen Politik und Wissenschaft.

Lassen Sie uns an der Verbesserung dieser Kooperation gemeinsam arbeiten!

Prof. Dr. Joachim TREUSCH
Vorsitzender des Vorstandes
Forschungszentrum Jülich GmbH
Wilhelm-Johnen-Straße
52428 Jülich
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 2461 613000
Fax: +49 2461 612525
E-Mail: J.Treusch@fz-juelich.de

Photosynthese und andere Energie- umwandlungsprozesse in Zellen

Dieter OESTERHELT (Martinsried)

Mitglied der Akademie

Mit 22 Abbildungen und 1 Tabelle



Zusammenfassung

Photosynthese ist der fundamentale physiko-chemische Prozeß, der Leben auf unserem Planeten erhält. Dies war nicht immer so. Energievorräte, organische Verbindungen, die in der energiereichen Uratmosphäre des Planeten entstanden waren, erlaubten die Entstehung zellulären Lebens. Der Umbau solcher Verbindungen in Zellen unter anaeroben Bedingungen und unter Energiegewinn beherrschte diese frühe Phase der biologischen Evolution. Solche fermentativen Prozesse beobachten wir noch heute in einer Vielzahl von Organismen, die unter Flucht in ökologische Nischen ursprüngliche Stoffwechselformen bewahrt haben.

Als die Energievorräte zu Ende gingen, lernten die Zellen in Stufen das Licht der Sonne zur Energiegewinnung zu nutzen. Zwei Arten von Photosynthese entwickelten sich: die retinal-basierte in Archaeen und die chlorophyll-basierte erfolgreichere in Bakterien und Eukaryoten. Perfektion wurde erreicht, als photonengetriebener Elektronenfluß Wasser für die Reduktion des Kohlendioxids zu nutzen begann und Sauerstoff produzierte. Diese Wasserspaltung bewirkte zunächst allerdings eine ökologische Katastrophe, und erst im weiteren Verlauf folgte die Evolution der Atmungsprozesse, die heute mit der Photosynthese einen Kreislauf bilden.

Der Beitrag behandelt den evolutionären Aspekt der zellulären Energiewandlung, Fermentation und Photosynthese und schildert die molekularen Details der drei fundamentalen Photosysteme in Archaeen, in Bakterien und in Eukaryoten.

Abstract

Photosynthesis is the fundamental physico-chemical process sustaining life on our planet. Initially energy was available *via* organic compounds which arose in the energy rich atmosphere of the young planet. From these building blocks cellular life originated. The degradation and conversion of such compounds in cells under anaerobic conditions and ATP production was dominant in the early phase of biological evolution. Such fermentative processes still occur today in a multitude of organisms which survived in ecological niches and conserved the original metabolic pathways.

With depletion of energy supply *via* organic compounds cells adopted stepwise sunlight for energy conversion. Two principle modes of photosynthesis developed: the retinal-based photosynthesis in archaea and the more efficient chlorophyll-based in bacteria and eucaryotes. Photosynthesis reached perfection when photon-driven electron flow was connected to the reduction of carbon dioxide with water and production of oxygen. The water-splitting reaction initially caused an ecological catastrophe and only in the course of further evolution respiration was invented reducing oxygen again to water and thereby forming a closed circuit with photosynthesis.

The contribution deals with the evolutionary aspects of cellular energy conversion, fermentation and photosynthesis and describes the molecular details of the three fundamental photosystems in archaea, in bacteria and in eucarya.

Licht der Sonne erhält heute das Leben auf der Erde. Dies war nicht immer so. Ich möchte Ihnen zu Beginn meines Vortrages einleitend die konsekutive Entwicklung von Energieumwandlungsprozessen während der Evolution schildern, bevor ich zu meinem eigentlichen Thema, den molekularen Details der verschiedenen photosynthetischen, d. h. lichtenergieumwandelnden Prozesse komme. Es ist wohl allgemein bekannt, daß Leben ohne Energie nicht denkbar ist. Gleichgewicht bedeutet Tod, und die irreversible Thermodynamik beschreibt, wie Organisation als charakteristisch für Lebendiges nur durch permanente Energiezufuhr aufrecht erhalten wird. Energie war in der Frühzeit, als der Planet von dichten Wolken umgeben war, zur Genüge als Temperatur und Elektrizität verfügbar. Sie ließ in der organischen Vorlebensphase alle wichtigen Biomoleküle entstehen, die nach Formung ersten zellulären Lebens durch Selbstorganisation als Bausteine oder Brennstoff dienen konnten. Auch anorganische Reaktionen standen zur Verfügung, die Energie für Lebensprozesse lieferten.

Prozesse, die das beginnende Leben unter den noch sauerstofffreien Bedingungen nutzten, unterteilen sich in zwei Gruppen: Fermentationen und Elektronentransportprozesse. Abbildung 1 zeigt das Prinzip der Fermentation, deren prominentester Vertreter die Vergärung von Glucose zu Alkohol in Hefe ist. Beim Umbau des Substrates Glucose in die beiden Produkte CO_2 und Alkohol werden intermediär Elektronen im universellen Redoxspeicher NADH gespeichert. Netto häuft sich aber nur der universelle Energiespeicher ATP an, denn das NADH wird bei der Alkoholbildung wieder verbraucht. Diese Bildung von ATP mit Hilfe löslicher Katalysatoren wird Substratkettenphosphorylierung genannt. Anders verlaufen sogenannte Elektronentransportprozesse, die am Beispiel der Methanogenese in der Abbildung 2 gezeigt sind. Hier wurde im Lauf der Evolution ein System entwickelt, das die verschiedensten Redoxreaktionen an Transmembranprozesse koppelt und damit die Reduktion und Oxidation von Substanzen mit dem Transport des Wasserstoffions koppelt (Tab. 1). Die hierbei entstehende protomotorische Kraft besteht aus einem Konzentrations- und einem elektrischen Gradienten und hat sich in der Evolution als der effizienteste und daher meist verbreitete Weg von Energieumwandlungsprozessen entwickelt. Von ihm wird in meinem Vortrag immer wieder die Rede sein. Anders als in der Glykolyse-getriebenen chemischen Phosphorylierung von ADP hat die Natur zur Nutzung der protomotorischen Kraft bei membrangebundenen Elektronentransportprozessen ein sehr ungewöhnliches Enzymsystem entwickelt, das ATP-Synthase heißt.

Tab. 1 Typische Elektronendonatoren und Elektronenakzeptoren. Die Daten sind MICHAL 1999 entnommen.

| | Redoxpaar | E_0' [mV] |
|-------------------------------|--|-------------|
| Typische Elektronendonatoren | $2\text{H}^+/\text{H}_2$ | -410 |
| | Pyruvat/Lactat | -197 |
| | Fumarat/Succinat | +33 |
| Typische Elektronenakzeptoren | CO_2/CH_4 | -244 |
| | HSO_3^-/HS | -110 |
| | $\text{APS}/\text{HSO}_3^- + \text{AMP}$ | -60 |
| | Fumarat/Succinat | +33 |
| | $\text{NO}_2^-/\text{NH}_3$ | +340 |
| | $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$ | +430 |
| | NO_3^-/N_2 | +740 |
| | $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ | +1355 |
| Zum Vergleich: aerob | $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ | +816 |

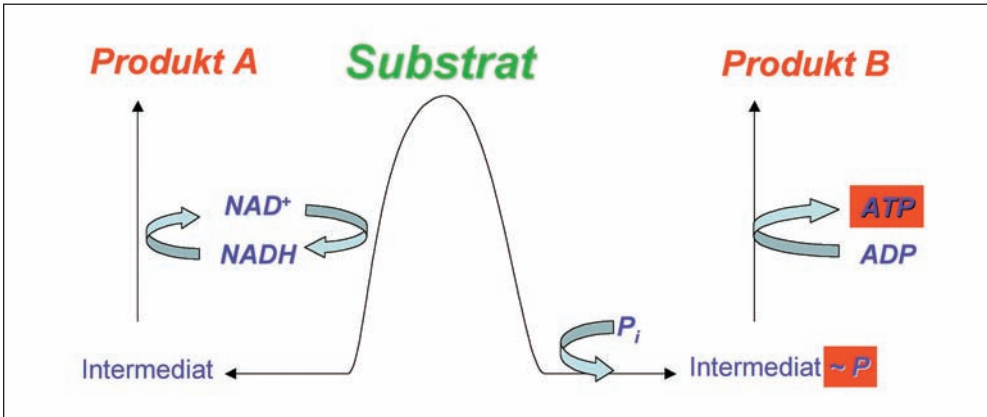


Abb. 1 Die Substratkettenphosphorylierung fermentativer Prozesse. Im Fall der alkoholischen Gärung ist das Substrat Glucose, Produkt A ist Ethanol und Produkt B ist CO₂. NADH wird im Schritt von Glycerinaldehyd zu Glycerinsäure, NAD im Schritt von Acetaldehyd zu Ethanol und das überschüssige ATP im Schritt von Phosphoenolpyruvat zu Pyruvat gebildet, bevor dieses zu Acetaldehyd decarboxyliert wird.

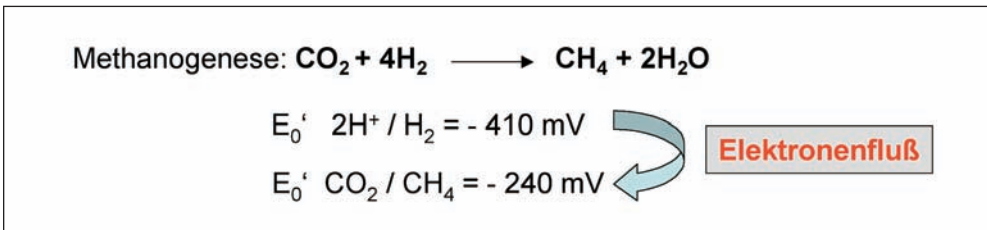


Abb. 2 Anaerober Elektronentransport am Beispiel der Methanogenese

Als das Leben anfing, die gebildeten Energievorräte zu erschöpfen, gingen die organischen Vorräte vermutlich als erstes aus, und es verblieben anorganische Redoxreaktionen, doch auch diese waren begrenzt, und die Evolution wäre in eine Sackgasse geraten, hätte sie nicht die einzige für unsere Zeitdimension unerschöpfliche Energiequelle, das Licht der Sonne, zu nützen gelernt. Es entstand die Photosynthese, und sie entstand in zwei sehr unterschiedlichen Arten. Zum einen die heute im Prokaryotenreich anzutreffende, retinalbasierte Photosynthese, die durch lichtgetriebene Protonentranslokation die erwähnte protomotorische Kraft erzeugt und sie zur ATP-Synthese als Energiequelle der Zelle beim Wachstum nutzt. Die zweite Art ist chlorophyllabhängig und hat in der Evolution eine quantitativ weit größere Verbreitung und qualitativ einen weit höheren Komplexitätsgrad erreicht. Sie ist eine Lichtenergieumwandlung, die Elektronentransport bewirkt. Der Elektronentransport kann zyklisch, wie bei Prokaryoten, oder azyklisch, wie bei Cyanobakterien, Algen und Pflanzen, sein. Notwendigerweise findet beim zyklischen Elektronentransport lichtgetrieben keine Nettooxidation und -reduktion statt, während dies im Falle des azyklischen Prozesses der Fall ist. Die Evolution

hat vermutlich zunächst den zyklischen Fall verwirklicht. Bei abnehmender Konzentration organischer Substrate wurde Lichtenergie genutzt, um anorganischen Substraten, z. B. H₂S, Elektronen zu entziehen, und sie dem zellulären Stoffwechsel als Redoxäquivalente für die Reduktion von CO₂ zuzuführen (Abb. 3). Auch dieser Prozeß erschöpfte sich, und ein neues Reduktionsmittel zur Bildung organischer Verbindungen in der Zelle mußte gefunden werden. Wasser als Reduktionsmittel für das Kohlendioxid der Luft unter Bildung organischer Verbindungen war die Lösung. Der Prozeß des photolithotrophen Wachstums war geboren und begann sich langsam, aber sicher durchzusetzen. Die Erfindung der wasserspaltenden Photosynthese geht auf die Blaugrünalgen oder Cyanobakterien zurück und begünstigte ihr Wachstum massiv. Fossile Überreste sind heute noch sichtbar (Abb. 4A, B), und Abbildung 4C zeigt rezente Stümpfe von cyanobakteriellen Kolonien. Die Form der Stümpfe ist über 3,5 Milliarden Jahre sehr ähnlich geblieben.

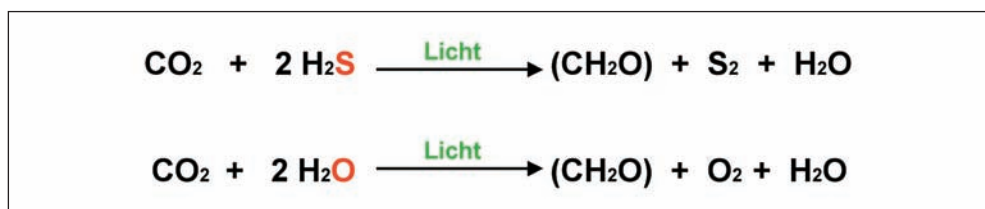


Abb. 3 Photolithotrophe Prozesse in der Natur. Die Energie entstammt dem Licht (τὸ φῶς), Elektronendonator und C-Quelle als Elektronenakzeptor sind anorganische Substanzen (ὄξιδο, Stein), ἡ τροφή ist die Nahrung. Damit bedeutet Photolithotrophie die Photosynthese mit Licht als einziger Energiequelle und anorganischer Substanz (CO₂) als einziger C-Quelle. Diese Eigenschaft zeigen Pflanzen, Algen und einige Bakterienarten. Die retinalabhängige Photosynthese der Archaeen und die chlorophyllabhängige Photosynthese der meisten Bakterien vermittelt dagegen Photoorganotrophie, d. h. Wachstum mit Licht als einziger Energiequelle und organischer Substanz als C-Quelle.

Man bezeichnet die Entstehung des Wasserspaltungsprozesses als die bisher weltgrößte Umweltkatastrophe. Warum? Sauerstoff als Produkt der Reaktion ist ein äußerst reaktives Molekül, das durch Reaktion mit anderen Molekülen noch aggressivere Molekülspezies, wie Singulett-Sauerstoff, Superoxid, Wasserstoffperoxid u. a., hervorbringen kann. Die Evolution der Lebensprozesse hatte bis dahin nur Moleküle geschaffen, die 'wehlos' gegen Sauerstoff sind, man spricht chemisch von 'autooxidabel'. Zudem gab es keine Möglichkeit, die aus Reaktionen mit Sauerstoff hervorgehenden toxischen Produkte zu vernichten. Beides mußte nun entwickelt werden, und schließlich kehrte die Evolution sogar den Spieß um und koppelte die Vernichtung von Sauerstoff mit der Energiespeicherung durch ATP-Bildung, erfand also die Atmung.

Mit Abbildung 5 möchte ich Ihnen den dramatischen Wechsel bei Beginn der oxygenen Photosynthese vorstellen. Unter reduktiven Bedingungen lag Eisen – und es gab viel davon – in der zweiwertigen, d. h. löslichen, Form vor. Zunächst blieb die Sauerstoffkonzentration gering, weil durch die Reaktion mit Fe²⁺ unter Produktion des unlöslichen Fe³⁺ als Hydroxyd



Abb. 4 (A und B) Fossile Stromatolithen in Westaustralien (3,5 Milliarden Jahre). Stromatolithen werden von koloniebildenden Cyanobakterien gebildet, die als Stöcke in seichtem Uferwasser wachsen und als fossile Überreste erhalten bleiben. (Aufnahme aus MORRISON 2002, mit freundlicher Genehmigung) (A) Querschnitt, (B) Längsschnitt. (C) Rezenten Stromatolithen von Cyanobakterien in Shark Bay, West-Australien. (Aufnahme aus MORRISON 2002, mit freundlicher Genehmigung)

(‘Rost’) der Sauerstoff wieder Wasser bildete. Dieser Prozeß trieb die Ausfällung von Eisen in den Ozeanen der Erde an. Auf ihren Böden lagerten sich kilometerdicke Schichten von Eisenhydroxydschlamm ab und dokumentieren, welche Kapazität schon damals, also vor 3 Milliarden Jahren, die wasserspaltende Photosynthese hatte. Der Prozeß ging für Hunderte von Millionen Jahren vonstatten, bis praktisch alles Fe^{2+} verbraucht war. Das hier gezeigte australische Eisenvorkommen, das aus reinem Rost (Fe_2O_3) besteht, verdeutlicht das ganze Ausmaß dieses biologischen Prozesses. Ab diesem Zeitpunkt begann der Sauerstoff auf den heutigen Gleichgewichtswert von 21 % zu steigen. Damit war durch die Erfindungen von photosynthetischer Wasserspaltung und Atmung der heute noch bestehende, von Sonnenenergie getriebene stationäre Kreislauf geboren (Abb. 6).

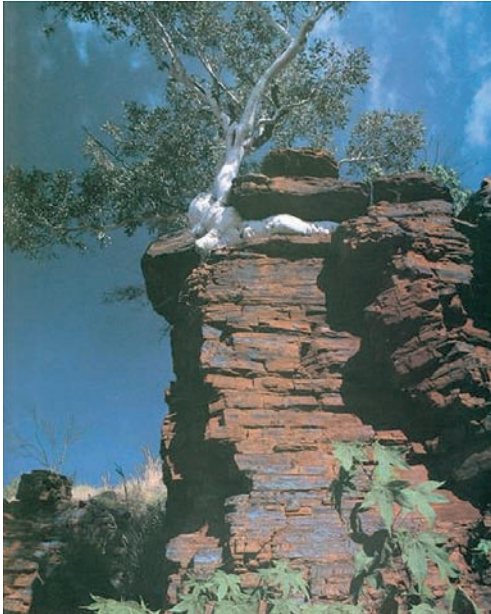


Abb. 5 Eisenoxydablagerung, (Fe_2O_3), die aus der frühen Phase oxygener Photosynthese stammt (Hamersley Range, Westaustralien). (Aufnahme aus MORRISON 2002, mit freundlicher Genehmigung)

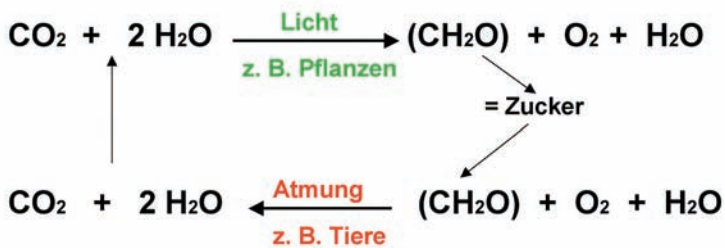


Abb. 6 Der lichtgetriebene CO_2 - und Sauerstoffkreislauf auf der heutigen Erde

Nach diesem erdgeschichtlich geprägten ersten Kapitel meines Vortrages möchte ich mich nun in drei weiteren Kapiteln der Photosynthese durch Retinalproteinsysteme, der eubakteriellen Photosynthese mit Chlorophyll, die zyklischen Elektronentransport betreibt, und schließlich der wasserspaltenden Photosynthese von Cyanobakterien, Algen und höheren Pflanzen zuwenden.

Auf Reisen, insbesondere Urlaubsreisen in südliche Länder, kann man ein merkwürdiges Farbenspiel der Natur beobachten: große Flächen rot bis violett gefärbten Wassers, das sich bei näherer Betrachtung als gesättigte Salzlösung entpuppt (Abb. 7). Die Farbe stammt vor allem von extrem salzliebenden, d. h. halophilen Organismen, die zu den Archaea, der dritten Domäne des Lebens neben Bacteria und Eukarya gehören (Abb. 8). Ursprünglich Archaea von

Carl WOESE getauft, weil sie in ihren Biotopeigenschaften an ursprüngliche Bedingungen der Erde erinnern, werden Archaea heute ubiquitär aufgespürt, in allen Ozeanen ebenso wie in jedem Boden. Unter extremen Lebensbedingungen, wie Temperaturen über 100 °C, pH-Werten unter 2 und über 11 und sättigender Salzkonzentration, leben wahrscheinlich die wenigsten, aber diese sind spektakulär. Auch ungewöhnliche Formen wie die der quadratischen Archaeen (Abb. 9A) werden angetroffen, und der Fortbewegungsapparat (Abb. 9B) beweglicher Archaeen, der aus einem Flagellenbündel, angetrieben von Rotationsmotoren unbekannter molekularer Konstruktion, besteht, ist bemerkenswert.

Halophile Archaeen zeigen eine weitere ungewöhnliche, bei anderen Archaeen noch nicht gefundene Eigenschaft. Sie benutzen als einzige Organismengruppe das Retinal (Vitamin A-Aldehyd; Abb. 10) für beide fundamentalen Wechselwirkungen von Licht und biologischem Material: Photosynthese und Photorezeption. Halophile Archaeen besitzen weiter die einmalige Fähigkeit, soviel der retinalhaltigen Proteine in ihrer Zellmembran zu exprimieren, daß natürliche zweidimensionale Kristalle gebildet werden (Abb. 11A). Durch einfache Lyse der Zellen in Wasser werden sie als Mikrometer große Scheibchen, Purpurmembran genannt, isoliert (Abb. 11B). Das hier gezeigte Beispiel ist ein zweidimensionaler Kristall des Bakteriorhodopsins, dessen Struktur bis in die atomaren Einzelheiten aufgeklärt ist. Die Grobstruktur



Abb. 7 Natürliches Vorkommen von halophilen Archaeen. Rot bis orange getönte Wasserflächen in Salinen oder natürlichen marinen Gewässern deuten immer auf das Vorkommen von halophilen Archaeen hin, die optimal in Salzkonzentrationen von 2–4 M wachsen und in Salzkristallen überleben können. Die Färbung ist durch Carotenoide (C50-Bakterioruberine), seltener auch direkt durch Bakteriorhodopsin bedingt.

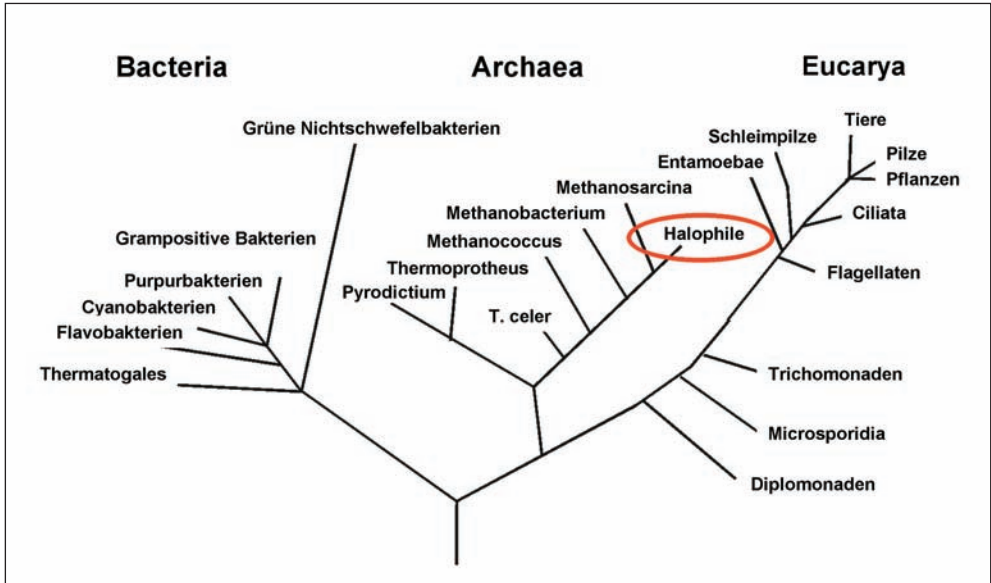


Abb. 8 Dreiteilung biologischer Organismen in die Domänen der Bacteria, Archaea und Eukarya (nach WOESE et al. 1990). Wenn auch der Nachweis genetischen Austausches zwischen Spezies das strikte Bild eines Evolutionsbaumes zunehmend in Frage stellt, gibt es an der prinzipiellen Dreiteilung des Lebens in obige Domänen heute keinen Zweifel mehr.

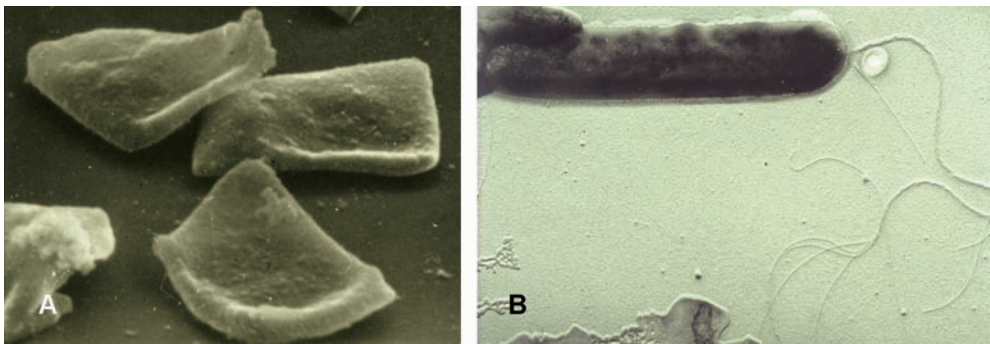


Abb. 9 (A) Quadratarchaen. Diese halophile Spezies weist bei einer Dicke um 300 \AA strikte quadratische Zellform auf. Während des Teilungsprozesses bleiben Zellen manchmal zusammen und sehen aus wie Briefmarkenblöcke. Durch die Präparation der Zellen für die elektronenmikroskopische Aufnahme erscheinen die Zellen hier leicht verformt. (Aufnahme M. KESSEL) (B) Stäbchenförmige halophile Archaeenzelle (*Halobacterium salinarum*) mit Geißelbündel, das sich durch die Prozedur für die elektronenmikroskopische Aufnahme am Ende in die Einzelfilamente aufzulösen beginnt. Der Geißelmotor der Archaeen ist wie der der Bakterien ein Rotationsmotor, besitzt jedoch einen völlig anderen molekularen Aufbau, der noch nicht bekannt ist.

zeigt in der Projektion (Abb. 11C) 7 Transmembranhelices, senkrecht oder etwas schräg die Membran durchquerend, die ringartig das zentral liegende Retinalmolekül umgeben. Der Querschnitt der Membran (Abb. 11D) zeigt dieselben 7 Transmembranhelices und das in der Mitte schräg liegende Retinal. Damit bilden die Helices eine Art Käfig um das Retinal im Zentrum. Von innen (CP) und außen (EC) führen zwei Halbkanäle (siehe Abb. 11C) zu diesem Zentrum, in dem die funktionell bedeutenden Asparaginsäuren D85 (EC, unten) und D96 (CP, oben) liegen (Abb. 11D).

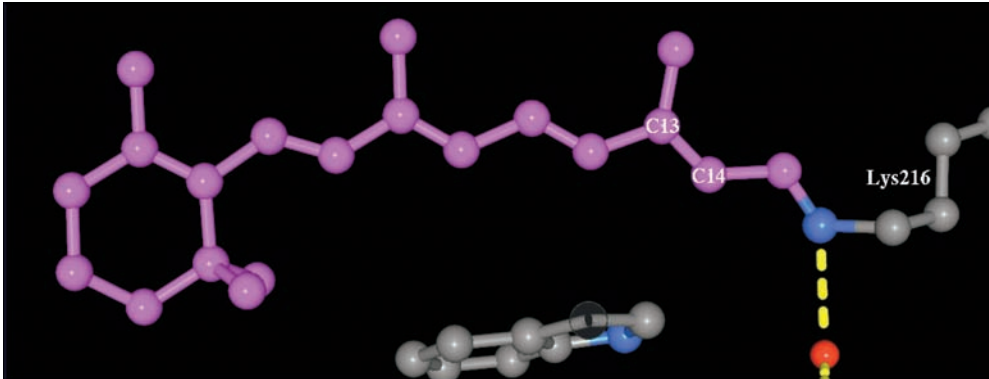


Abb. 10 Vitamin A-Aldehyd oder Retinal, das aus Provitamin A, β -Carotin, durch oxidative Spaltung in der Mitte des Moleküls gebildet wird. Retinal ist eine isoprenoide Verbindung, besitzt 5 konjugierte Doppelbindungen und liegt in allen bekannten Retinalproteinen als sogenannte Schiff'sche Base vor, in der das Aldehyd C-Atom mit der ϵ -Aminogruppe eines Lysinrestes eine C=N-Doppelbindung bildet. Alle bekannten Retinalproteine sind photochemisch aktiv. Die lichtinduzierte Isomerisierung betrifft im Fall der meisten sensorischen Funktionen eine 11-cis \rightarrow all-trans-Isomerisierung, im Fall der Photosynthese und auch der Photosensorik bei Archaeen eine reversible all-trans \rightarrow 13-cis-Isomerisierung.

Bakteriorhodopsin ist nicht das einzige Retinalprotein der halophilen Archaeen. Es gibt vier Typen, die in minimaler Variation ihrer Raumstruktur vier sehr verschiedene Funktionen erfüllen. Auf Bakteriorhodopsin, das als lichtgetriebene Protonenpumpe die Photosynthese der halophilen Archaeen trägt, komme ich gleich zurück. Halorhodopsin ist die bisher einzige bekannte lichtgetriebene, nach innen gerichtete Chloridpumpe, die die osmotische Balance der Zellen aufrecht erhält. Schließlich tragen zwei 'Augen', die Sensorrhodopsine, dafür Sorge, daß die Zellen in eine Umgebung schwimmen, in der die Belichtung optimale Photosynthese erlaubt. Dutzende dieser Retinalproteine wurden aus der Natur isoliert, und um den Minimalcharakter der Variation bei Funktionsausprägung zu belegen, zeigt die Abbildung 13 das simple Muster, das aus jeder Gensequenz durch Betrachtung zweier spezifischer Aminosäurepositionen der Kette die Funktion voraussagen läßt. Zwei Aspartate bedeuten eine Protonenpumpe, kein Aspartat eine Chloridpumpe und ein Aspartat eine Sensorfunktion (in der einbuchstabigen Abkürzung für Aminosäuren D).

Die Aktivität des Bakteriorhodopsins führt zu Photosynthese, d. h. erlaubt mit Licht als einziger Energiequelle phototrophes Wachstum. Eine einfache Punktmutation im Bakteriorhodopsin, die die Bildung des kristallinen Gitters verhindert, unterbindet diese Fähigkeit. Das Prinzip der photosynthetischen Energiewandlung durch Bakteriorhodopsin in der Zelle ist einfach (Abb. 14): Protonentranslokation bei Belichtung befördert pro Photon ein Proton aus

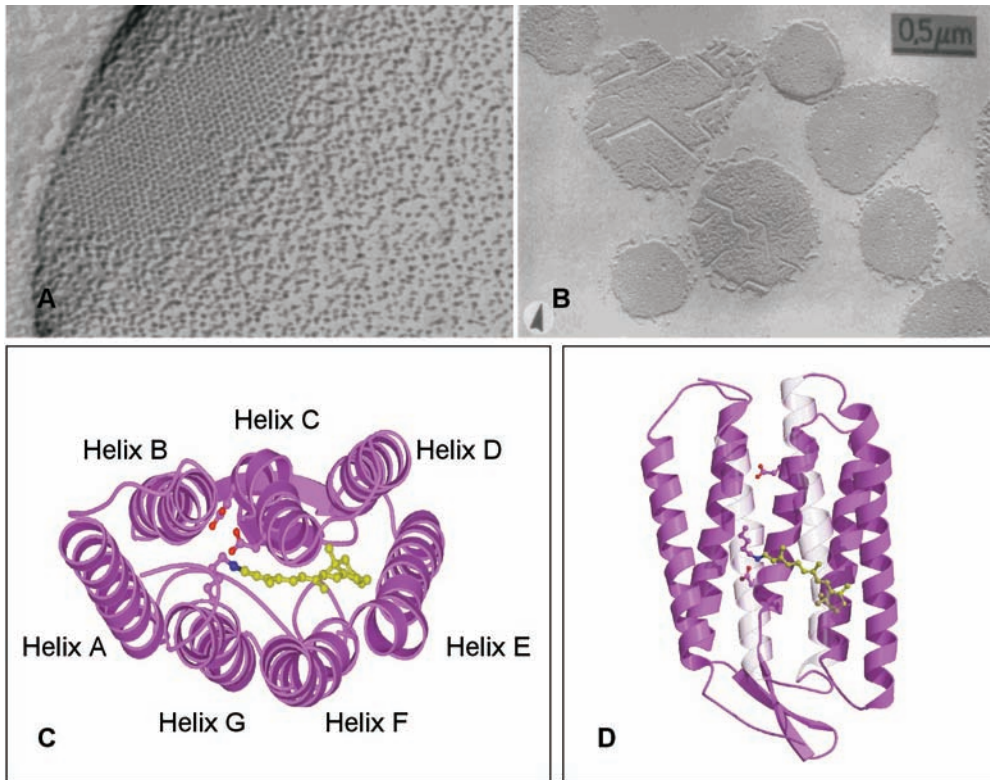


Abb. 11 (A) Gefrierbruchaufnahme einer Zelle von *Halobacterium salinarum*. Der Fleck mit deutlich sichtbarer regelmäßiger Anordnung ist durch einen zweidimensionalen Kristall von Retinalprotein (Bakteriorhodopsin oder Halorhodopsin) bedingt und besitzt dieselben Gitterkonstanten wie die durch Lyse der Zellen in Wasser isolierten kristallinen Membranflecken. (Aufnahme H. BESIR) (B) Isolierte Purpurmembran, die als Suspension auf Glimmer gesprüht und mit Platinkohle bedampft (beschattet) wurde. Die glatte und die gerissene Oberfläche entsprechen der Innen- und Außenseite der Membran. Die Risse, die miteinander Winkel von 60 oder 120° bilden, entstehen beim Trocknen durch Schrumpfen des kristallinen Gitters, das von Bakteriorhodopsintrimeren in hexagonaler Anordnung in der Lipidmatrix gebildet wird. (Aufnahme D. NEUGEBAUER) (C) Aufsicht auf die Purpurmembran mit Darstellung eines einzelnen Bakteriorhodopsinmoleküls. Die 7 Helices umschließen ringartig das Retinal, das an die ϵ -Aminogruppe des Lysin 216 in Helix G (Stickstoff in blau) kovalent gebunden ist. Die entstehende C=N-Doppelbindung ist protoniert. In rot dargestellt sind die beiden entscheidenden Asparaginsäurereste D85 und D96, die unterhalb und oberhalb des Retinals liegen. (D) Querschnitt des Bakteriorhodopsins in der Membran. Die Helices G und F im Vordergrund sind weiß/transparent dargestellt, die Helices A–D in Purpur. Das schräg liegende Retinalmolekül liegt innerhalb der Helices, d. h. hinter Helix F und G. D96 in CP-Teil oberhalb des Retinals und D85 in EC-Teil unterhalb sind eingezeichnet.

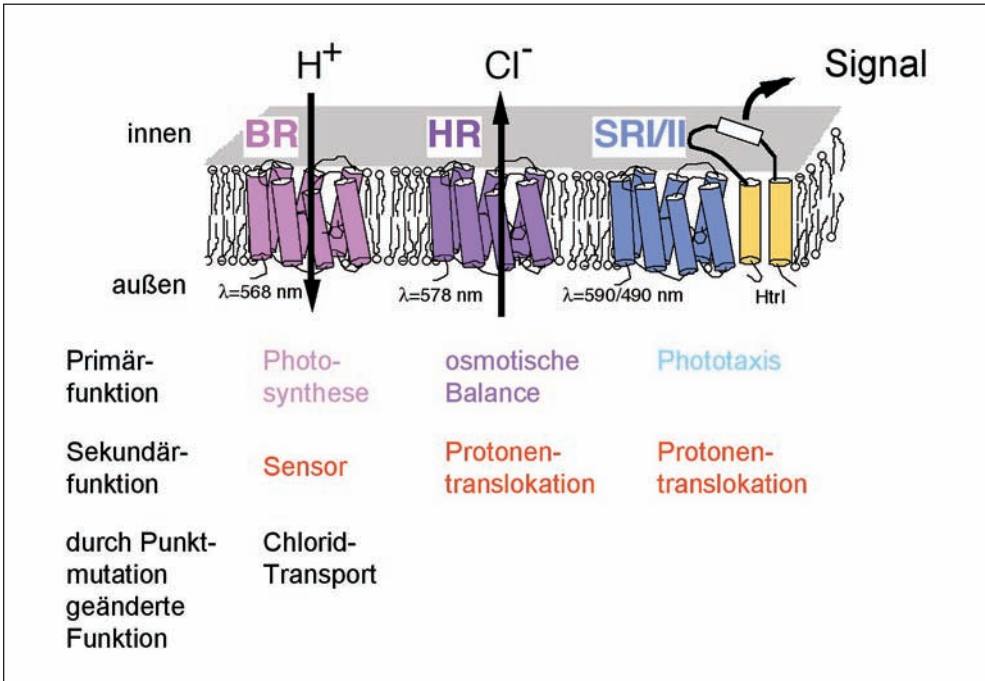


Abb. 12 Die verschiedenen Funktionen archaealer Retinalproteine. Die rot dargestellten sekundären Funktionen der Moleküle sind nur für das Bakteriorhodopsin von physiologischer Bedeutung, weil es in Zusammenarbeit mit einem protomotorischen Kraftsensor Schwarz-Weiß-, d. h. Lichtintensitätserkennung vermittelt. Die Fähigkeit zur Protonentranslokation der anderen Retinalproteine hat nur mechanistische Bedeutung und wurde biophysikalisch *in vitro* nachgewiesen. Ebenso ist die punktmutierte Protonenpumpe D85T des Bakteriorhodopsins, die zum Chloridtransport befähigt ist, ein genetisches Konstrukt, das wesentlich für die Beweisführung des Minimalprinzips genetischer Variation bei verschiedener Funktionsausbildung diente.

der Zelle hinaus und erzeugt damit den bereits erwähnten elektrochemischen Gradienten. Er energetisiert die ATP-Synthase, die einen Anstieg der ATP-Konzentration bewirkt, der für metabolische und Wachstumsprozesse genutzt wird.

Obwohl die Details der Protonentranslokation in Bakteriorhodopsin heute bis in den subÅ-Bereich bekannt sind, soll der Mechanismus dieser vektorialen Katalyse nur kurz beschrieben werden. Die Absorption eines Photons im aktiven Zentrum löst eine trans-cis-Isomerisierung aus, der ein Protonentransfer von der Schiff'schen Base des Retinals auf eine Carboxylatgruppe (D85) im extrazellulären Halbkanal des Proteins folgt. Nach Reorientierung des aktiven Zentrums zum zytoplasmatischen Halbkanal des Moleküls findet Wiederaufnahme des Protons über Asparaginsäure (D)96 statt, und nach Reorientierung und Reorientierung des aktiven Zentrums zur Außenseite wird unter Äquilibration aller protonierten Gruppen mit dem Außenmedium der Ausgangszustand wieder erreicht. Die noch kürzere Fassung dieser Art von Photosynthese lautet: Photonen treiben eine Art mechanisches Mühlrad, das Protonen nach außen schaufelt und einen Anstieg der protomotorischen Kraft der Zelle erzeugt. Sie ist die Quelle der ATP-Synthase, und diese steht im Zentrum aller Lebensprozesse. Der Mole-

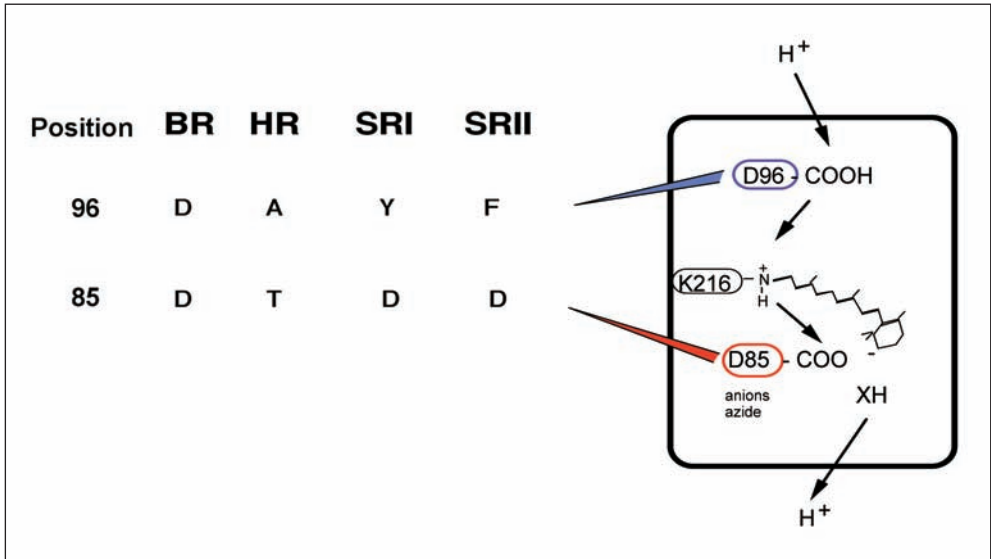


Abb. 13 Zwei Aminosäurepositionen sind die Signatur der Retinalproteinfunktion. BR – Bakteriorhodopsin, HR – Halorhodopsin, Sensorrhodopsin I – SRI, Sensorrhodopsin II – SRII, A – Alanin, Y – Tyrosin, F – Phenylalanin, T – Threonin

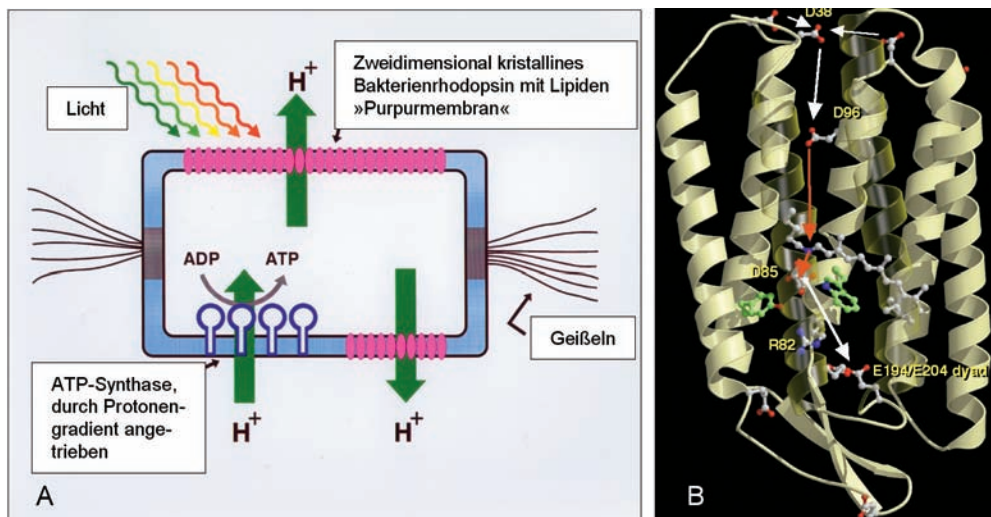


Abb. 14 Schema der Photosynthese in halophilen Archaeen (A) und molekularer Mechanismus der vektoriellen Protonentranslokation durch Bakteriorhodopsin (B). Die Pfeile im rechten Teil des Bildes zeigen den Weg der Protonen von innen nach außen und die wichtigsten Aminosäureseitenketten, die sich am Transfer beteiligen. Die Protonentranslokation startet im Zentrum mit Übertragung des Protons von der Schiffischen Base auf D85. Als weiße Pfeile sind die Protonentransferreaktionen dargestellt, die zur Reäquilibration der Protonierungszustände führen, um den Ausgangszustand zu erreichen.

külkomplex, durch dessen Wirkung die protomotorische Kraft zur ATP-Synthese genutzt wird, ist ein rotatorischer vektorieller Katalysator (Abb. 15). Der membrangebundene Teil läßt Protonen durch die Membran strömen und versetzt einen Rotor in Drehung. Auf dem Rotor sitzt ein gekrümmter Proteinstab (die γ -Untereinheit des Komplexes), der durch seine Drehung im Inneren des in der Membran verankerten Komplexes ($\alpha_3\beta_3$ -Untereinheit) diesen zur ATP-Synthese durch zyklischen Konformationswechsel zwingt. In einem nanobiotechnologischen Versuch wurde dieses rotatorische Prinzip besonders eindrucksvoll bestätigt und ist in Abbildung 16 gezeigt (zur Erklärung siehe Legende dort).

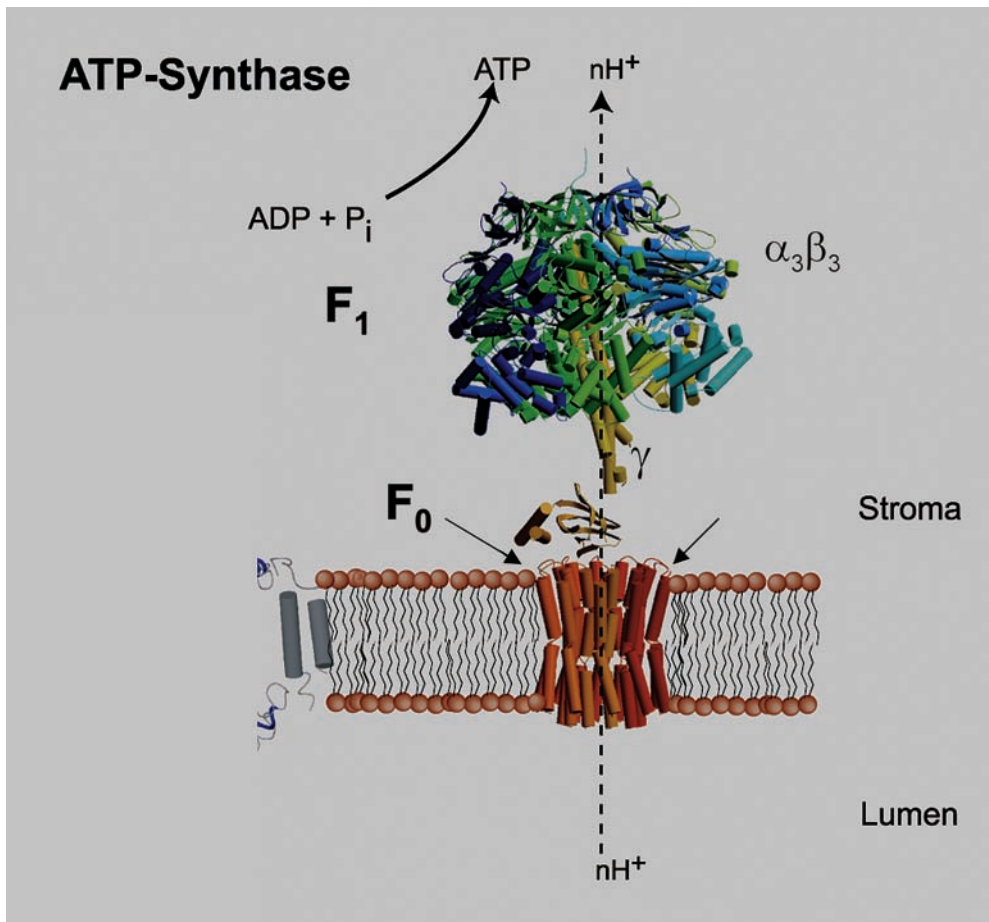


Abb. 15 Die molekulare Struktur der ATP-Synthase aufgeteilt in den membrangebundenen F₀- und den ins Zytoplasma reichenden F₁-Teil, in dem die Katalyse der ATP-Bildung stattfindet. Die durch den F₀-Teil strömenden Protonen versetzen die γ -Untereinheit, die sich auf dem durch die Protonen in Rotation versetzten Rotor befindet, in die Lage, im Inneren des $\alpha_3\beta_3$ -Komplexes der F₁-Untereinheit Konformationswechsel zu erzwingen, die zur ATP-Synthese führen. (Mit freundlicher Genehmigung von W. SAENGER)

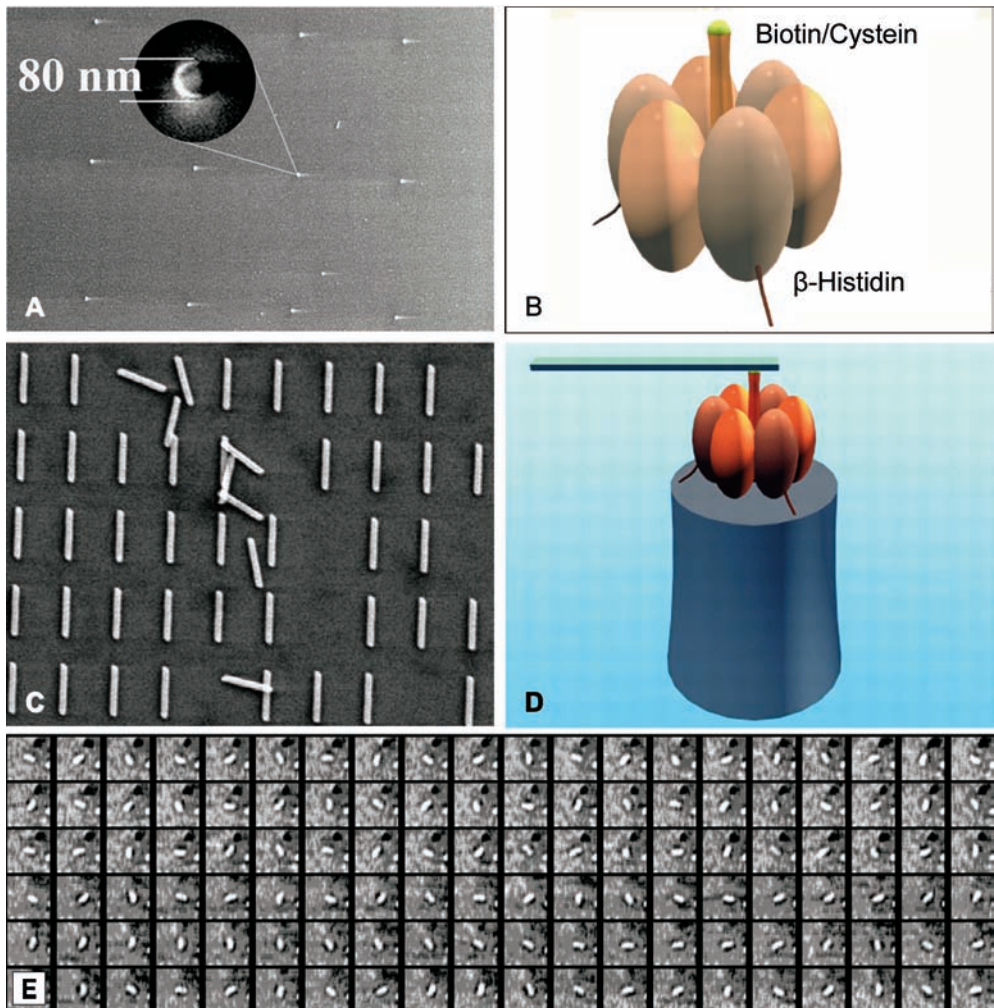


Abb. 16 Nanotechnologie mit der ATP-Synthase. Durch lithographische Verfahren werden auf einer Goldoberfläche kleine Nickelpfosten aufgebracht, an die durch spezifische Wechselwirkung mit einem Histidinschwanz die $\alpha_3\beta_3$ -Untereinheit fixiert wird. Nach Zugabe der γ -Untereinheit, die der rotierende Stab ist, werden an diesen über eine Biotin-Cysteinfixierungsmethode die in (C) gezeigten mikroskopisch sichtbaren Nickelstäbe angebracht. Durch Umkehr des natürlichen Vorganges der ATP-Synthase, d. h. ATP-Hydrolyse, wird nun die Rotation der γ -Untereinheit in Gang gesetzt, wie in (D) gezeigt ist. (E) Drehen der Nanostäbe. (Nach SOONG et al. 2001; © Science/AAAS 2001, mit freundlicher Genehmigung)

Den Gegensatz zur ‘mechanischen’ Photosynthese mit Bakteriorhodopsin, die auf einer licht-induzierten und reversiblen Strukturänderung ihres Chromophors Retinal beruht, hat die Natur mit der elektronentransporttreibenden und chlorophyllabhängigen Photosynthese erfunden. Abbildung 17 zeigt die Analogie des biologischen und des technischen Prozesses, wie er in Halbleitern abläuft. Die Absorption des Photons bewirkt die Abtrennung eines Elektrons aus dem Chlorophylldimer im Reaktionszentrum und aus der P-Leiterebene in einem Halb-

leiter. In beiden Fällen finden die Prozesse im ps-Bereich statt und werden gefolgt von irreversiblen Schritten, die durch ein vorgegebenes räumliches Arrangement strukturchemisch im Protein oder strukturphysikalisch im Halbleiter bewirken, daß der Vorgang irreversibel wird. Das Elektron kann nicht zum Ausgangsort zurück, sondern muß, auf ein höheres Energieniveau gehoben, einen Weg antreten, der einen Großteil der absorbierten Energie zu speichern erlaubt. Dies geschieht im N-Leiter der Photodiode oder in den Proteinstrukturen der Reaktionszentren. Das zurückgebliebene positive Loch wird durch die entstandene Photospannung später mit niederenergetischen Elektronen wieder aufgefüllt. Die Struktur des bakteriellen Reaktionszentrums der Photosynthese in Eubakterien ist im atomaren Detail bekannt und parallel zur Aufklärung durch MICHEL und DEISENHOFER haben wir in München die molekulare Genetik des Reaktionszentrums von *Rhodospseudomonas viridis* aufgebaut und wesentliche Details des primären Elektronentransportes geklärt. Der Gesamtzusammenhang der Energieumwandlung im einfachsten chlorophyllhaltigen System (Abb. 18) läßt sich anschaulich mit Motor, Pumpe und Verbraucher umschreiben. Im Reaktionszentrum werden im lichtgetriebenen "Motor" Elektronen auf Ubichinon übertragen, das entstandene Ubichinol verläßt das Reaktionszentrum und wird im Cytochrom bc_1 -Komplex als "Pumpe" reoxidiert, wobei Protonen von innen nach außen bewegt werden. Diese werden wie die von Bakteriorhodopsin translozierten Protonen im "Verbraucher" ATP-Synthase durch Retranslokation ins Innere zur ATP-Synthese genutzt. Ausgelassen in der Abbildung ist die Rückfütterung der Elektronen in das sozusagen einsam gebliebene, weil positiv geladene Reaktionszentrum. Diesen Prozeß übernimmt das Cytochrom c, das die Elektronen, inzwischen energieärmer, vom bc_1 -Komplex übernimmt und sie zum speziellen Chlorophyllpaar im Reaktionszentrum P zurücklaufen läßt.

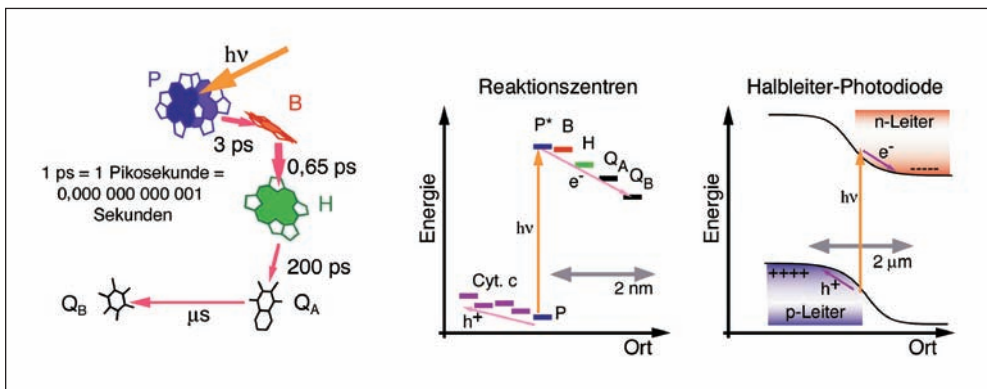


Abb. 17 Elektronenfluß in photosynthetischen Reaktionszentren der Eubakterien und Halbleiterphotodioden als technische Analoga. (Nach ZINTH 2000 aus *Deutsche Physikalische Gesellschaft* 2000)

Es stellt sich hier die Frage, warum in der Natur die Retinalphotosynthese der Chlorophyllphotosynthese mengenmäßig offenbar unterlegen ist. Die Vorteile der letzteren lassen sich einfach aufzählen. Der beschriebene zyklische Elektronentransportprozeß im Chlorophyllsystem erlaubt eine doppelt so große photonische Energieausnutzung, denn im Gesamtprozeß werden zwei Protonen statt einem Proton, wie in Bakteriorhodopsin, pro Photon gegen das

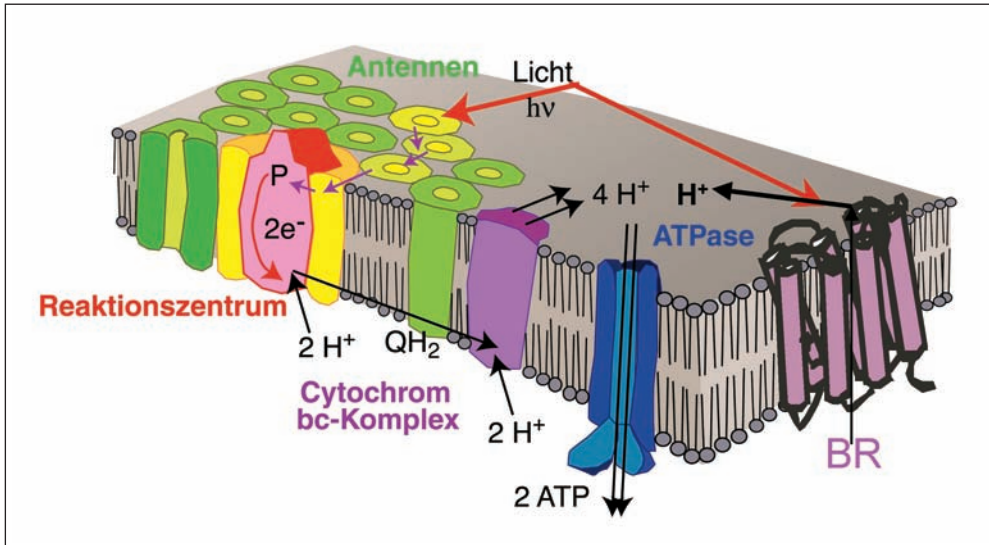


Abb. 18 Das Zusammenspiel der drei Komplexe bakterieller Photosynthese: Reaktionszentrum (»Motor«), Cytochrom bc₁-Komplex (»Pumpe«) und ATP-Synthase »Verbraucher«. Die archaeale Photosynthese mit Bakteriorhodopsin (BR) ersetzt in dem Bild von Motor, Pumpe und Verbraucher Motor und Pumpe, die es durch seine Wirkung als lichtgetriebene Protonenpumpe vereinigt. (Modifiziert nach ZINTH 2000 aus *Deutsche Physikalische Gesellschaft* 2000)

gleiche Potential über die Membran transportiert. Der zweite wesentliche Vorteil liegt in der Ausnutzung des Antennenprinzips. Eine Photodiode gewinnt ihren Vorteil vor allen anderen Möglichkeiten der Sonnenenergieumwandlung durch ihre Schwärze, d. h. die Totalabsorption einfallenden Lichtes. Bakteriorhodopsin ist purpurfarben, und die chlorophyllhaltigen Systeme sind grün. Im Gegensatz zum Bakteriorhodopsin besitzen chlorophyllhaltige Systeme ein Antennensystem, d. h. Absorber, die die spektrale Breite und die absorptive Fläche des Reaktionszentrums vergrößern. Diese lichtsammelnden, chlorophyllhaltigen Moleküle bilden Ringe, die um oder nahe dem Reaktionszentrum in der Membran lokalisiert sind (Abb. 19). Man kann zeigen, daß auch *in vitro* nach Isolierung der Komponenten von den Antennen absorbierte Energie durch sukzessiven Transfer schließlich vom Reaktionszentrum eingefangen wird.

Die Details des Reaktionszentrums und des lichtinduzierten Elektronentransfers in seinem Inneren sind über die Jahrzehnte in Dutzenden von Laboratorien in aller Welt geklärt worden und haben uns auch verstehen lassen, warum die Effizienz der photochemischen Reaktion nahe 100 % liegt. In konsekutiven Reaktionen wird nach Photonenabsorption aus dem angeregten Zustand das Elektron im ps-Bereich über kurze und dann über immer längere Distanzen in immer größeren Zeitabständen von dem zurückbleibenden positiv geladenen speziellen Paar entfernt, daß eine Rückreaktion nicht mehr möglich ist (Abb. 20). Durch Mutation von Resten, die auf dem Weg des Elektrons liegen und diesen Optimierungsprozeß mit bewerkstelligen, konnte dieses Prinzip verständlich gemacht werden.

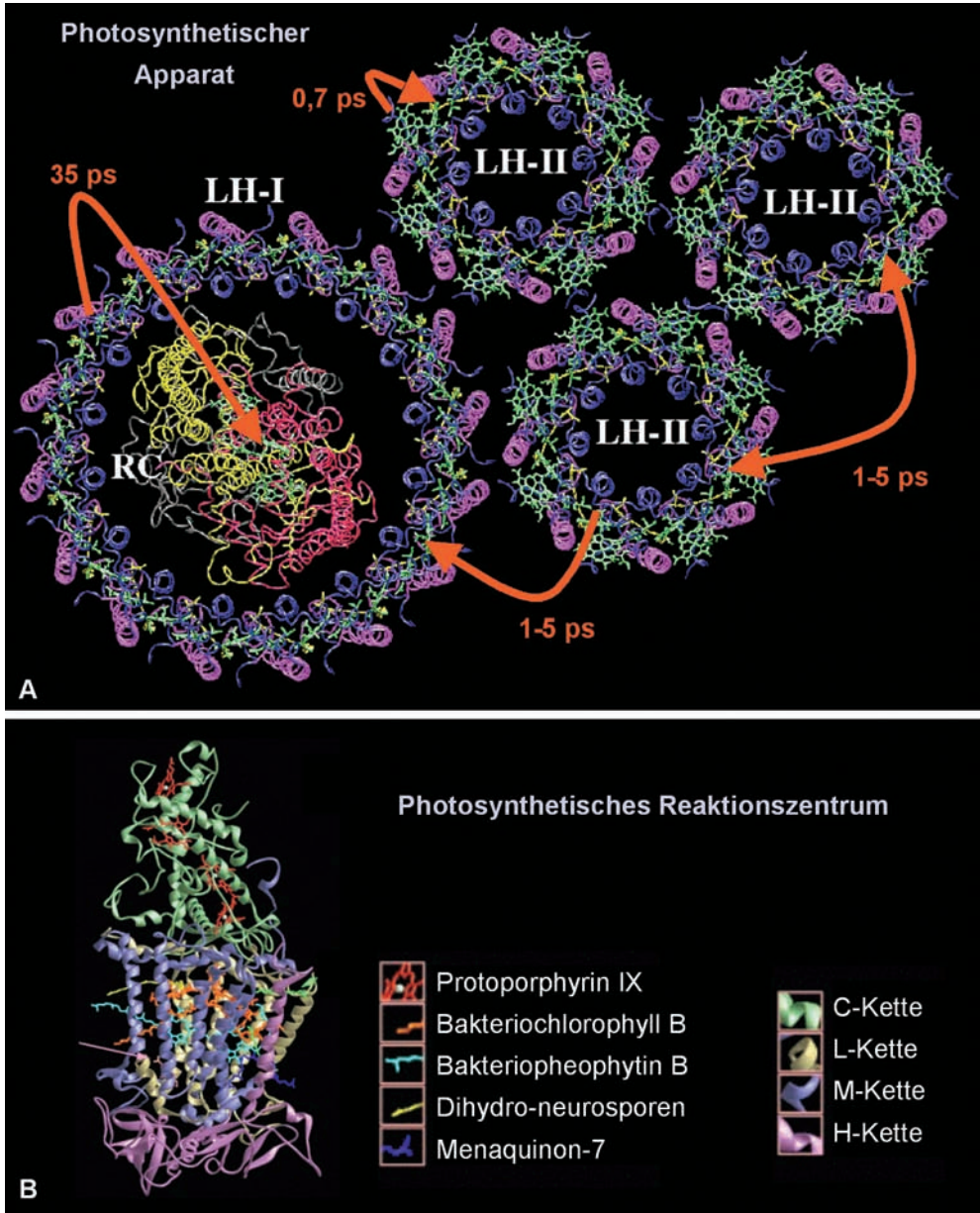


Abb. 19 Die lichtsammelnden Komplexe der bakteriellen Photosynthese (A) und die Struktur ihres Reaktionszentrums in Purpurbakterien (B). In den Antennen absorbierte Photonen wandern innerhalb der Ringe des LH2-Systems mit 0,7 ps und zwischen solchen molekularen Ringen mit 1,5 ps hin und her und verlieren dabei keine Energie. Treffen sie auf einen LH1-Ring, der das Reaktionszentrum umgibt, können sie mit derselben Geschwindigkeit die photo-nische Energie an diesen abgeben, der seinerseits in etwa 35 ps die Energie schließlich an das Reaktionszentrum ab-gibt, wo daraufhin Elektronentrennung stattfindet. (Mit freundlicher Genehmigung von J. WACHTVEITL)

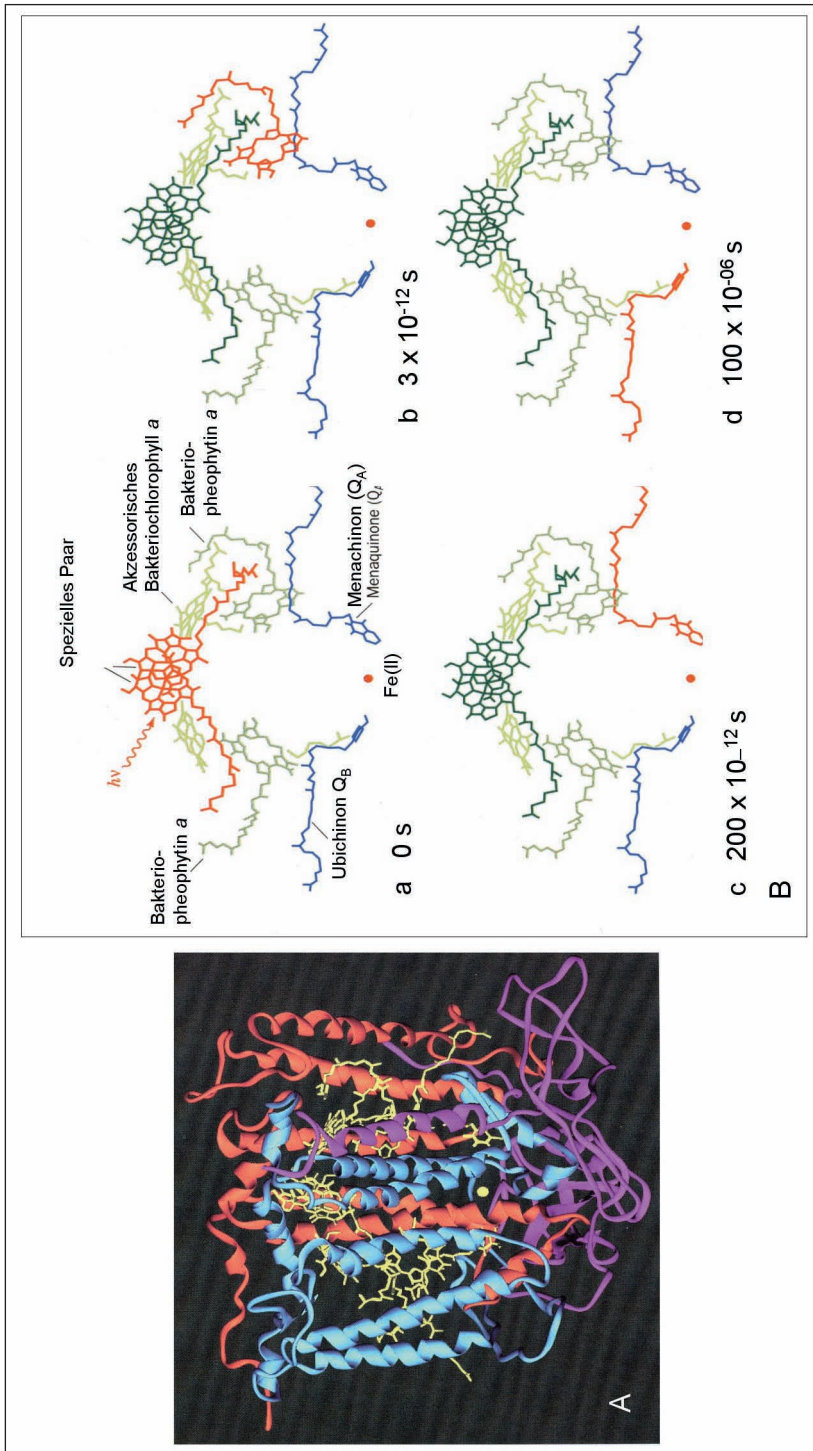


Abb. 20 Struktur des Reaktionszentrums der bakteriellen Photosynthese (A) und die Anordnung der am Elektronentransfer sich beteiligenden Pigmente (B). Spezielles Paar, akzessorisches Bakteriochlorophyll, Bakteriopheophytin, Menachinon und Ubichinon. Die Elektronentransferschritte verlangsamen sich sukzessive vom ps- bis in den ms-Bereich. (Mit freundlicher Genehmigung von J. WACHTVEITL)

Die oxygene Photosynthese war mehr als nur die weitere Optimierung bestehender Systeme. Selbst photolithotrophes Wachstum mit Schwefelwasserstoff als Reduktans konnte mit den vorhandenen Molekülen, also den Reaktionszentren der Eubakterien bewerkstelligt werden. Beim Übergang zu Wasser als Reduktans wird jedoch das Redoxpotential des Elektronendonator/Akzeptorpaars auf 0,816 V angehoben (Abb. 21). Da im Gesamtprozeß gleichzeitig der universelle Elektronendonator NADPH mit einem Redoxpotential von etwa $-0,4$ entstehen soll, mußte die Natur zwei gekoppelte Photosysteme entwickeln, weil die Energie eines Photons für den Gesamthub im Redoxpotential nicht mehr ausreichte. Diese beiden gekoppelten Photosysteme I und II bewirken eine Potentialänderung von fast 2,5 V und sind als konsekutiver Ablauf des Elektronenflusses im sogenannten 'Zickzackschema' der Photosynthese in der Abbildung gezeigt. Über die Kopplung zweier Photosysteme hinaus mußte auch noch das Problem gelöst werden, aus zwei Wassermolekülen in vier konsekutiven Photonenabsorptionsschritten vier Elektronen freizusetzen, um ein Sauerstoffmolekül entstehen zu lassen. Dies geschieht in einem Mangankomplex des Photosystems II, dem nach Photonenabsorption vom positiv geladenen Chlorophyllmolekül, P680, konsekutiv die Elektronen entzogen werden. Im angeregten Zustand, P680*, gibt das Chlorophyll Elektronen über eine Kette von Pigmenten ab, die nicht nur chemisch, sondern auch in ihrer Anordnung den Pigmenten im Reaktionszentrum der Eubakterien ähnelt. Die Struktur und räumliche Anordnung der zwei wesentlichen Polypeptidketten, die hier D1 und D2 statt L und M genannt werden, zeigt die evolutionäre Verwandtschaft des Photosystems II mit dem Reaktionszentrum der Bakterien. Ebenso wie in Bakterien werden die Elektronen von einem Ubichinon übernommen und über eine Zwischenkette von Cytochromen und Plastocyanin zum Photosystem I geleitet, das in Form seines Zentrums P700 bei Photonenabsorption das stärkste biologische Reduktionsmittel mit einem Redoxpotential von fast $-1,4$ V erzeugt und über Zwischenprodukte, meist Eisen-Schwefelzentren im Photosystem I, schließlich die Elektronen auf NADP überträgt. Der Gesamthub durch die Kopplung der beiden Photosysteme beträgt damit etwa 2,5 V und die genutzte Energie etwa 1,2 V. Der Rest dient dem irreversiblen Ablauf des Gesamtprozesses.

Wenn auch noch nicht in solchem Detail wie das Reaktionszentrum der Bakterien, so sind doch sowohl das Photosystem I wie auch Photosystem II inzwischen strukturell sehr gut bekannt und schematisch in ihrer ganzen Komplexität in Abbildung 25 dargestellt. Das Resultat ist aber mehr als nur die Oxydation von Wasser und die Reduktion von NADP für biosynthetische Prozesse. Die ATP-Bildung wird in sehr ähnlicher Weise wie in den Bakterien (siehe Abb. 22) durch Protonentranslokation an den Elektronentransport gekoppelt. Der Protonentransport wird durch den Cytochrom b_6F -Komplex vermittelt, der dem Cytochrom bc_1 -Komplex der Bakterien sehr stark ähnelt und die protomotorische Kraft in der schon beschriebenen ATP-Synthase zur ATP-Synthese genutzt. So stellt sich die Evolution der Photosynthese als ein Optimierungsprozeß zur Nutzung der Lichtenergie der Sonne dar, der mit zunehmender Effizienz zunehmende Komplexität erfordert. Während der Primärprozeß in allen drei geschilderten Photosystemen nahe 1 liegt, ist die Ausnutzung der Lichtenergie sehr verschieden und die Nutzung des unerschöpflichen Elektronendonores Wasser nur in Zellen des Pflanzentyps entwickelt. Der Umgang mit Redoxpotentialen von $+1,2$ V bis $-1,4$ V hat jedoch seinen Preis gefordert. Die Schutzmechanismen vor den dabei entstehenden Zwischenprodukten stärkster chemischer Reaktivität zwangen die Natur zu einem hohen Aufwand, der in einem letzten Beispiel schlaglichtartig beleuchtet werden soll. Im Photosystem I sind in der Umgebung des oxidierten P680-Chlorophyllmoleküls Nebenreaktionen nicht zu vermeiden. Sie führen zur Zerstörung der Polypeptidkette D1, die den Weltrekord an

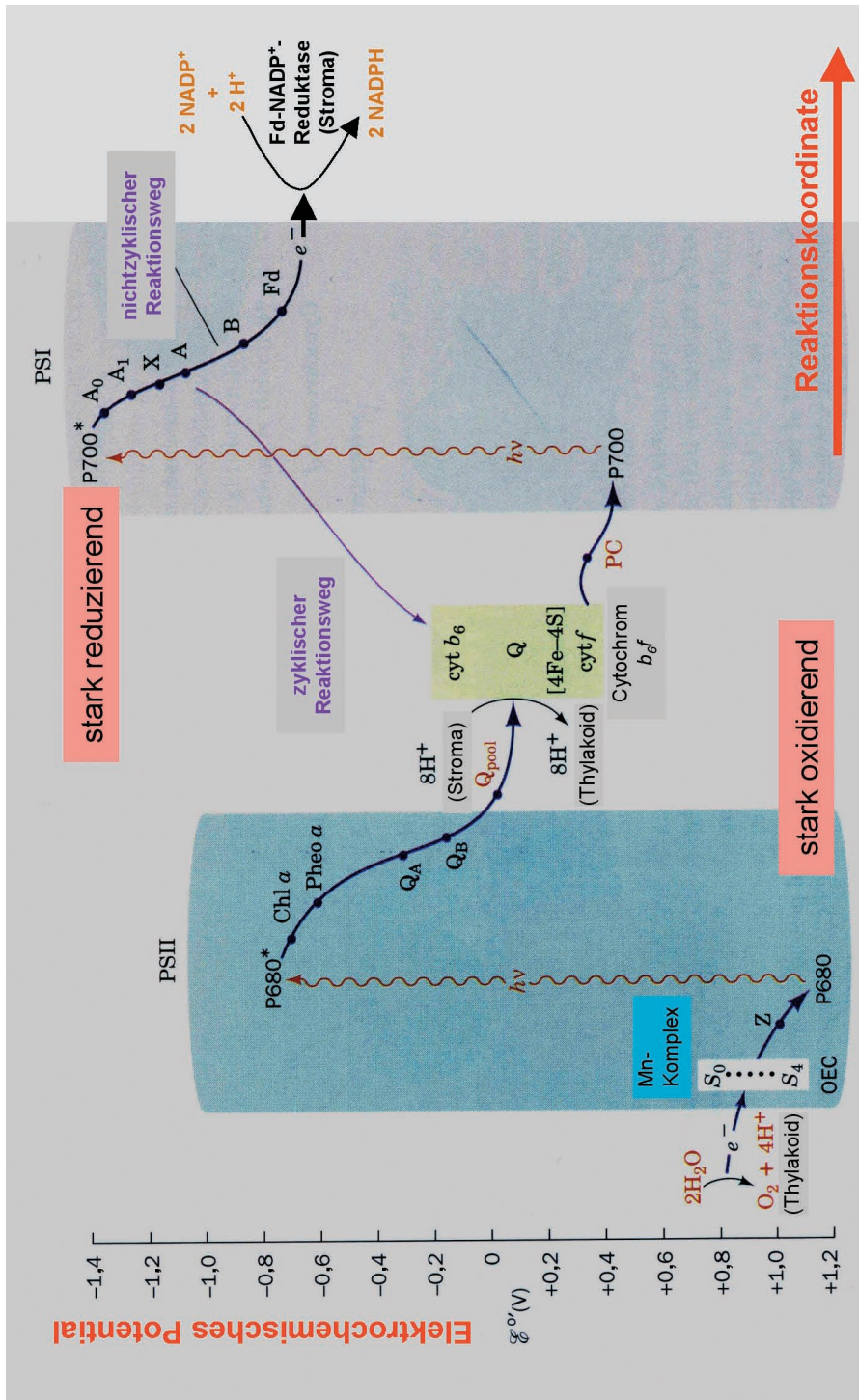


Abb. 21 Das 'Zickzackschema' der pflanzlichen Photosynthese. Die Details der lichtgetriebenen Wasserspaltung und Kooperation der beiden Photosysteme zur Reduktion des NADP's sind im Text beschrieben. (Mit freundlicher Genehmigung von W. SAENGER)

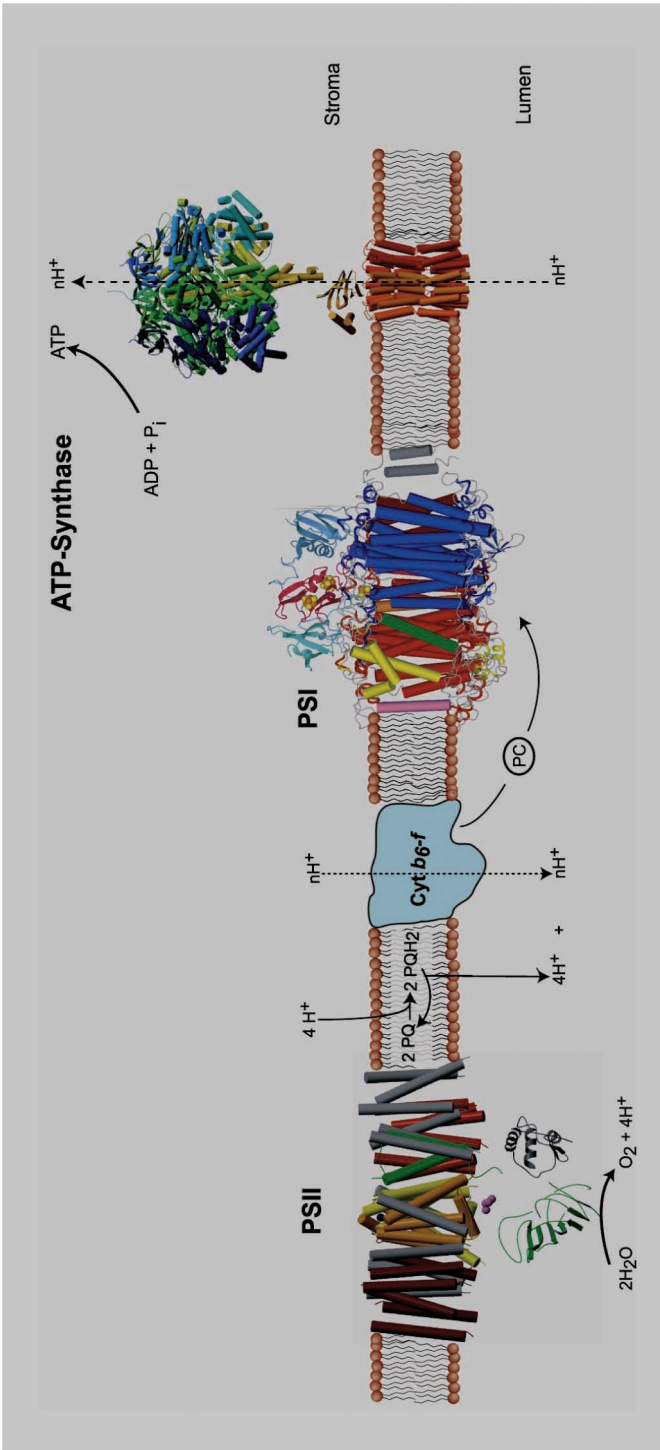


Abb. 22 Die Kooperation von Photosystem II, Cytochrom b₆-f-Komplex, Photosystem I und ATP-Synthase in der pflanzlichen Photosynthese. (Mit freundlicher Genehmigung von W. SAENGER.) PSI: 2,5 Resolution: JORDAN et al. 2001; PSII: 3,8 Resolution: ZOUNI et al. 2001, 3,7 Resolution: KAMIYA und SHEN 2003

Proteinerneuerung in einer Zelle darstellt. Permanent oxidativ zerstört, wird D1 im Gesamtkomplex, ohne diesen zu zerlegen, immer wieder durch neue Synthese und Wiedereinfügen repariert und so der photosynthetische Prozeß ungestört in Gang gehalten.

Damit bin ich mit dem kurzgefaßten Überblick des evolutionären Prozesses von biologischer Lichtenergieumwandlung auf diesem Planeten zu Ende. Möge sie zu weiterem Nachlesen anregen.

Literatur

- Deutsche Physikalische Gesellschaft* (Ed.): Physik, Themen, Bedeutung und Perspektiven physikalischer Forschung. Bad Honnef: Deutsche Physikalische Gesellschaft 2000
- JORDAN, P., FROMME, P., WITT, H. T., KLUKAS, O., SAENGER, W., and KRAUSS, N.: Three-dimensional structure of cyanobacterial photosystem I at 2.5 Å resolution. *Nature* 411, 909–917 (2001)
- KAMIYA, N., and SHEN, J.-R.: Crystal structure of oxygen-evolving photosystem II from *Thermosynechococcus vulcanus* at 3.7-Å resolution. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100, 98–103 (2003)
- MICHAL, G. (Ed.): *Biochemical Pathways*. Heidelberg: Spektrum Akad. Verlag 1999
- MORRISON, R.: *Australia, Land beyond Time*. Sydney, Oakland, Cape Town: Reed New Holland Publishers 2002 (Ithaca (NY), London: Cornell University Press 2002)
- SOONG, R. K., BACHAND, G. D., NEVES, H. P., OLKHOVETS, A. G., CRAIGHEAD, H. G., and MONTEMAGNO, C. D.: Powering an inorganic nanodevice with a biomolecular motor. *Science* 290, 1555–1558 (2001)
- WOESE, C. R., KANDLER, O., and WHEELIS, M. L.: Towards a natural system of organisms: Proposal for the domains archaea, bacteria, and eucarya. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 87 (12), 4576–4579 (1990)
- ZOUNI, A., WITT, H. T., KERN, J., FROMME, P., KRAUSS, N., SAENGER, W., and ORTH, P.: Crystal structure of photosystem II from *Synechococcus elongatus* at 3.8 angstrom resolution. *Nature* 409, 739–743 (2001)

Prof. Dr. Dieter OESTERHELT
Direktor
Max-Planck-Institut für Biochemie
Abteilung Membranchemie
Am Klopferspitz 18a
82152 Martinsried
Bundesrepublik Deutschland
Tel: +49 89 85782387
Fax: +49 89 85783557
E-Mail: oesterhe@biochem.mpg.de

Mitochondrien: Energiewandler für die Organisation des Lebendigen

Walter NEUPERT (München)

Mitglied der Akademie

Mit 11 Abbildungen



Zusammenfassung

Aufrechterhaltung und Vermehrung von Leben bedarf der dauernden Zufuhr von Energie. »Grüne« Organismen können das Sonnenlicht durch Photosynthese in chemische Energie umwandeln. Andere Organismen müssen Nahrungsstoffe aufnehmen und durch deren Umsatz mit Sauerstoff in einer besonderen Form der Oxidation nutzbare Energie gewinnen. Dies gilt für Bakterien sowie für niedere und höhere Organismen, die aus kernhaltigen Zellen zusammengesetzt sind.

Zwei Formen von generell nutzbarer Energie treiben alle Lebensvorgänge an: *erstens* ein Konzentrationsgradient von Protonen über biologische Membranen, der eine protonenmotorische Kraft (PMF) bedingt; und *zweitens*, die im Adenosintriphosphat (ATP) gespeicherte Energie stellt die Tausenden von zellulären Reaktionen verwendete »Energiewährung« dar.

Die Prozesse der Oxidation und der ATP-Synthese laufen in gekoppelter Weise ab, man spricht von oxidativer Phosphorylierung. Diese findet in besonderen zellulären Substrukturen statt, den Mitochondrien. Mitochondrien sind im Zuge der Evolution aus endosymbiotischen α -Proteobakterien entstanden und haben in die aufnehmende Vorläuferzelle den enzymatischen Apparat der oxidativen Phosphorylierung »mitgebracht«. Mitochondrien werden deshalb auch häufig als Kraftwerke der Zellen angesprochen. Diese Bezeichnung ist keineswegs hoch gegriffen: Die Gesamtheit der menschlichen Mitochondrien erbringt eine Leistung von mehreren hundert Gigawatt. Die Mitochondrien stellen die von ihnen gewonnene Energie der gesamten Zelle mit allen ihren diversen weiteren Zellorganellen zur Verfügung.

Die Erzeugung des Protonengradienten über die Innenmembran der Mitochondrien und deren Verwendung zur Synthese von ATP erfolgt durch »molekulare Maschinen«. Diese treiben darüber hinaus unter Verwendung der chemischen Energie der ATP-Hydrolyse nahezu alle chemischen Reaktionen in der Zelle an. Solche Maschinen setzen sich aus einer Vielzahl von Proteinen zusammen. Diese weisen in vielerlei Hinsicht erstaunliche Analogien zu den von Ingenieuren konstruierten Maschinen der technischen Welt auf. So existieren ATP-getriebene molekulare Motoren, die Lasten transportieren; Ventile, die die Passage von kleineren und größeren Molekülen regulieren; kontrahierende, Bewegung erzeugende Maschinen; Energie-transduzierende Maschinen; und chemische Synthesemaschinen von enormer Vielseitigkeit und Spezialisierung.

Abstract

Maintenance and reproduction of life needs permanent supply of energy. Plants are able to convert the energy of sunlight into chemical energy. Other organisms have to take up and digest nutrients in order to generate usable forms of energy. Many types of bacteria and virtually all higher organisms use oxidation of compounds derived from nutrients as the major pathway for energy transduction. In this way, two forms of energy are produced which promote virtually all activities of animal life: First, a concentration gradient of protons across biological membranes is generated, which represents a proton motive force (PMF). In a second reaction, the energy of the PMF is stored in the molecule adenosine triphosphate (ATP), the »universal energy coin« for a myriad of chemical reactions within the cell.

The two processes, generation of PMF powered by oxidation, and synthesis of ATP are usually coupled to each other, only for a few cellular processes PMF can be used directly. The overall reaction is called oxidative phosphorylation. It takes place in special cell organelles, the mitochondria. These small bodies are often referred to as the »power plants of the cell«. The term is entirely appropriate as e.g. the mitochondria of mankind generate energy of several hundred gigawatt per year. The mitochondria provide this energy to the rest of the cell.

During evolution mitochondria have arisen by endosymbiosis of α -proteobacteria in precursors of the current eukaryotic cells. The bacteria brought along the enzymatic machinery of oxidative phosphorylation.

The generation of the proton gradient across the inner membrane of mitochondria and the conversion of energy contained therein into energy stored in ATP are performed by a series of »molecular machines«. Such molecular machines are composed of a large number of different proteins and cofactors. They display amazing similarities to machines constructed by engineers in our technical world.

Zu den wesentlichen Charakteristika des Lebendigen gehört der Zustand höchster Ordnung (SCHRÖDINGER 1944). Der Austausch einer einzigen Base in der drei Milliarden Basenpaare umfassenden DNA des Menschen kann zu dramatischen Erkrankungen und zum Tod führen. Gleichzeitig stellen Organismen aber offene Systeme dar, sie tauschen Materie und Energie mit ihrer Umgebung aus. Demzufolge besteht kein chemisches Gleichgewicht mit der wesentlich ungeordneteren Umwelt. Um ihre Ordnung aufrechtzuerhalten, müssen daher lebendige Organismen fortlaufend netto Energie aufnehmen. Dies wird drastisch sichtbar, wenn die Energieaufnahme plötzlich gestoppt wird, zum Beispiel durch Unterbrechung der Sauerstoffversorgung oder durch Blockierung der Zellatmung durch Zyanid. Ein schnelles Erlöschen sämtlicher Lebensfunktionen tritt ein. Der Blutkreislauf bricht zusammen, die Muskeln stellen ihre Bewegungen ein, das Gehirn hört auf zu arbeiten.

Welche Art von Energie kann genutzt werden, und wie wird diese Energie für die Lebensvorgänge bereitgestellt? Wenn wir die verschiedenen Formen der auf unserem Planeten zur Verfügung stehenden Energien betrachten, so sind dies: das Sonnenlicht, die beim radioaktiven Zerfall freiwerdende Energie und die Erdwärme. Das Sonnenlicht ist indirekt für eine Reihe vom Menschen genutzter Energiequellen verantwortlich, so für die Wind- und Wasserkraft und die fossilen Brennstoffe. Keine dieser Energieformen ist für den Antrieb der Lebensvorgänge nutzbar, abgesehen davon, daß Wärme aus diesen Prozessen nützlich und erforderlich ist für das Aufrechterhalten einer mit dem Leben vereinbaren Außentemperatur und damit für die Einsparung von Wärmezeugung durch unseren Körper.

Der Energiefluß von der Umwelt in unseren Körper erfolgt durch die Aufnahme von Nahrungsstoffen und von Sauerstoff. Dadurch kann ein Oxidationsprozeß ablaufen. Die freiwerdende Energie macht sich der Körper dann zum Antrieb aller Lebensprozesse nutzbar. Somit ist die Energie des Sonnenlichts letztendlich doch für das Leben aller Organismen auf unserem Planeten unabdingbar. Die Pflanzen können die Energie des Sonnenlichts nutzen, um in einem autotrophen Prozeß sich zu erhalten und zu vermehren (OESTERHELT, vorausgehender Artikel). Sie produzieren Biomasse. Unsere Nahrungsstoffe, selbst wenn sie aus tierischen Quellen stammen, gehen somit immer auf Pflanzen zurück.

Nahrungsstoffe können – chemisch betrachtet – im wesentlichen in drei Gruppen eingeteilt werden: Zucker und Stärke (Kohlenhydrate), Fette (Lipide) und Eiweiße (Proteine). Die Nahrungsstoffe werden oxidiert (verbrannt) zu Kohlendioxid, Wasser und einigen Nebenprodukten wie dem stickstoffhaltigen Harnstoff. In sehr vereinfachter Form könnte der Mensch als eine funktionierende Maschine, als »Homo metabolicus«, dargestellt werden (Abb. 1).

Wenn derselbe Oxidationsprozeß außerhalb des lebenden Organismus abläuft, so wird die Energie in Form von Wärme frei. Da diese, wie oben dargestellt, nicht für unsere Lebensfunktionen verwendet werden kann, muß im Körper ein Energiewandlungsprozeß erfolgen, bei dem für diese Funktionen nutzbare Energie entsteht. Freilich ist – physikalisch betrachtet – letztendlich der Mensch auch nur eine Wärme erzeugende Maschine (wenn man von der Erzeugung potentieller Energie für den Bau zum Beispiel eines langlebigen Gebäudes wie der Pyramiden absieht). Über die Wärmeabgabe kann somit bequem der Energieumsatz des Körpers bestimmt werden, aber dies gibt keine Auskunft über die Energieformen, die im Körper gebildet werden und die mechanischen und chemischen Reaktionen antreiben.

Um diese viel Tausende Reaktionen energetisch zu ermöglichen, hat die Natur eine generell gültige »Energiewährung« erfunden. Dies wurde offenbar sehr früh in der Evolution festgelegt, denn alle Organismen, von den einfachsten Einzellern bis hin zu den komplexen Säugtieren, bedienen sich dieser Münze. Es handelt sich um das ATP. ATP ist aufgebaut aus drei

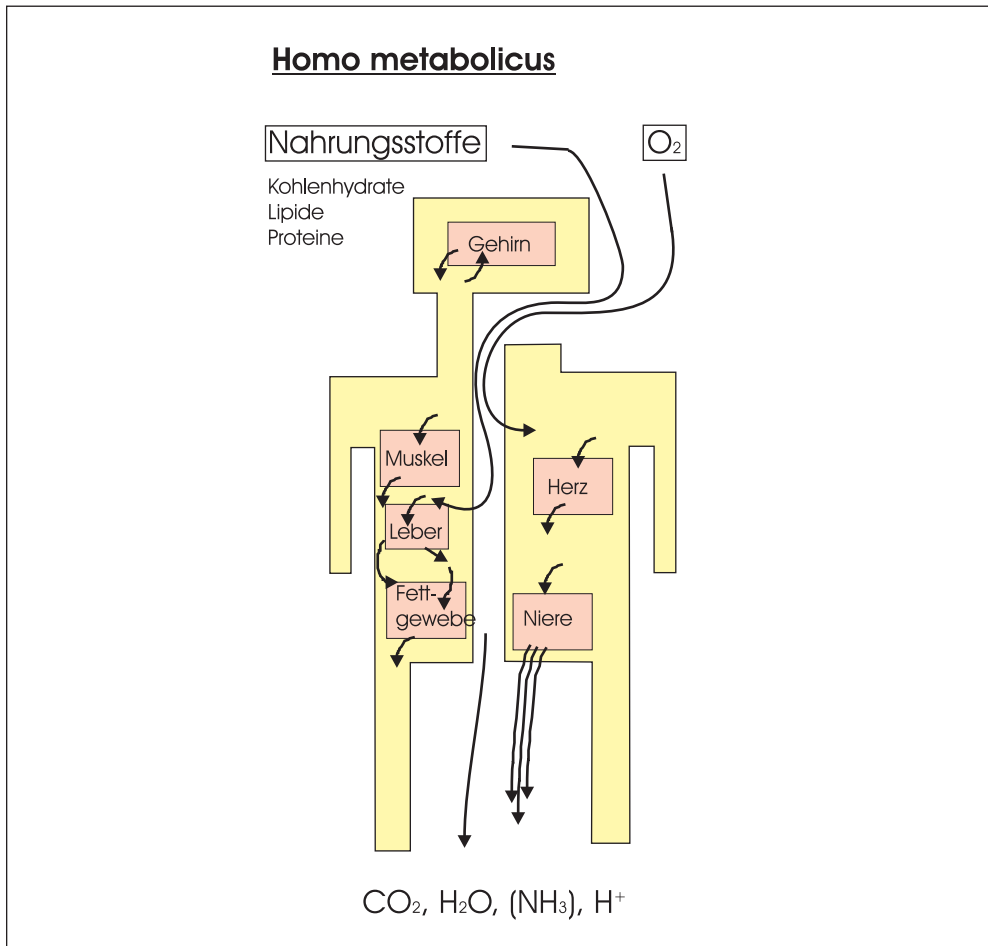


Abb. 1 »Homo metabolicus«: Die Aufnahme der Nahrungsstoffe (Kohlenhydrate, Lipide, Proteine) erfolgt über den Verdauungstrakt, die des Sauerstoffs (O₂) über die Lunge. In den diversen Organen werden die aufgenommenen Bestandteile der Nahrungsstoffe weiter umgebaut und über das Blut ausgetauscht. Schließlich werden sie in der oxidativen Phosphorylierung zu CO₂ und H₂O und außerdem zu Ammoniak umgebaut. Letzterer wird mit CO₂ zu Harnstoff umgewandelt. Die Abbaustoffe werden von Niere und Darm ausgeschieden. Die gewonnene Energie wird in Form von ATP fixiert.

Einheiten (Abb. 2A). Die erste ist eine Purinbase, das Adenin. Die zweite Einheit stellt einen Zucker aus fünf C-Atomen, die Ribose, dar. Sie ist über eine glykosidische Bindung an Adenin geknüpft. Schließlich hängen an der Ribose über eine Esterbindung drei Phosphorsäurereste, die untereinander durch zwei Säureanhydridbindungen verbunden sind. Diese letzteren Bindungen sind diejenigen, in denen Energie gespeichert ist. Bei deren Spaltung wird Energie freigesetzt, die energieerfordernde Prozesse in die gewünschte Richtung treiben kann. Dabei entsteht, in erster Linie, ADP und anorganisches Phosphat (Abb. 2B).

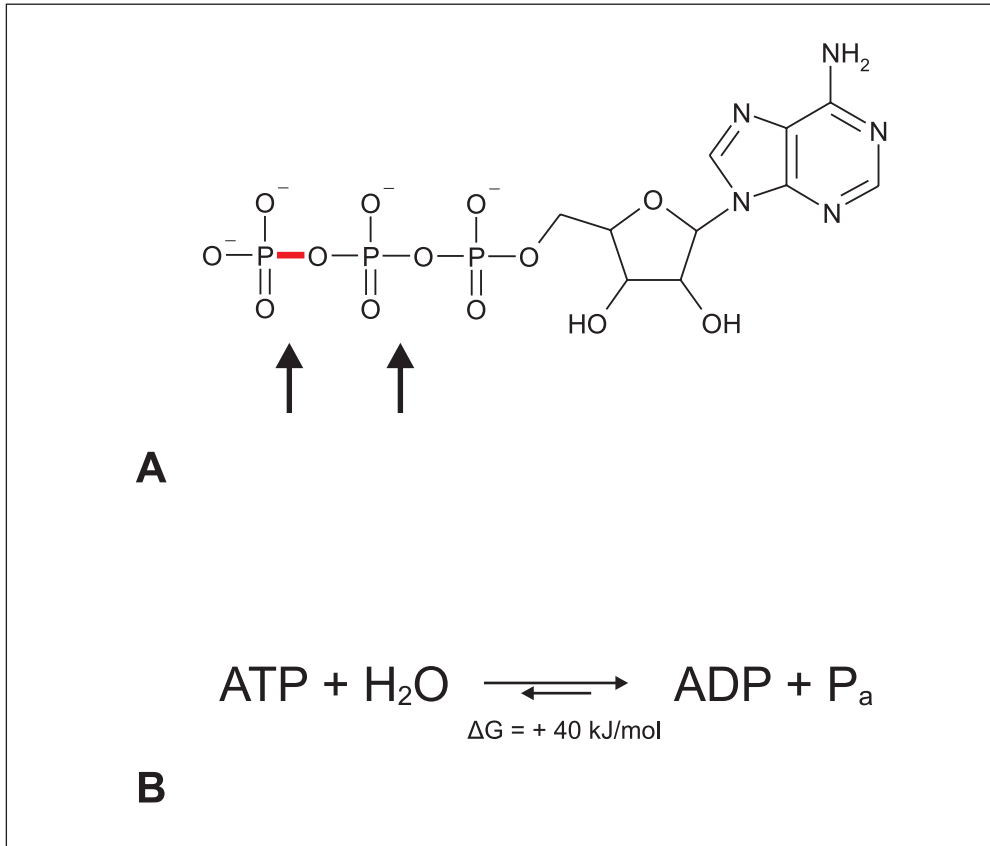


Abb. 2 (A) ATP ist eine energiereiche Verbindung, die aus einem Basenteil (Adenin, *rechts*), einem Zuckeranteil (Ribose, *Mitte*) und einem Triphosphatanteil besteht. Die besonders energiereiche Phosphorsäureanhydridbindung ist rot markiert, aber auch die zweite Phosphorsäureanhydridbindung ist sehr energiereich. Beide Bindungen sind durch Pfeile gekennzeichnet. (B) Die hydrolytische Spaltung von ATP in ADP und anorganisches Phosphat setzt eine Energie von ca. 40 kJ/mol frei, während die Knüpfung dieser Bindung einen Aufwand von Energie in dieser Größenordnung erfordert.

In unserem Körper wird laufend ATP gebildet und verbraucht, also die Reaktion läuft hin und her. Pro Tag stellt der Mensch etwa 60–70 kg ATP her und benützt diese Menge, um die energiereicheren Lebensprozesse anzutreiben. Im Laufe eines 70jährigen Lebens summiert sich diese Menge auf ca. 1200 Tonnen. Die Energie für diese Leistung stammt aus der Oxidation der Nahrungsstoffe. Der tägliche Energieaufwand eines Durchschnittsmenschen bezieht sich auf ca. 8000 kJ.

Das große Rätsel, das die Biochemiker seit der Erkenntnis der Struktur und Funktion des ATP beschäftigte, war: Wie kann die Energie von Oxidationsreaktionen in die Energie für die Ausbildung einer Säureanhydridbindung, also eine Phosphorylierungsreaktion, verwandelt werden? Aus chemischer Sicht haben die beiden Reaktionen nichts miteinander zu tun. Die Frage war also: Wie sind Oxidation und Phosphorylierung miteinander gekoppelt?

Wie nicht anders zu erwarten, war die Aufklärung dieses Rätsels mit zahlreichen Irrwegen verbunden, in anderen Worten mit wissenschaftlichem und persönlichem Streit und Fehden. Die jetzt wohl eindeutige Antwort ist aber relativ einfach. Der Prozeß kann in drei Schritte unterteilt werden:

- Der erste Schritt ist die Nutzung der Energie der Oxidation zur Erzeugung eines Protonengradienten über eine biologische Membran. Dies erfolgt nach der Gleichung:



- Dies ist eine Redoxreaktion: Dem Wasserstoff wird ein Elektron (e^-) entzogen. Das Elektron fließt letztendlich zum Sauerstoff, der dadurch reduziert wird und in einem Wassermolekül endet. Das H^+ -Ion oder Proton wird im Verlauf des Oxidationsprozesses über eine für Protonen undurchlässige Lipidmembran geschafft. Damit wird die im Zuge der Oxidation freiwerdende Energie in Form eines Protonengradienten gespeichert und geht nicht als Wärme verloren.
- Im zweiten Schritt wird die Energie des Protonengradienten, auch als protonenmotorische Kraft (PMF) oder Protonenpotential Δp bezeichnet, in mechanische Arbeit umgewandelt. Dies heißt, eine molekulare Maschine wird angetrieben, Teile eines größeren Komplexes, also einzelne Proteine, bewegen sich gegeneinander.
- Im dritten Schritt wird die mechanische Energie benutzt, um die Nettokondensation von ADP und anorganischem Phosphat zu ATP zu treiben.

Insgesamt wird dieser Prozeß als »oxidative Phosphorylierung« bezeichnet. Um die einzelnen Schritte dieses vielstufigen Vorgangs genauer zu begreifen, muß man die Biochemie der beteiligten Komponenten verstehen. Die Mitochondrien sind diejenigen Organellen aller kernhaltigen Zellen, in denen der hier diskutierte Prozeß der Energieumwandlung stattfindet. Darum nennt man sie die »Kraftwerke der Zelle«. ATP kann zwar auch außerhalb der Mitochondrien gebildet werden, aber die Menge an ATP, die so gewonnen werden kann, würde bei weitem nicht ausreichen, um die Energie für die meisten Zellen des menschlichen Körpers bereitzustellen.

Mitochondrien sind membranbegrenzte Körperchen von ca. 1 μm Durchmesser und variabler Länge und Gestalt. Einige Beispiele für die Vielgestaltigkeit der Mitochondrien sind in Abbildung 3 gezeigt. Die Mitochondrien der Hefe stellen ein verzweigtes und hochvernetztes Gebilde dar (Abb. 3A). Man kann also zu Recht von einem »Chondriom« sprechen, womit die integrale Natur der Mitochondrien betont wird. Mitochondrien ändern laufend ihre Gestalt, sie teilen sich und fusionieren wieder, so daß eine dauernde Mischung von einzelnen Teilen des Chondrioms erfolgt (WESTERMANN 2002). Die Mitochondrien sind zuerst in Säugerzellen entdeckt worden. Aus diesen mikroskopischen Betrachtungen stammt auch die griechische Bezeichnung dieser Organellen: Fadenkörperchen (Abb. 3B). Sie erschienen als langgestreckte schlangenartige Gebilde. Moderne mikroskopische Verfahren, gekoppelt mit den neuesten Methoden der Bildrekonstruktion haben die frühesten Beobachtungen bestätigt (MANNELLA et al. 1997, FREY et al. 2002). Die Mitochondrien sind häufig an den vom Zellkern in die Peripherie ausstrahlenden Mikrotubuli angeordnet, entlang welchen sie sich auch bewegen. Mitochondrien teilen sich und fusionieren kontinuierlich, sie bewegen sich rasch, sind also höchst dynamisch (Film: jcs.biologists.org/cgi/content/full/166/10/2005/DC1). Mit die-

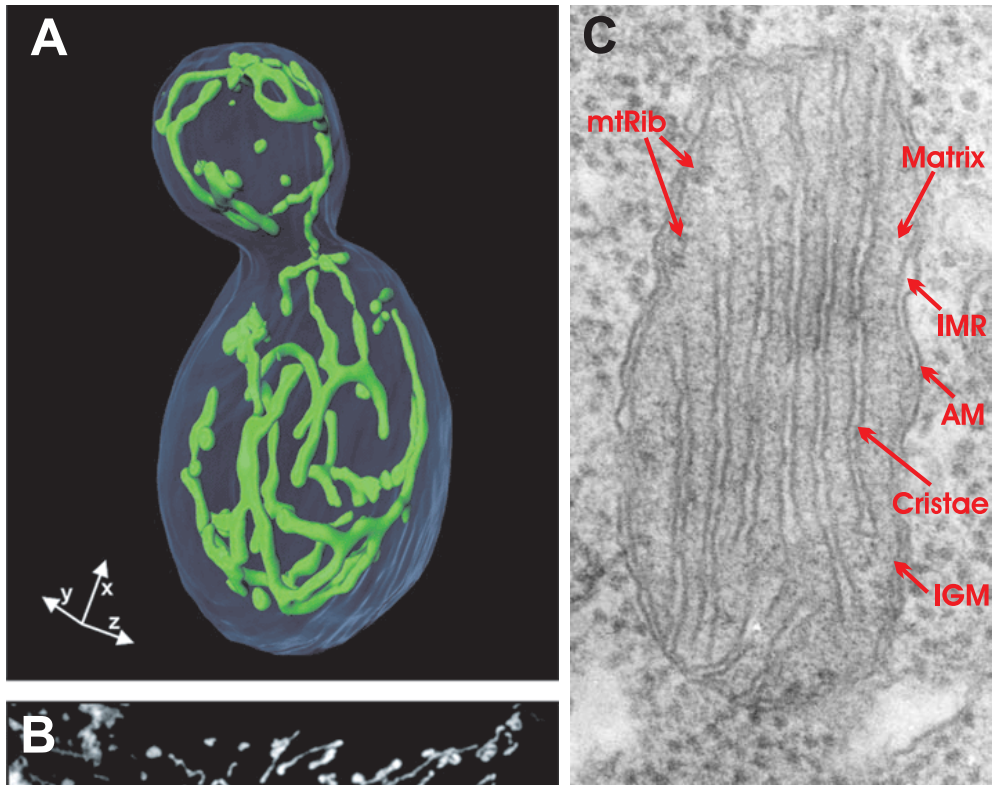


Abb. 3 (A) Die Rekonstruktion des mitochondrialen Netzwerkes in einer knospenden Hefezelle. Unten sieht man die Mutterzelle, oben die Tochterzelle. Die Mitochondrien sind grün dargestellt. Die Rekonstruktion wurde mit Hilfe von floureszenzmikroskopischen Bildern von einer Hefezelle mit farbstoffmarkierten Mitochondrien gewonnen (aus EGNER et al. 2002; mit freundlicher Erlaubnis des Copyright-halters © 2002 National Academy of Sciences USA). (B) Mikroskopische Aufnahme des floureszenzmarkierten Netzwerkes von Mitochondrien in einer Cos7-Zelle (Ansgar SANDNER, mit freundlicher Genehmigung). (C) Elektronenmikroskopisches Bild eines Mikroschnittes durch eine Zelle des filamentösen Schleimpilzes *Neurospora crassa*. Der Ausschnitt zeigt ein Mitochondrium mit den verschiedenen Kompartimenten: AM – Außenmembran; IGM – Innere Grenzmembran; Cristae – Innenmembrancristae; IMR – Intermembranraum; Matrix – mitochondriale Matrix; mtRib – Mitochondriale Ribosomen.

ser Dynamik verbunden ist auch die Weitergabe der Mitochondrien von der Mutter- zur Tochterzelle. Aufgrund des dauernden Wachstums durch Expansion und der dauernden Fragmentierung ist dieser Vorgang der Vererbung der Mitochondrien im wesentlichen ein Aspekt des Transports und der Verteilung in den Raum, den die Tochterzelle einnehmen wird.

Wie sind die Mitochondrien im Lauf der Evolution entstanden? Nach allgemeiner, in vielfacher Weise gut begründeter Auffassung sind die Mitochondrien aus bakterienartigen Vorläuferorganismen hervorgegangen. Danach sind Vorformen der heutigen kernhaltigen Zellen eine Symbiose mit derartigen prokaryotischen, also kernfreien Zellen eingegangen (Abb. 4). Diese Theorie wird als Endosymbiontenhypothese bezeichnet (MARGULIS 1981). Man kann sogar auf Grund einer Fülle von genetischen Daten sagen, von welcher Art von Prokaryoten die Mitochondrien abstammen, nämlich den α -Proteobakterien (ANDERSSON et al. 2003). Die vermutlichen Symbionten entwickelten sich zu Endosymbionten durch dauerhafte Aufnahme in das Innere der Gastzelle. Diese Endosymbionten enthielten die Komponenten zur effizienten Energieumwandlung, d. h. zur Gewinnung von ATP durch Oxidation von Nahrungssubstraten, das hier diskutierte System der oxidativen Phosphorylierung. Mit dem Eingehen der Endosymbiose, ein Vorgang, der vor ca. 1–2 Milliarden Jahren stattgefunden haben muß, erwarb die so neu entstandene Zelle, der Archetyp der heutigen eukaryotischen, kernhaltigen Zelle, vielfache Vorteile. Die Endosymbionten/Mitochondrien gaben dann im Lauf der Zeit ihre Gene an den Zellkern ab, nicht alle, aber fast alle. So finden sich im verbleibenden Genom der Mitochondrien des Menschen nur noch 13 Protein-kodierende Gene. Der Rest der mitochondrialen Proteine, wohl an die ein- bis zweitausend an der Zahl, wird von im Zellkern lokalisierten Genen kodiert. Sie werden außerhalb der Mitochondrien synthetisiert und anschließend in die Mitochondrien importiert (SICKMANN et al. 2003).

Die Kraftwerke der Zelle haben somit eine lange und komplizierte Geschichte. Im Lauf der Evolution wurden sie in vielfacher Weise für ihre Funktion als Energietransduktoren optimiert.

Die elektronenmikroskopische Untersuchung der Mitochondrien deckte deren Aufbau aus zwei Membranen auf, der umhüllenden Außenmembran und der Innenmembran (UDE und KOCH 1982). Letztere weist zahlreiche Einfaltungen auf, die als *Cristae mitochondriales* bezeichnet werden. Der von der Innenmembran umgrenzte Raum wird Matrix genannt, der Raum zwischen Außen- und Innenmembran Intermembranraum (Abb. 3C). Insbesondere die Cristae sind der Ort, an dem die Umwandlung der Energie von Nahrungssubstraten in die chemische Energie des ATP stattfindet. Sie gleicht in vielfacher Hinsicht dem Aufbau der Plasmamembran von Bakterien. Auch dies ist ein Beleg für den endosymbiontischen Ursprung der Mitochondrien.

Wenden wir uns nun der Frage zu, wie der enzymatische Apparat in der Innenmembran aufgebaut ist, der die drei oben bezeichneten Schritte der Energieumwandlung bewerkstelligt. Wie wird der Protonengradient erzeugt, der die erste Stufe dieses komplexen Prozesses darstellt? Wie wird der Export von Protonen von der Matrixseite der Innenmembran zu deren Intermembranseite gegen einen Konzentrationsgradienten und gegen das Membranpotential angetrieben? Bei der Photosynthese in den Chloroplasten wird ein Protonengradient unter Nutzung der Lichtenergie aufgebaut, Licht spielt in der oxidativen Phosphorylierung aber keine Rolle. Vielmehr ist es der Fluß der Elektronen von den Nahrungssubstraten zum Sauerstoff, der die Energie bereitstellt.

Zu diesem Zweck müssen die Nahrungsstoffe umgebaut und in die Zellen transportiert werden, so daß sie für die Mitochondrien nutzbar werden. Dies erfordert eine ganze Reihe von

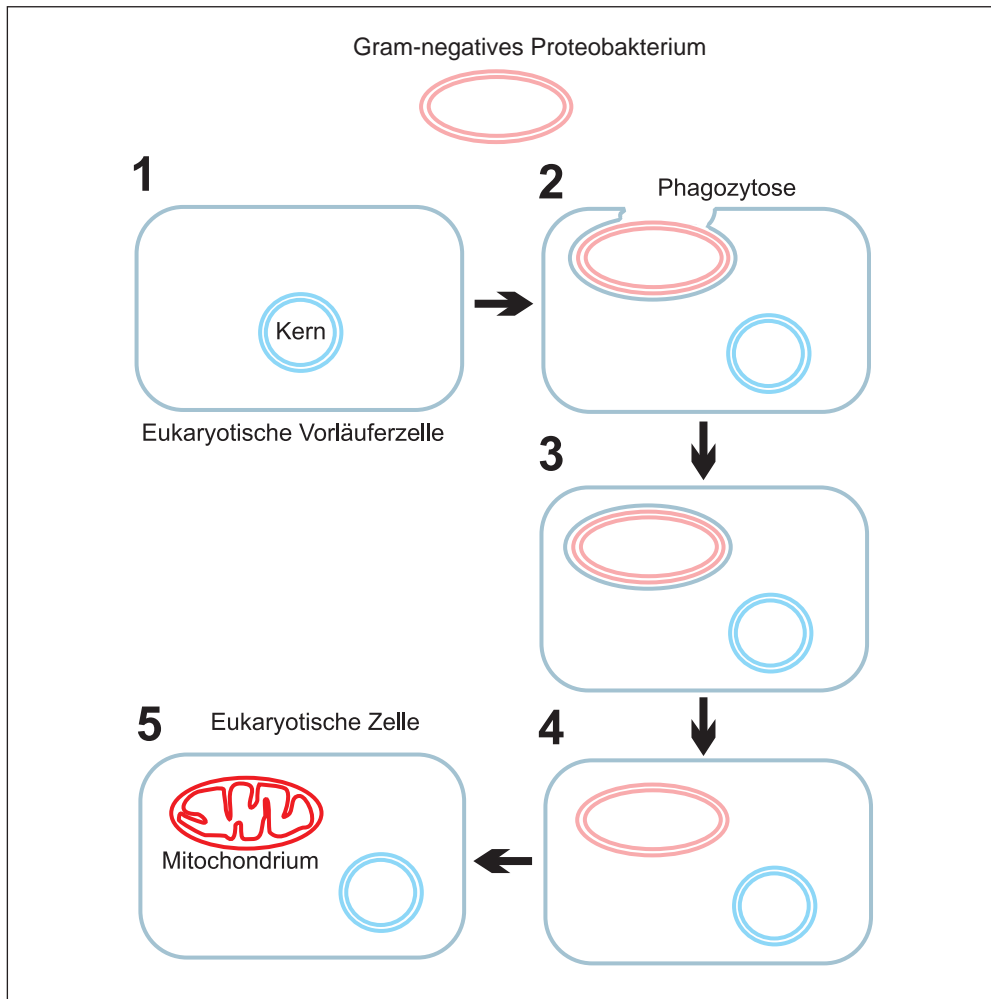


Abb. 4 Vereinfachtes Schema zur Endosymbiontenhypothese. Es sind verschiedene Phasen der Symbiose dargestellt. Eine eukaryotische Vorläuferzelle ohne Organellen (1) nimmt ein zur Atmung befähigtes Gram-negatives α -Proteobakterium durch Phagozytose auf (2), verdaut dieses allerdings nicht, sondern nur eine der drei Membranen (3). Es entwickelt sich eine Symbiose, bei der die Wirtszelle u. a. Nährstoffe liefert, während der Symbiont Energieäquivalente (ATP) abgibt (4). Durch Transfer der meisten Gene vom Symbiontengenom in den Kern der Wirtszelle, wird jener zum eigenständigen Leben unfähig, während er essentielle Funktionen für den Wirt übernimmt: Der Symbiont ist zum Organell – dem Mitochondrium – in der voll ausgebildeten Eukaryotenzelle geworden (5).

chemischen Umwandlungsreaktionen. Zuerst werden im Darmlumen die hochmolekularen Nahrungsstoffe in ihre Bausteine zerlegt und anschließend über das Schleimhautepithel des Darms aufgenommen: Monosaccharide, also insbesondere Glucose, Fettsäuren und Monoglyceride, sowie Aminosäuren. Diese primär entstehenden Komponenten werden dann über das Blut zu den Zellen der verschiedenen Organe transportiert. Dort werden sie in teilweise komplexen Reaktionen für die Mitochondrien »mundgerecht« zugerichtet, bevor sie in die

Mitochondrien in kontrollierten Prozessen aufgenommen und in die Atmungskette eingeschleust werden. Wenn wir also Glucose als schnell verfügbare Energiequelle in uns aufnehmen, geht diese zwar schnell in das Blut und in die Zelle ein, aber dort wird das aus sechs Kohlenstoffatomen aufgebaute Monosaccharid erst in Verbindungen aus zwei oder drei Kohlenstoffen zerlegt, und dann werden diese Intermediate in die Mitochondrien eingeschleust. Hiermit erfolgt der Eintritt in die bereits erwähnte dreistufige Energieumwandlung durch eine Reihe von molekularen Maschinen.

Aus umgewandelten Nahrungsstoffen – z. B. Brenztraubensäure, Apfelsäure, Bernsteinsäure – gehen die Elektronen (bzw. [H] als Elektronenträger) auf das Coenzym NAD^+ über, so daß die reduzierte Form dieses Coenzym (NADH) als allgemein nutzbarer Überträger für die Atmungskette wirksam werden kann. In der Atmungskette erfolgt die Erzeugung des Protonengradienten durch Abzug von Elektronen aus den Intermediaten. Sie stellt eine Kaskade von Oxidationsschritten dar, in denen in die Innenmembran der Mitochondrien eingebaute Proteinkomplexe die grundlegende Reaktion



katalysieren (Abb. 5). Hierbei treten die Elektronen (e^-) nicht frei auf, sondern verbleiben stets gebunden an Coenzyme (prothetische Gruppen) und werden von diesen weitergereicht. Die Oxidation erfolgt in drei Reaktionen durch die Atmungskettenkomplexe, wobei die Komplexe I, III und IV in Serie angeordnet sind, während Komplex II in einem Seitenschluß die Elektronen auf den Komplex III überträgt. Atmungskettenkomplex IV, auch Cytochromoxidase und früher Warburgsches Atmungsferment genannt, überträgt die Elektronen auf den Sauerstoff. Die Reduktionskraft der Elektronen (Redoxpotential) sinkt in den drei Stufen jeweils ab. Insgesamt steht also am Anfang des Prozesses ein umgebauter Nahrungsstoff und am Ende wartet der Sauerstoff, um die Elektronen aufzufangen. Das Endprodukt der Atmungskette ist somit Wasser – wie beim Wasserstoff-getriebenen Motor, der vielleicht in Zukunft der Antrieb des Automobils sein wird.

Gleichzeitig mit dem Weiterreichen der Elektronen in den Atmungskomplexen I, III und IV erfolgt in drei Reaktionen der Transport der gebildeten Protonen von der Innenseite der Innenmembran zu deren Außenseite (Abb. 5). Die freigesetzte Energie wird in dem so aufgebauten Protonengradienten gespeichert. Um zu große Protonengradienten zu vermeiden, kann dieser teilweise in Gradienten anderer Ionen, insbesondere von Kaliumionen umgewandelt werden, so daß ein elektrisches Membranpotential (Ψ) entsteht. Es gilt nun die Gleichung

$$\Delta p = \Delta p\text{H} + \Delta \Psi. \quad [3]$$

Zwei der Elektronen- und Protonen-übertragenden Atmungskomplexe, Komplex III (Cytochrom- bc_1 -Komplex oder Ubiquinol-Cytochrom-c-Reduktase) und Komplex IV (Cytochromoxidase) sind in den vergangenen Jahren durch Röntgenkristallographie in ihrer atomaren Struktur aufgeklärt worden (Abb. 6) (IWATA und OSTERMEIER et al. 1995, TSUKIHARA und AOYAMA et al. 1996, HUNTE und KOEPKE et al. 2000). Damit ist es möglich, die Abläufe in diesen außerordentlich komplexen molekularen Maschinen im Detail zu verfolgen. Aus der Biologie und Chemie der Energietransduktion ist eine Physik der Elektronen- und Protonenbewegung geworden. Jetzt geht es vor allem darum, die Beteiligung von einzelnen Aminosäureresten der Proteine an diesen Prozessen nachzuvollziehen.

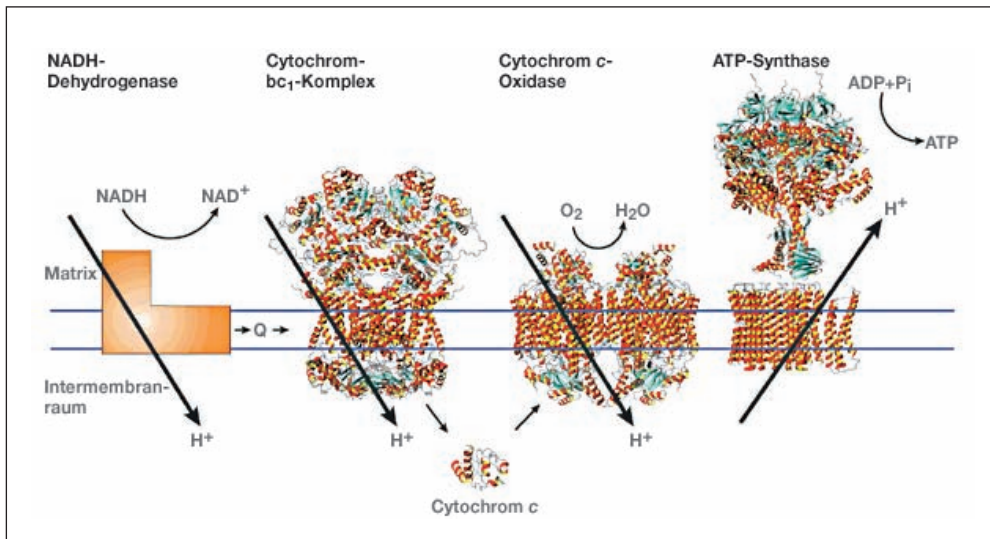


Abb. 5 Schematische Darstellung der Atmungskette, die in der Innenmembran der Mitochondrien lokalisiert ist. Summarisch sind die Orte des Protonentransfers, der mit dem Elektronentransfer auf Sauerstoff gekoppelt ist, angegeben. Die ATP-Synthase nutzt die Energie des Protonengradienten zur Synthese von ATP. Die bekannten Strukturen der einzelnen Atmungskettenkomplexe sind im Schema angedeutet (modifiziert aus YOSHIDA et al. 2001; mit freundlicher Erlaubnis des Copyrighthalters © Nature Publishing Group 2001).

Mit diesen Erkenntnissen erfolgte eine überzeugende Bestätigung der von Peter MITCHELL zu Beginn der 60er Jahre aufgestellten chemiosmotischen Theorie, die eben gerade diese unorthodoxe Kopplung der Atmung an die Wanderung von Protonen postuliert hatte (MITCHELL 1961). Die Aufstellung dieser Theorie und ihre initiale erfolgreiche Prüfung wurde mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Nun zum zweiten Schritt der Energietransduktion: Wie wird die Energie des Protonengradienten zunächst in mechanische Energie umgewandelt, so daß schließlich ATP gebildet wird? Es war früh bekannt, daß ein Enzym, die ATP-Synthase, diese Reaktion vermittelt. Aber erst im Verlauf von sicherlich mehreren tausend Publikationen stellte sich heraus, wie komplex dieses Enzym strukturiert ist. Die molekulare Masse beträgt etwa 530 kDa. Seit einigen Jahren gibt es eine recht gute Vorstellung von den einzelnen Bauteilen, deren stoichiometrischen Verhältnissen und Detailfunktionen. Etwa 30 Proteine, ca. 12 verschiedene Proteinspezies sind als Bausteine der ATP-Synthase bekannt (Abb. 7) (YOSHIDA et al. 2001, WEBER und SENIOR 2003).

Unsere Kenntnis des Enzyms gründet sich sowohl auf biochemische Experimente als auch auf strukturelle Untersuchungen. Die ATP-Synthase besteht aus dem Membranteil F₀, der in die Innenmembran eingebettet ist und dem in die Matrix der Mitochondrien ragenden F₁-Teil (Abb. 3C: mtRib). Wie unten dargestellt, können diese als zwei miteinander gekoppelte molekulare Maschinen aufgefaßt werden. Die Aufgabe des F₀-Teils besteht in der Leitung der an die Außenseite der Innenmembran transportierten Protonen über die Innenmembran auf die Matrixseite. Der F₁-Teil andererseits katalysiert die Synthese von ATP aus ADP und anorganischem Phosphat.

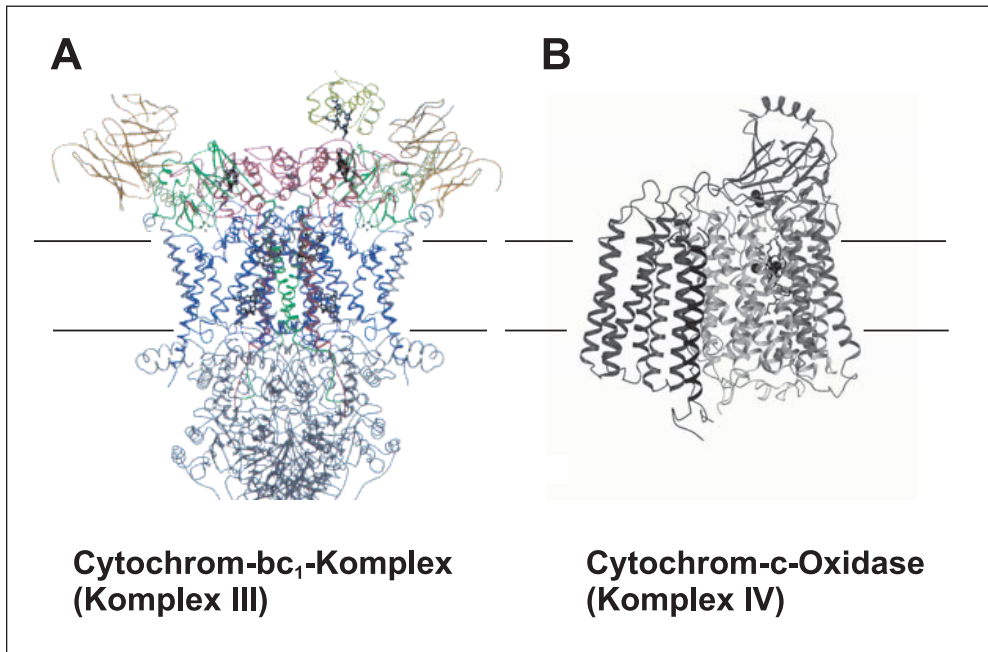


Abb. 6 Röntgenstrukturen der Komplexe III und IV der Atmungskette. (A) Struktur des Cytochrom-bc₁-Komplexes (Komplex III). Dargestellt ist das α -Rückrat, in dem Sekundärstrukturen wie α -Helices und β -Faltblätter besonders hervorgehoben sind (modifiziert aus HUNTE et al. 2000; mit freundlicher Erlaubnis des Copyrighthalters © Structure Fold Des. 2002). (B) Struktur des Cytochrom-c-Oxidase-Komplexes (Komplex IV). Dargestellt ist das α -Rückrat, in dem die α -Helices besonders hervorgehoben sind (modifiziert aus MICHEL et al. 1998; mit freundlicher Erlaubnis des Copyrighthalters © Annual Review Publishers 1998).

Die Struktur der ATP-Synthase wurde mit diversen Methoden untersucht. Die Analyse des isolierten Enzyms mit Hilfe elektronenmikroskopischer Darstellung von Einzelmolekülen gibt einen groben Eindruck von deren Organisation (Abb. 7A). Man erkennt den Membranteil und den F₁-Teil und deren Kopplung über einen Stiel, sowie weitere Elemente, die F₀ und F₁ verbinden. Die Zusammenführung der zahlreichen biochemischen Befunde mit der Struktur konnte erst beginnen, als Röntgen-kristallographische Informationen vorlagen (Abb. 7B und C). Diese wurden zuerst für den F₁-Teil von John WALKER gewonnen (ABRAHAMS et al. 1994). Das war ein Meilenstein in der Aufklärung dieses zentralen Enzyms des Energiestoffwechsels. Inzwischen liegen Informationen zur atomaren Struktur des F₀-Teils vor, ohne allerdings bis jetzt auch nur annähernd vollständig zu sein (STOCK et al. 1999). Allerdings konnte auf der Basis äußerst umfangreicher biochemischer und enzymologischer Studien ein recht überzeugendes Modell für den Reaktionsmechanismus vorgeschlagen werden.

Danach bewirkt die Protonenleitung durch den F₀-Teil zunächst eine rotatorische Bewegung eines Subkomplexes des F₀-Teils (Abb. 7D). Dabei interagieren die Protonen mit einer oligomeren Struktur, die aus drei Untereinheiten, a, b, und c, zusammengesetzt ist. Die Untereinheit c ist im F₀-Teil mit 10–14 Kopien vertreten. Die Protonen – so die Hypothese – betreten den Komplex über eine Eintrittspforte in der Untereinheit a und springen dann auf eine

der Untereinheiten c über. Sie verlassen diese Bindungsstelle wieder über die Untereinheit a, von der sie dann auf die Matrixseite der Innenmembran übergeführt werden. Durch die Protonenbindung an die Untereinheit c wird nach dieser Hypothese eine Konformationsänderung dieser Untereinheit bewirkt, die sich in eine rotatorische Bewegung des gesamten Subkomplexes aus Untereinheiten c in der Membran umsetzt (SENIOR et al. 2002).

Wie wird die Energie der Rotation verwendet, um ATP zu synthetisieren? Im F_1 -Teil der ATP-Synthase finden sich die Untereinheiten α , β , γ und δ . Drei α - und drei β -Untereinheiten sind alternierend angeordnet und bilden den Kopf des F_1 -Teils (Abb. 7B und C). Die β -Untereinheiten enthalten die katalytischen Zentren, in denen die Kondensation von ADP und anorganischem Phosphat zu ATP erfolgt. Die γ -Untereinheit ist so angeordnet, daß sie als Monomer durch einen Hohlraum im Inneren der von den α - und β -Untereinheiten gebildeten heterohexameren Ringstruktur hindurchreicht. Auf der der Membran zugewandten Seite steht die γ -Untereinheit in Kontakt mit den Untereinheiten c des F_0 -Teils. Deshalb rotiert sie mit. Dadurch werden die β -Untereinheiten in verschiedene Konformationen gezwungen (Abb. 7E). Durch die Asymmetrie der unterschiedlichen Position der γ -Untereinheit sind die drei Bindungsstellen abwechselnd immer in unterschiedlichen Konformationszuständen (BOYER 1997, MENZ et al. 2001).

Wir gehen aus von der Bindung von ADP und Phosphat an eine Bindungsstelle. Wie erfolgt nun die ATP-Bildung, und wie wird die Reaktion energetisch angetrieben? Im freien, gelösten Zustand wird die Reaktion nicht ablaufen. In geeigneter Proteinumgebung kann die Wasserabspaltung erfolgen, die zum Anhydrid führt. Das entstandene ATP ist dann aber fest an das Enzymprotein gebunden. Es muß Energie aufgebracht werden, um das ATP freizusetzen. Das ist genau der Punkt, an dem die mechanische Energie der Rotationsbewegung ins Spiel kommt. Durch die Konformationsänderung wird die Bindungsstelle so verändert, daß ATP freigesetzt werden kann. Damit ist der komplexe Weg von der Oxidationsreaktion zur Bildung des Phosphorsäureanhydrids am Ziel angelangt. Die Energie der Oxidation ist in die Energie eines Protonengradienten umgewandelt worden, diese wiederum in mechanische Energie der Rotation und Konformationsänderung eines Proteins, und diese zuletzt in chemische Energie, die bei Spaltung der Anhydridbindung für zahllose zelluläre Prozesse genutzt werden kann.

Die Richtigkeit dieses Modells wird durch eine große Zahl von biochemischen und biophysikalischen Befunden gestützt. Für die Existenz eines Enzymmechanismus, der drei alternierende Bindungsstellen für ADP und anorganisches Phosphat bzw. ATP benötigt, haben eine ganze Generation von Bioenergetikern Evidenzen erbracht. Wie aber kann man eine vom Protonenpotential getriebene Rotation eines molekularen Motors nachweisen? Die ersten höchst eleganten Experimente gingen von folgenden experimentellen Beobachtungen aus.

Wie schon sehr lange bekannt, kann der F_1 -Teil unabhängig vom F_0 -Teil die Umkehrung der ATP-Synthase-Reaktion katalysieren (Abb. 7E). ATP wird in ADP und Phosphat gespalten. Die Erwartung war: Die γ -Untereinheit wird dabei in einem isolierten F_1 -Teil rotieren, aber jetzt in eine Richtung, die umgekehrt zu der bei der ATP-Synthese-Reaktion ist. Um dies nachzuweisen, wurden F_1 -Moleküle auf einer Unterlage immobilisiert. An die γ -Untereinheit wurde ein Filament aus Aktinmolekülen geknüpft, also ein langer Schwanz. Die Aktinmoleküle trugen einen fluoreszierenden Marker, so daß ihre Bewegung im Fluoreszenzmikroskop verfolgt werden konnte. Wurde ATP zu solch einer Anordnung zugegeben, war eine Rotation des Aktinschwanzes zu beobachten (NOJI et al. 1997; www.res.titech.ac.jp/seibutu/main_html oder www.biologie.uni-osnabrueck.de/biophysik/junge/overheads.html).

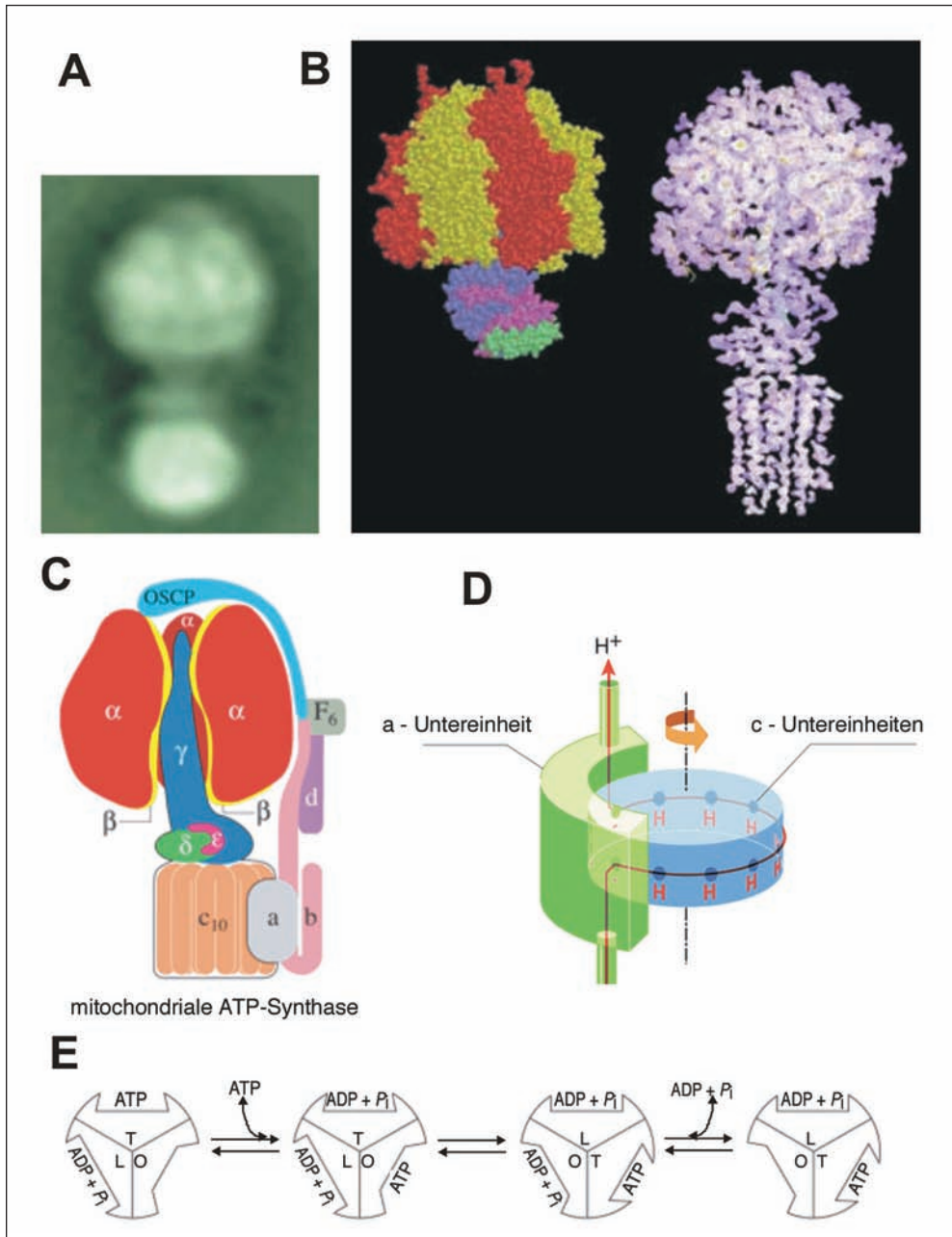


Abb. 7 Struktur und Funktion der ATP-Synthase. Die F_0F_1 -ATPase besteht mindestens aus drei α -Untereinheiten, drei β -Untereinheiten und jeweils einer γ -, δ -, und ϵ -Untereinheit (F_1 -Teil) und außerdem aus 10 bis 14 c-Untereinheiten, zwei b-Untereinheiten und einer a-Untereinheit (F_0 -Teil). (A) Elektronenmikroskopisches Bild einer mitochondrialen ATP-Synthase. Deutlich erkennbar ist der F_1 -Teil (oben) und der F_0 -Teil (unten) (aus: www.mrc-dunn.cam.ac.uk/research/atpase.html). (B) Rekonstruktion der Struktur der mitochondrialen ATP-Synthase aus *Saccharomyces cerevisiae* nach Röntgenstrukturdaten und elektronenmikroskopischen Bildern – links der

Damit war die Funktion des F_1 -Teils als rotatorische Maschine nachgewiesen. Dieses Experiment ist inzwischen in einer Reihe von Variationen durchgeführt worden. Dabei konnten tiefere Einsichten in die Mechanismen dieser rotatorischen molekularen Maschine gewonnen werden. So kann der Rotationsablauf nicht nur, wie vorausgesagt, in 120° -Schritte unterteilt werden, sondern es lassen sich Subzustände definieren, die die Arbeitsweise des Motors weiter erleuchten (YASUDA et al. 2001). Die Rotationsgeschwindigkeit in der intakten Zelle wurde bestimmt als 50–200 pro Sekunde. Der Motor muß demzufolge weitgehend reibungsfrei arbeiten. Seine Effizienz wird mit mehr als 90 % angegeben.

Die Analogie zum Rotationskolbenmotor von Felix WANKEL ist nicht weit hergeholt. In Ausdehnung dieser Analogie kann man viele Elemente eines mechanischen Motors auch in diesem molekularen Motor finden: Getriebe, Rotor, Stator, Gelenk, Kugellager, Dichtung, Ventil etc. (YOSHIDA et al. 2001).

Nun können wir uns der Frage zuwenden, wie die generellen Energiemünzen PMF (Δp) und ATP biologische energieerfordernde Prozesse antreiben. Kehren wir kurz zuerst zur PMF zurück. In der PMF-getriebenen Synthese von ATP wurde schon ein Beispiel dargestellt, wie eine derartige Energieumwandlung funktioniert. Hier sei ein weiteres System angefügt: die rotierenden Geißeln oder Flagellen von Bakterien (DEROSIER 1998, OSTER und WANG 2003). Diese langen Fortsätze an der Oberfläche von Gram-negativen Bakterien können rotieren. Bewegen sie sich gegen den Uhrzeigersinn, dann bilden sie ein rotierendes Bündel von propellerförmigen Filamenten und treiben dadurch die Bakterien in einer Vorwärtsbewegung voran (Schwimmen). Wenn sich die Flagellen allerdings im Uhrzeigersinn drehen, stehen sie unkoordiniert von den Bakterien ab, so daß diese sich ungerichtet bewegen (Taumeln). In Abwesenheit einer Nährsubstanz taumeln die Bakterien. Ist eine Nahrungsquelle in der Nähe, welche die Bakterien fühlen können, so schwimmen die Bakterien in eine bestimmte Richtung. Mit Hilfe der Flagellen wechseln die Bakterien zwischen gerichtetem Schwimmen und Taumeln und nähern sich der Nahrungsquelle an (Chemotaxis) (ARMITAGE 1999).

Der Flagellenmotor ist eine Struktur von erheblicher Komplexität. Er überspannt die beiden Membranen der Bakterien (Abb. 8). Ein Grund dafür ist, daß Energie nur im inneren Kompartiment vorhanden ist, die Geißeln aber an der Oberfläche sitzen. Dieser Motor wird von der protonenmotorischen Kraft über die innere Membran angetrieben (CAPLAN und KARAVANOV 1993, BLAIR 2003). PMF stellt also die Energie zum Antrieb von molekularen Maschinen dar.

F_1 -Teil in Kalottenmodell Darstellung, *rechts* alle strukturell bekannten Teile der ATP-Synthase. Wie in (A) *oben* der F_1 -Teil, *unten* der membraninserierte F_0 -Teil (auch aus: www.mrc-dunn.cam.ac.uk/research/atpase.html). (C) Schematische Darstellung der mitochondrialen ATP-Synthase unter besonderer Berücksichtigung der topologischen Beziehungen der γ -Untereinheit zu den α - und β -Untereinheiten des F_1 -Teils. Beachtenswert ist die asymmetrische Struktur der γ -Untereinheit (auch aus: www.mrc-dunn.cam.ac.uk/research/atpase.html). (D) Modell des Rotationsmechanismus des F_0 -Teils der ATP-Synthase. Der Fluß der Protonen zu der Bindungsstelle der c-Untereinheit und die Rotation des Bündels von c-Untereinheiten bis zur Freisetzung des nächsten Protons ist schematisch angegeben (auch aus: www.mrc-dunn.cam.ac.uk/research/atpase.html). (E) Schematische Darstellung des Mechanismus der ATP-Synthese am F_1 -Teil. Es sind nur die katalytisch aktiven β -Untereinheiten dargestellt, die sich in drei verschiedenen Konformationen befinden: O – offen, die Bindungsstelle ist unbesetzt; L – *loose* (locker), ADP und P_a sind locker in die Bindungsstelle gebunden; T – *tight* (fest), das gebildete ATP ist fest an die Bindungsstelle gebunden. Die β -Untereinheiten wechseln in zeitlicher Folge zwischen diesen Konformationen. Der energetisch aufwendigste Schritt ist der Übergang von der T- zur O-Konformation, bei der das ATP von der Bindungsstelle entlassen wird (aus CAPALDI und AGGELER 2002; mit freundlicher Erlaubnis des Copyrightalters © Elsevier 2002).

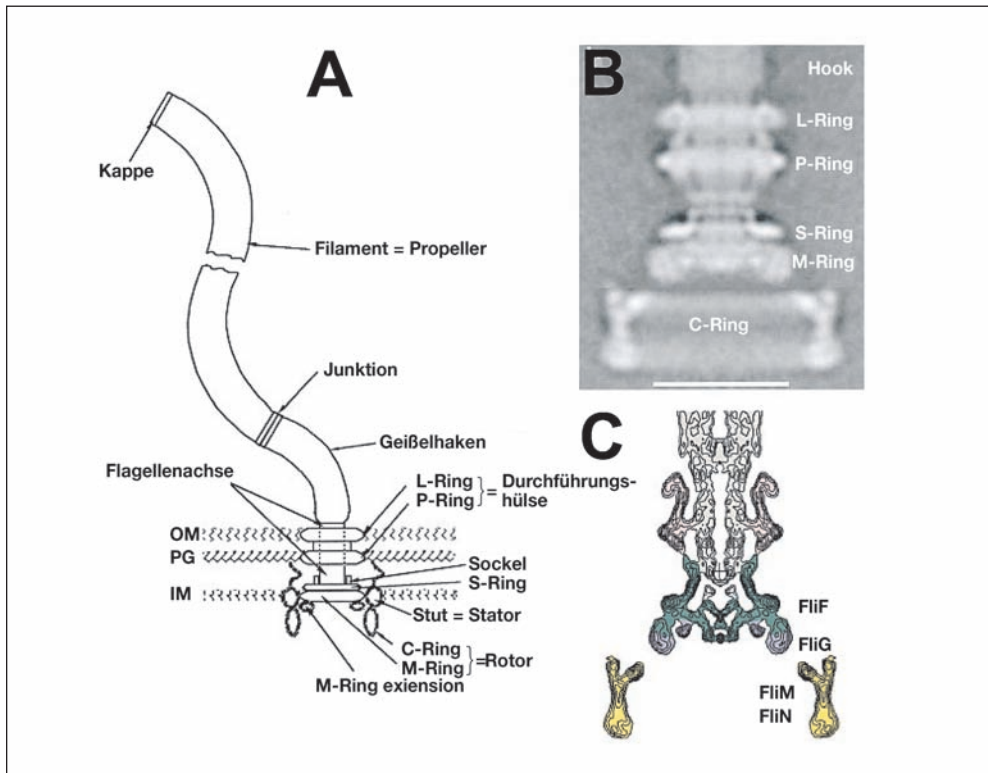


Abb. 8 Das bakterielle Flagellum. (A) Schematische Darstellung des Flagellums als mechanischer Apparat. Deutlich zu erkennen ist das schraubenförmig geformte Filament, das über ein gebogenes Verbindungsstück in aus mehreren Ringen bestehenden Rotor steckt. (B) Elektronenmikroskopische Aufnahme des Flagellenmotors mit Bezeichnung der als Ringe gedeuteten Strukturen. (C) Rekonstruierter Schnitt durch den Flagellenmotor mit Angabe der Position bestimmter Untereinheiten. Bei allen drei Bildern ist das Zytoplasma unten, der extrazelluläre Raum oben angeordnet (aus DeRosier 1998; mit freundlicher Erlaubnis des Copyrighthalters © Elsevier 1998).

Nun sollen einige Beispiele für ATP-getriebene Maschinen dargestellt werden:

Das Kinesin ist ein Motormolekül, das Lasten entlang des Zytoskeletts, insbesondere der Mikrotubuli, transportiert (VALE und MILLIGAN 2000, WOEHLKE und SCHLIWA 2000, DIEZ et al. 2002). Lasten können sein: Membranvesikel, die vom Zellinnern zur Plasmamembran transportiert werden, oder Chromosomen, die auf Tochterzellen verteilt werden. Das Kinesin ist ein langes, fadenartiges Molekül mit zwei Domänen, also größeren gefalteten Proteinstrukturen an den beiden Enden (Abb. 9). Zwei solcher Fäden lagern sich zusammen. Die beiden Kopfdomänen binden die Last, die beiden Fußdomänen wandern auf den Mikrotubuli. Der Bewegungsmechanismus, offenbar Fuß über Fuß, wird von ATP getrieben. Das Kinesin hat eine ATPase-Aktivität, d. h., es hydrolysiert ATP. Es wird diskutiert, ob es sich hier um

einen molekularen Motor nach dem Prinzip des »power strokes« handelt, mit den Elementen Hebelarm und Drehgelenk. Aber auch das Prinzip des »biased Brownian Ratchet« wurde vorgeschlagen (WOEHLKE und SCHLIWA 2000). Eine Animation der molekularen Wirkung findet sich unter valelab.ucsf.edu/research/res_mec_overv.html. Mit diesem Motor werden auch die Mitochondrien durch die Zelle transportiert.

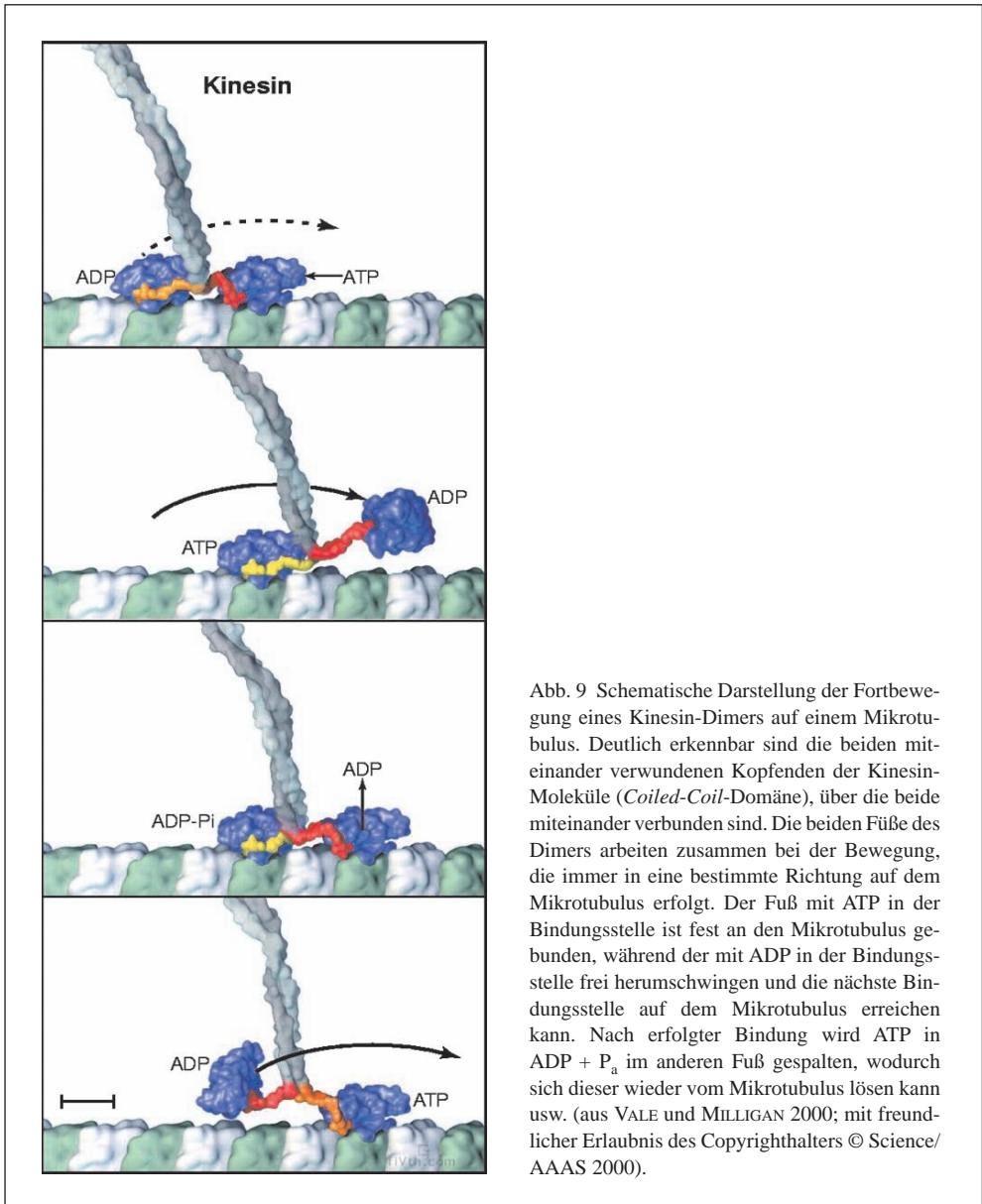


Abb. 9 Schematische Darstellung der Fortbewegung eines Kinesin-Dimers auf einem Mikrotubulus. Deutlich erkennbar sind die beiden miteinander verwundenen Köpfen der Kinesin-Moleküle (*Coiled-Coil*-Domäne), über die beide miteinander verbunden sind. Die beiden Füße des Dimers arbeiten zusammen bei der Bewegung, die immer in eine bestimmte Richtung auf dem Mikrotubulus erfolgt. Der Fuß mit ATP in der Bindungsstelle ist fest an den Mikrotubulus gebunden, während der mit ADP in der Bindungsstelle frei herumschwingen und die nächste Bindungsstelle auf dem Mikrotubulus erreichen kann. Nach erfolgter Bindung wird ATP in $\text{ADP} + \text{P}_a$ im anderen Fuß gespalten, wodurch sich dieser wieder vom Mikrotubulus lösen kann usw. (aus VALE und MILLIGAN 2000; mit freundlicher Erlaubnis des Copyrightalters © Science/AAAS 2000).

Eine zweite ATP-abhängige Maschine ist das GroEL/ES (SIGLER et al. 1998, HARTL und HAYER-HARTL 2002). Die Bezeichnung stammt aus der Phagen-genetik, denn dieses Protein wurde entdeckt, als man nach Faktoren suchte, welche den Zusammenbau von Phagen, also von bakteriellen Viren, vermitteln. Es stellte sich erst viel später heraus, daß dieser Proteinkomplex eigentlich eine molekulare Maschine ist, welche die Faltung von Proteinen katalysiert. Proteine werden als lineare Ketten von Aminosäureresten an den Ribosomen gebildet. Sie müssen sich dann mit höchster Präzision in die dreidimensionale Struktur falten, die erforderlich ist, damit sie ihre jeweiligen Funktionen, also z. B. Enzymwirkung, Strukturbildung oder – wie eben dargestellt – Motorfunktion, ausüben können. GroEL ist ein Komplex mit siebenzähliger Symmetrie, mit Ringstruktur und Aufbau aus zwei mal sieben identischen großen (*Large*) Untereinheiten (XU et al. 1997). GroEL/ES enthält darüber hinaus ein Heptamer aus kleinen (*Small*) Untereinheiten (MAYHEW und HARTL 1996). Das GroEL/ES bildet einen Käfig. In diesem Käfig werden ungefaltete Proteine gefangen und wieder entlassen, wenn sie ihre endgültige Konformation erreicht haben. Dieser Prozeß ist ein komplexes, durch ATP-Hydrolyse gesteuertes Geschehen. Der GroEL-Komplex macht dabei eine massive Strukturänderung durch (Abb. 10).

Die molekulare Maschine GroEL/ES in Bakterien und Hsp60/10, das in den kernhaltigen Zellen in den Mitochondrien vorhanden und unverzichtbar für deren Lebensfähigkeit ist, werden auch als Chaperonine bezeichnet. Damit soll ausgedrückt werden, daß dies eine Unterklasse von Chaperonen ist – unter diesem Begriff werden generelle Faltungshelfer zusammengefaßt, die aktiv das Erreichen des funktionellen Faltungszustands katalysieren. Die meisten der inzwischen bekannten zahlreichen Chaperone binden in ATP-abhängiger oder -unabhängiger Weise an ungefaltete Proteine und bewahren diese damit vor Aggregation (FRYDMAN 2001). Sie ermöglichen dies, indem sie Zyklen von Bindung und Loslösung durchlaufen. Im abdissoziierten Zustand können die ungefalteten Proteine Faltungsversuche unternehmen. Andererseits wird durch die wiederholte Bindung der Chaperone die Wahrscheinlichkeit der Mißfaltung verringert. Das Hsp60 wurde von uns vor fast 15 Jahren in Zusammenarbeit mit Arthur HORWICH (Yale University, New Haven) und Franz-Ulrich HARTL in seiner Funktion initial charakterisiert (CHENG et al. 1989). Nunmehr gibt es eine Reihe von Familien von solchen Faltungskatalysatoren, die in ähnlicher Weise in praktisch allen Zellen existieren.

Ein weiteres, hier als letztes angeführtes Beispiel einer ATP-getriebenen molekularen Maschine ist der Proteinimportmotor der Mitochondrien. Mitochondrien besitzen eine eigene DNA, Überbleibsel aus ihrer Historie als Abkömmlinge der Bakterien. Diese DNA kodiert jedoch nur für wenige Proteine, beim Menschen 13 von insgesamt etwa 100000 verschiedenen Proteinen, aus denen unser Organismus aufgebaut ist. Mitochondrien wiederum sind aus etwa 2000 verschiedenen Proteinen zusammengesetzt, die bis auf die bezeichneten 13 im Zellkern kodiert sind und im Zytosol synthetisiert werden. Sie müssen demzufolge in selektiver Weise in die Mitochondrien transportiert werden. Der Transport erfolgt, je nach Lokalisation des betreffenden Proteins, über eine oder zwei Membranen. Dazu sind Proteintranslokasen erforderlich. Deren Identität, Zusammensetzung und Funktionsweise sind in den vergangenen Jahren zu einem guten Teil aufgeklärt worden (PASCHEN und NEUPERT 2001, TRUSCOTT et al. 2003). Energie ist nötig für diesen Transport von Makromolekülen, und zwar, wie wir fanden, sowohl eine Protonen-bewegende Kraft als auch ATP (STUART et al. 1994, UNGERMANN et al. 1996). Die Mitochondrien enthalten einen Importmotor, Tim23, dessen Funktionsweise im folgenden kurz erklärt werden soll. Im Zentrum steht die Frage, wie hier Energie in die Bewegung von Proteinen umgewandelt wird.

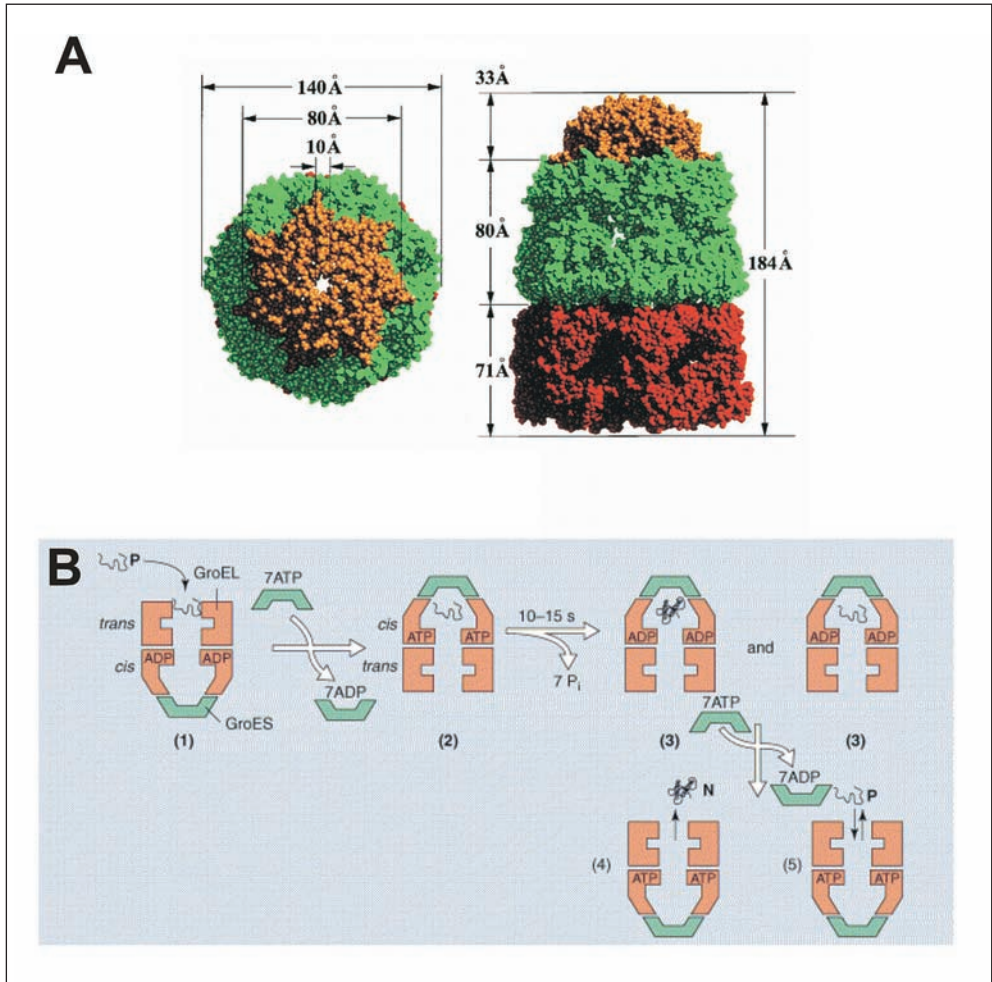


Abb. 10 GroEL/ES als Chaperon-Maschine (Chaperonin). (A) Röntgenstruktur von GroEL/ES aus *Escherichia coli*, in der die Atome als Kalotten dargestellt sind. Rot ist ein GroEL-Heptamer, grün der andere dargestellt, während der GroES-Deckel – ebenfalls aus 7 Untereinheiten bestehend – gelb wiedergegeben ist. Links die Aufsicht, rechts die Seitenansicht (aus XU et al. 1997; mit freundlicher Erlaubnis des Copyrighthalters © Nature Publishing Group 1997). (B) Schematische Darstellung des Mechanismus von GroEL/ES: Das nicht-gefaltete Protein (P) wird in eine hydrophobe Kammer des GroEL gebunden, danach bindet der GroES-Deckel, wobei auf der gegenüberliegenden Seite der GroES-Deckel abdissoziiert. Die Bindung des GroES-Deckels führt zur ATP-Hydrolyse und dadurch zu massiven Konformationsänderungen der GroEL-Untereinheiten, so daß nun eine hydrophile Kammeroberfläche entsteht. In dieser Umgebung (»Anfinsen Cage«) kann das Protein P Faltungsversuche unternehmen. Anschließend wird das Protein P unter GroES-Abdissoziation vom GroEL entlassen. Wenn das Protein P dann noch nicht fertig gefaltet ist, kann es den Zyklus abermals durchlaufen (aus ELLIS 2001; mit freundlicher Erlaubnis des Copyrighthalters © Elsevier 1997).

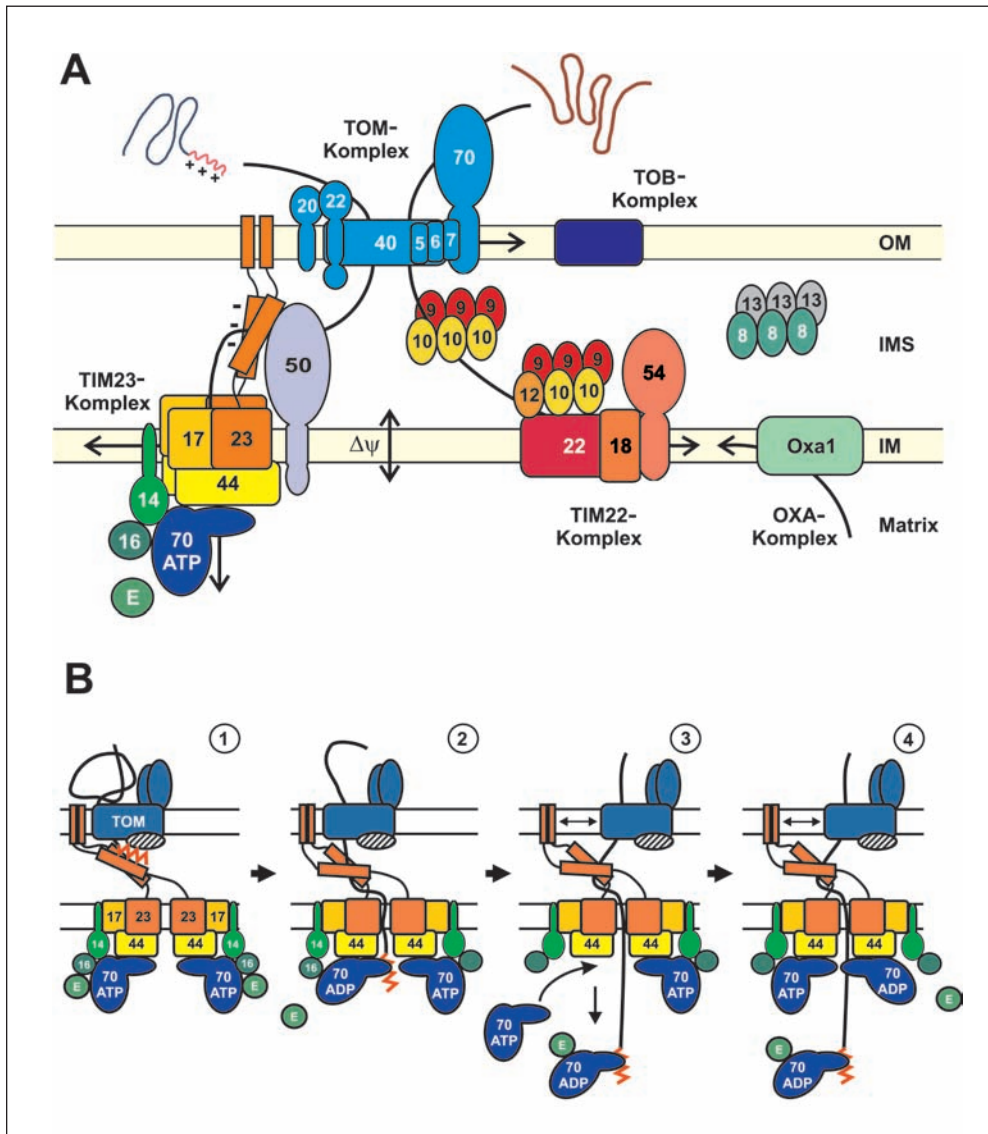


Abb. 11 Schematische Darstellung des Imports von Vorstufenproteinen in Mitochondrien. (A) Übersichtsschema mit den bekannten Proteinkomponenten, die den Import von Vorstufenproteinen in die Mitochondrien ermöglichen. In der Außenmembran (OM) sitzt der TOM-Komplex (*Translocase of the Outer Membrane*), den alle mitochondrialen Vorstufenproteine passieren müssen, und der gerade neu entdeckte TOB-Komplex, der für die Insertion von β -Barrel-Proteinen in die Außenmembran verantwortlich ist. In der Innenmembran (IM) sitzen drei verschiedene Komplexe: der TIM23-Komplex, der den Import von Vorstufenproteinen in die Matrix ermöglicht, der TIM22-Komplex, der die Insertion von Innenmembranproteinen aus dem Intermembranraum ermöglicht, und der OXA-Komplex, der die Insertion von Innenmembranproteinen aus der Matrix ermöglicht. Zwei verschiedene kleine Helferkomplexe im Intermembranraum (IMS) sind dargestellt. Die Nummern bezeichnen das apparente Molekulargewicht der einzelnen Proteinkomponenten, mit denen sie auch bezeichnet werden (z. B. Tom40). Es sind zwei verschiedene Arten von Vorstufenproteinen und ihre Wege dargestellt: Ein Matrixprotein mit absplittbarer, n-terminaler Signalsequenz und

Die Mitochondrien besitzen einen Translokationskomplex in der Außenmembran, den sogenannten TOM-Komplex, der für den Transport von praktisch allen Proteinen zuständig ist (Abb. 11A). In der Innenmembran sitzen mehrere solcher Komplexe, hier soll der TIM23-Komplex betrachtet werden, der den Transport von löslichen Proteinen in die Matrix vermittelt. Diese Proteine werden in der Regel mit einem Adressierungssignal synthetisiert, eine am Aminoterminus des Proteins lokalisierte Sequenz, die nach Erreichen des Ziels abgeschnitten wird. Diese Zielsequenz ist je nach Protein etwa 12–60 Aminosäurereste lang und enthält immer eine Reihe von positiven Ladungen und praktisch nie negative (VON HEIJNE 1986). Nach Durchqueren der Außenmembran, ein Vorgang der in diesem Rahmen nicht dargestellt werden soll, werden diese Vorstufenproteine in den TIM23-Komplex eingefädelt. Dazu ist die protonenmotorische Kraft PMF bzw. das elektrische Membranpotential, das von der PMF erzeugt wird, nötig. Es wird dabei ein Kanal geöffnet, durch den die Zielsequenz nach innen getrieben wird (TRUSCOTT et al. 2001). Auf der Innenseite der Membran befindet sich der mitochondriale Importmotor, auf den näher eingegangen werden soll (NEUPERT und BRUNNER 2002).

Der Importmotor ist über eine Komponente, Tim44, an den Translokationskanal angeheftet (Abb. 11B). Tim44 organisiert die weiteren beteiligten Komponenten. Vor allem bindet das Tim44 das mitochondriale Hitzeschockprotein und Chaperon mtHsp70. Die vom Membranpotential über die Membran gebrachte Zielsequenz wird zuerst von Tim44 gebunden und dann an Hsp70 weitergereicht (RASSOW et al. 1994, UNGERMANN et al. 1996, MORO et al. 1999). Hsp70 ist ein Chaperon in der Matrix, das seinerseits ATP bindet und in dieser Form eine offene Bindungstasche für entfaltete Polypeptidketten hat. Es kann somit die zu transportierende Polypeptidkette binden. Danach findet ATP-Hydrolyse statt, wodurch die Bindungstasche sich schließt und die zu transportierende Kette fest bindet (SCHNEIDER et al. 1994). Gleichzeitig wird dadurch das Hsp70, nun in der ADP-Form, vom Tim44 abgelöst (SCHNEIDER et al. 1996). Es kann, fest mit dem Protein verbunden, nun nur in eine Richtung im Importkanal gleiten, d. h. nach innen. Das Rückgleiten des gebundenen Proteins ist verhindert. Wenn nun das in Translokation befindliche Polypeptid aufgrund der Brownschen Bewegung weiter nach innen diffundiert ist, kann ein neues an Tim44 gebundenes Hsp70 wiederum die Polypeptidkette erfassen. Durch eine Reihe solcher Bindungszyklen kann die Polypeptidkette Schritt für Schritt in die Matrix transloziert werden. Für den effizienten Ablauf dieses Prozesses sind eine Reihe von Hilfsfaktoren erforderlich. Ein solcher Faktor, Tim14, stimuliert die ATP-Hydrolyse am mtHsp70 und damit das Schließen der Bindungstasche von Hsp70, so daß dieses sehr schnell zufassen kann (MOKRANJAC et al. 2003). Ein anderer Hilfsfaktor, Mge1, setzt das Hsp70 von der Polypeptidkette frei und bewirkt die Regeneration der ATP-Form aus der ADP-Form (SCHNEIDER et al. 1996). Ein weiterer notwendiger Faktor ist das Tim16, das möglicherweise den Leerlauf des Hsp70 verhindert (KOZANY et al. 2004).

ein Innenmembranprotein mit internem Importsignal. Das Membranpotential (Ψ) ist nötig zur Insertion des Vorstufenproteins in die Innenmembran. (B) Modell der Wirkungsweise des mitochondrialen Importmotors, der am TIM23-Komplex lokalisiert ist und die Translokation des Vorstufenproteins in die Matrix ermöglicht. Wechselseitig binden Hand über Hand mitochondriale Hsp70-Moleküle, die mit Tim44 vom TIM23-Komplex interagieren, an die einkommende Polypeptidkette des Vorstufenproteins. Die Hilfsfaktoren Tim14, Tim16 und Mge1 sind wichtig für den ATP-Umsatz durch das mitochondriale Hsp70. Mitochondriales Hsp70 bindet unter ATP-Hydrolyse fest an die Polypeptidkette und verhindert so ein Zurückgleiten dieser Kette, die also nur nach vorne gleiten kann (Brownsche Molekularbewegung). Wenn ein weiterer Abschnitt der Polypeptidkette in die Matrix gelangt ist, bindet ein weiteres Hsp70-Molekül usw. Die Hsp-Moleküle werden durch ADP/ATP-Austausch wieder freigesetzt.

Insgesamt kann dieser Mechanismus als ein Brownsches molekulares Ratchet angesehen werden. Ein Ratchet stellt einen Sperrhaken dar. Dieser Mechanismus bringt Unidirektionalität in die Bewegung und hat eine Analogie im Uhrwerk, das durch einen Sperrhaken am Rückwärtslauf gehindert wird. Die theoretischen Physiker haben sich solche *Brownian Ratchets* schon lange als Konstruktionsprinzip für einen Motor ausgedacht (AIT-HADDOU und HERZOG 2003). Die Energie für den Antrieb der gerichteten Bewegung der Polypeptidkette kommt also im Falle des mitochondrialen Importmotors aus der Hydrolyse von ATP. Alternativ wurde vorgeschlagen, daß das mtHsp70 eine Zugkraft auf die zu translozierende Polypeptidkette ausübt (GLICK 1995). Die experimentelle Differenzierung der beiden vorgeschlagenen Mechanismen stellt ein herausforderndes Kapitel in der Bioanalytik dar.

Die TIM23-Translokase der Mitochondrien stellt eine raffinierte molekulare Maschine zum gerichteten Transport von Proteinen dar. Andere Proteintranslokasen in den Mitochondrien und in anderen zellulären Organellen (endoplasmatisches Retikulum, Chloroplasten, Peroxisomen) verfahren nach ähnlichen oder ganz unterschiedlichen Prinzipien unter Beteiligung von verwandten oder ganz unterschiedlichen Proteinkomponenten. In allen Fällen wird Energie in Form von ATP oder PMF benötigt, um die Ordnung in der Proteinverteilung innerhalb der Zelle zu etablieren und aufrechtzuerhalten (AGARRABERES und DICE 2001, VAN VLIET et al. 2003).

Dank

Herrn Dr. U. AHTING bin ich zu großem Dank verpflichtet für seine wertvollen Ratschläge und für die Unterstützung bei der Abfassung des Manuskripts.

Literatur

- ABRAHAMS, J. P., LESLIE, A. G., LUTTER, R., and WALKER, J. E.: Structure at 2.8 Å resolution of F₁-ATPase from bovine heart mitochondria. *Nature* 370(6491), 621–628 (1994)
- AGARRABERES, F. A., and DICE J. F.: Protein translocation across membranes. *Biochim. Biophys. Acta* 1513(1), 1–24 (2001)
- AIT-HADDOU, R., and HERZOG, W.: Brownian ratchet models of molecular motors. *Cell Biochem. Biophys.* 38(2), 191–214 (2003)
- ANDERSSON, S. G., KARLBERG, O., CANBACK, B., and KURLAND, C. G.: On the origin of mitochondria: a genomics perspective. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 358(1429), 165–77, discussion 177–179 (2003)
- ARMITAGE, J. P.: Bacterial tactic responses. *Adv. Microb. Physiol.* 41, 229–289 (1999)
- BLAIR, D. F.: Flagellar movement driven by proton translocation. *FEBS Lett.* 545(1), 86–95 (2003)
- BOYER, P. D.: The ATP synthase – a splendid molecular machine. *Annu. Rev. Biochem.* 66, 717–749 (1997)
- CAPALDI, R. A., and AGGELER, R.: Mechanism of the F(1)F(0)-type ATP synthase, a biological rotary motor. *Trends Biochem. Sci.* 27(3), 154–160 (2002)
- CAPLAN, S. R., and KARA-IVANOV, M.: The bacterial flagellar motor. *Int. Rev. Cytol.* 147, 97–164 (1993)
- CHENG, M. Y., HARTL, F. U., MARTIN, J., POLLACK, R. A., KALOUSEK, F., NEUPERT, W., HALLBERG, E. M., HALLBERG, R. L., and HORWICH, A. L.: Mitochondrial heat-shock protein hsp60 is essential for assembly of proteins imported into yeast mitochondria. *Nature* 337(6208), 620–625 (1989)
- DEROSIER, D. J.: The turn of the screw: the bacterial flagellar motor. *Cell* 93(1), 17–20 (1998)
- DIEZ, S., SCHIEF, W. R., and HOWARD, J.: Molecular motors: single-molecule recordings made easy. *Curr. Biol.* 12(6), R203–R205 (2002)

- EGNER, A., JAKOBS, S., and HELL, S. W.: Fast 100-nm resolution three-dimensional microscope reveals structural plasticity of mitochondria in live yeast. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99(6), 3370–3375 (2002)
- ELLIS, R. J.: Molecular chaperones: inside and outside the Anfinsen cage. *Curr. Biol.* 11(24), R1038–R1040 (2001)
- FREY, T. G., RENKEN, C. W., and PERKINS, G. A.: Insight into mitochondrial structure and function from electron tomography. *Biochim. Biophys. Acta* 1555(1–3), 196–203 (2002)
- FRYDMAN, J.: Folding of newly translated proteins in vivo: the role of molecular chaperones. *Annu. Rev. Biochem.* 70, 603–647 (2001)
- GLICK, B. S.: Can Hsp70 proteins act as force-generating motors? *Cell* 80(1), 11–14 (1995)
- HARTL, F. U., and HAYER-HARTL, M.: Molecular chaperones in the cytosol: from nascent chain to folded protein. *Science* 295(5561), 1852–1858 (2002)
- HEIJNE, G. VON: Mitochondrial targeting sequences may form amphiphilic helices. *EMBO J.* 5(6), 1335–1342 (1986)
- HUNTE, C., KOEPKE, J., LANGE, C., ROSSMANITH, T., and MICHEL, H.: Structure at 2.3 Å resolution of the cytochrome bc(1) complex from the yeast *Saccharomyces cerevisiae* co-crystallized with an antibody Fv fragment. *Structure* 8(6), 669–684 (2000)
- IWATA, S., OSTERMEIER, C., LUDWIG, B., and MICHEL, H.: Structure at 2.8 Å resolution of cytochrome c oxidase from *Paracoccus denitrificans*. *Nature* 376(6542), 660–669 (1995)
- KOZANY, C., MOKRANJAC, D., SICHTING, M., NEUPERT, W., and HELL, K.: The J domain-related cochaperone Tim16 is a constituent of the mitochondrial TIM23 preprotein translocase. *Nature Struct. Mol. Biol.* 11(3), 234–241 (2004)
- MANNELLA, C. A., MARKO, M., and BUTTLE, K.: Reconsidering mitochondrial structure: new views of an old organelle. *Trends Biochem. Sci.* 22(2), 37–28 (1997)
- MARGULIS, L.: *Symbiosis in Cell Evolution. Life and its Environment on the Early Earth*. San Francisco: 1981
- MAYHEW, M., and HARTL, F. U.: Lord of the rings: GroES structure. *Science* 271(5246), 161–162 (1996)
- MENZ, R. I., WALKER, J. E., and LESLIE, A. G.: Structure of bovine mitochondrial F(1)-ATPase with nucleotide bound to all three catalytic sites: implications for the mechanism of rotary catalysis. *Cell* 106(3), 331–341 (2001)
- MICHEL, H., BEHR, J., HARRENGA, A., and KANNT, A.: Cytochrome c oxidase: structure and spectroscopy. *Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct.* 27, 329–356 (1998)
- MITCHELL, P.: Coupling of phosphorylation to electron and hydrogen transfer by a chemiosmotic type mechanism. *Nature* 191, 144–148 (1961)
- MOKRANJAC, D., SICHTING, M., NEUPERT, W., and HELL, K.: Tim14, a novel key component of the import motor of the TIM23 protein translocase of mitochondria. *EMBO J.* 22(19), 4945–4956 (2003)
- MORO, F., SIRRENBERG, C., SCHNEIDER, H.-C., NEUPERT, W., and BRUNNER, M.: The TIM17.23 preprotein translocase of mitochondria: composition and function in protein transport into the matrix. *EMBO J.* 18(13), 3667–3675 (1999)
- NEUPERT, W., and BRUNNER, M.: The protein import motor of mitochondria. *Nature Rev. Mol. Cell Biol.* 3(8), 555–565 (2002)
- NOJI, H., YASUDA, R., YOSHIDA, M., and KINOSHITA, K.: Direct observation of the rotation of F1-ATPase. *Nature* 386(6622), 299–302 (1997)
- OSTER, G., and WANG, H.: Rotary protein motors. *Trends Cell Biol.* 13(3), 114–121 (2003)
- PASCHEN, S. A., and NEUPERT, W.: Protein import into mitochondria. *IUBMB Life* 52(3–5), 101–112 (2001)
- RASSOW, J., MAARSE, A. C., KRAINER, E., KÜBRICH, M., MÜLLER, H., MEIJER, M., CRAIG, E. A., and PFANNER, N.: Mitochondrial protein import: biochemical and genetic evidence for interaction of matrix hsp70 and the inner membrane protein MIM44. *J. Cell Biol.* 127(6 Pt 1), 1547–1556 (1994)
- SCHNEIDER, H. C., BERTHOLD, J., BAUER, M., DIETMEIER, K., GUIARD, B., BRUNNER, M., and NEUPERT, W.: Mitochondrial Hsp70/MIM44 complex facilitates protein import. *Nature* 371(6500), 768–774 (1994)
- SCHNEIDER, H. C., WESTERMANN, B., NEUPERT, W., and BRUNNER, M.: The nucleotide exchange factor MGE exerts a key function in the ATP-dependent cycle of mt-Hsp70-Tim44 interaction driving mitochondrial protein import. *EMBO J.* 15(21), 5796–5803 (1996)
- SCHRÖDINGER, E.: *What is Life? The Physical Aspects of the Living Cell*. Cambridge: University Press 1944
- SENIOR, A. E., NADANACIVA, S., and WEBER, J.: The molecular mechanism of ATP synthesis by F1F0-ATP synthase. *Biochim. Biophys. Acta* 1553(3), 188–211 (2002)
- SICKMANN, A., REINDERS, J., WAGNER, Y., JOPPICH, C., ZAHEDI, R., MEYER, H. E., SCHÖNFISCH, B., PERSCHIL, I., CHACINSKA, A., GUIARD, B., REHLING, P., PFANNER, N., and MEISINGER, C.: The proteome of *Saccharomyces cerevisiae* mitochondria. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100(23), 13207–13212 (2003)
- SIGLER, P. B., XU, Z., RYE, H. S., BURSTON, S. G., FENTON, W. A., and HORWICH, A. L.: Structure and function in GroEL-mediated protein folding. *Annu. Rev. Biochem.* 67, 581–608 (1998)
- STOCK, D., LESLIE, A. G., and WALKER, J. E.: Molecular architecture of the rotary motor in ATP synthase. *Science* 286(5445), 1700–1705 (1999)
- STUART, R. A., GRUHLER, A., VAN DER KLEI, I. J., GUIARD, B., KOLL, H., and NEUPERT, W.: The requirement of matrix ATP for the import of precursor proteins into the mitochondrial matrix and intermembrane space. *Eur. J. Biochem.* 220(1), 9–18 (1994)

- TRUSCOTT, K. N., BRANDNER, K., and PFANNER, N.: Mechanisms of protein import into mitochondria. *Curr. Biol.* 13(8), R326–R337 (2003)
- TRUSCOTT, K. N., KOVERMANN, P., GEISSLER, A., MERLIN, A., MEIJER, M., DRIESSEN, A. J., RASSOW, J., PFANNER, N., and WAGNER, R.: A presequence- and voltage-sensitive channel of the mitochondrial preprotein translocase formed by Tim23. *Nature Struct. Biol.* 8(12), 1074–1082 (2001)
- TSUKIHARA, T., AOYAMA, H., YAMASHITA, E., TOMIZAKI, T., YAMAGUCHI, H., SHINZAWA-ITOH, K., R. NAKASHIMA, R., YAONO, R., and YOSHIKAWA, S.: The whole structure of the 13-subunit oxidized cytochrome c oxidase at 2.8 Å. *Science* 272(5265), 1136–1144 (1996)
- UDE, J. and KOCH, M.: *Die Zelle. Atlas der Ultrastruktur.* Jena: Gustav Fischer 1982
- UNGERMANN, C., GUIARD, B., NEUPERT, W., and CYR, D. M.: The delta psi- and Hsp70/MIM44-dependent reaction cycle driving early steps of protein import into mitochondria. *EMBO J.* 15(4), 735–744 (1996)
- VALE, R. D., and MILLIGAN, R. A.: The way things move: looking under the hood of molecular motor proteins. *Science* 288(5463), 88–95 (2000)
- VAN VLIET, C., THOMAS, E. C., MERINO-TRIGO, A., TEASDALE, R. D., and GLEESON, P. A.: Intracellular sorting and transport of proteins. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 83(1), 1–45 (2003)
- WEBER, J., and SENIOR, A. E.: ATP synthesis driven by proton transport in F1F0-ATP synthase. *FEBS Lett.* 545(1), 61–70 (2003)
- WESTERMANN, B.: Merging mitochondria matters: cellular role and molecular machinery of mitochondrial fusion. *EMBO Rep.* 3(6), 527–531 (2002)
- WOEHLKE, G., and SCHLIWA, M.: Walking on two heads: the many talents of kinesin. *Nature Rev. Mol. Cell Biol.* 1(1), 50–58 (2000)
- XU, Z., HORWICH, A. L., and SIGLER, P. B.: The crystal structure of the asymmetric GroEL-GroES-(ADP)₇ chaperonin complex. *Nature* 388(6644), 741–750 (1997)
- YASUDA, R., NOJI, H., YOSHIDA, M., KINOSITA, K. Jr., and ITOH, H.: Resolution of distinct rotational substeps by sub-millisecond kinetic analysis of F1-ATPase. *Nature* 410(6831), 898–904 (2001)
- YOSHIDA, M., MUNAYUKI, E., and HISABORI, T.: ATP synthase—a marvellous rotary engine of the cell. *Nature Rev. Mol. Cell Biol.* 2(9), 669–677 (2001)

Prof. Dr. Dr. Walter NEUPERT
Ludwig-Maximilians-Universität München
Institut für Physiologische Chemie
Butenandtstraße 5, Gebäude B
81377 München
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 89 218077094/5
Fax: +49 89 218077093
E-Mail: neupert@bio.med.uni-muenchen.de

Stromerzeugung mit Solarzellen – Technischer Stand und zukünftige Möglichkeiten

Jürgen H. WERNER (Stuttgart)

Mit 9 Abbildungen und 2 Tabellen



Zusammenfassung

Die Photovoltaik ist dazu in der Lage, in relativ kurzer Zeit in Deutschland einen erheblichen Teil zur Stromerzeugung beizutragen. Wenn das gegenwärtige Wachstum der Photovoltaik-Industrie mit jährlichen Steigerungsraten von 20 bis 30 % anhält, kann man in Deutschland bereits im Jahr 2020 mit 6,5 GW bis 23 GW installierter Photovoltaik-Leistung 1,3 % bis 5 % des deutschen Stroms mit Photovoltaik erzeugen. Die Erzeugungskosten für Photovoltaikstrom werden dann etwa 20 Euro-Cent/kWh betragen und damit auf ein Drittel des heutigen Wertes gefallen sein. Der dynamische Markt der Photovoltaik wird auch in der Zukunft vor allem von Solarmodulen auf der Basis von Scheiben aus kristallinem Silizium getragen werden. Der Weltrekordwirkungsgrad von quadratzentimetergroßen Zellen beträgt nahezu 25 %; kommerzielle Module mit einer typischen Größe von einem Quadratmeter haben Wirkungsgrade um 13 %. Die Preise dieser Module der *ersten* Generation der Photovoltaik halbieren sich alle zehn Jahre. Dünnschichtmodule aus kristallinem Silizium sind in Zukunft noch am ehesten dazu in der Lage, die Technologie der kristallinen Siliziumscheiben abzulösen; erste Ansätze hierzu sind am Markt sichtbar. Diese *zweite* Generation der Photovoltaik ist bisher von den Dünnschichtmaterialien CdTe, Cu(In,Ga)Se₂ und amorphes Silizium dominiert. Diese Materialien können sich aber wahrscheinlich entweder aus ökologischen oder physikalischen, letzten Endes aber ökonomischen Gründen nur Nischenmärkte, z. B. als flexible Zellen, für die Anwendung im Weltraum oder für die Energieversorgung bei Geräten unter geringer Beleuchtung erobern. Prinzipiell sind für Solarzellen auf der Basis von Siliziumscheiben wesentlich höhere Wirkungsgrade denkbar, sofern man geeignete Tandemsolarzellen entwickelt. Neben dem Bau von Tandemzellen erlauben die Konzentration der Sonnenstrahlung das Ausnutzen von nieder- und hochenergetischen Photonen und die Photonenkonversion theoretisch Wirkungsgrade, welche weit über 30 % hinausgehen. Allerdings sind einige Konzepte dieser *dritten* Generation der Photovoltaik bisher noch spekulativ.

Abstract

Photovoltaics is able to contribute a noticeable fraction to German electricity supply within a relatively short time. Extrapolating the current annual growth of 20 % to 30 % for photovoltaic installations in Germany into the future predicts a photovoltaic contribution of 1.3 % to 5 % to the German electric energy consumption in the year 2020. At this time, 6.5 GW to 23 GW photovoltaic power would be installed. This contribution to electricity production is possible on the basis of the presently available technology of crystalline silicon. In the year 2020, the generation cost for photovoltaic electricity would range around 20 Euro-Cent/kWh which is a third of the present cost. The efficiency of world record cells of centimeter size from crystalline silicon ranges at almost 25 %; commercial large area modules with a typical area of a square meter today convert about 13 % of the sun light into electricity. For such modules, the sales prizes halve about every ten years. Modules from *thin film* crystalline silicon have the highest potential to replace the technology of crystalline silicon wafers; first approaches are visible in the market. Thin film, »second generation« photovoltaics has thus far been dominated by CdTe, Cu(In,Ga)Se₂ and amorphous silicon. However, for several reasons, these materials might only be able to conquer niche markets, such as for flexible cells, space applications, or for applications under low illumination conditions. In principle, for solar cells made from silicon wafers, much higher efficiencies are possible if appropriate tandem cells were developed. Apart from tandem cells, the concentration of solar radiation, making use of low- and high-energetic photons as well as photon conversion would allow efficiencies far above 30 %. However, some of the concepts of this »third generation« photovoltaics are still speculative.

1. Einleitung

Von allen Methoden, elektrischen Strom aus erneuerbaren Energieressourcen zu gewinnen, hat in Mitteleuropa die Photovoltaik das höchste nachgewiesene technische Potential. Darüber hinaus ist keine andere Methode so elegant wie die Photovoltaik, bei der die Strahlungsenergie der Sonne ohne jegliche bewegte Teile mit der Hilfe von Halbleitern in elektrische Energie umgewandelt wird. Trotzdem tragen Photovoltaik-Anlagen, die aus zu *Modulen* zusammen geschalteten Solarzellen aufgebaut sind, heutzutage nur einen winzigen Bruchteil zum Stromverbrauch in Deutschland bei.

Gegenüber anderen Techniken zur Erzeugung von elektrischem Strom hat die Photovoltaik einen inhärenten Vorteil: Sie ist modular und dezentral nutzbar und kann deshalb direkt beim Verbraucher in der für den Verbraucher angepaßten Weise eingesetzt werden. Es ist möglich, für Leistungen vom Milliwatt- bis in den Gigawatt-Bereich, »Kraftwerke« mit ein und derselben Technologie aufzubauen. Abbildung 1 zeigt die vielfältigen Möglichkeiten des Einsatzes zur Stromversorgung.

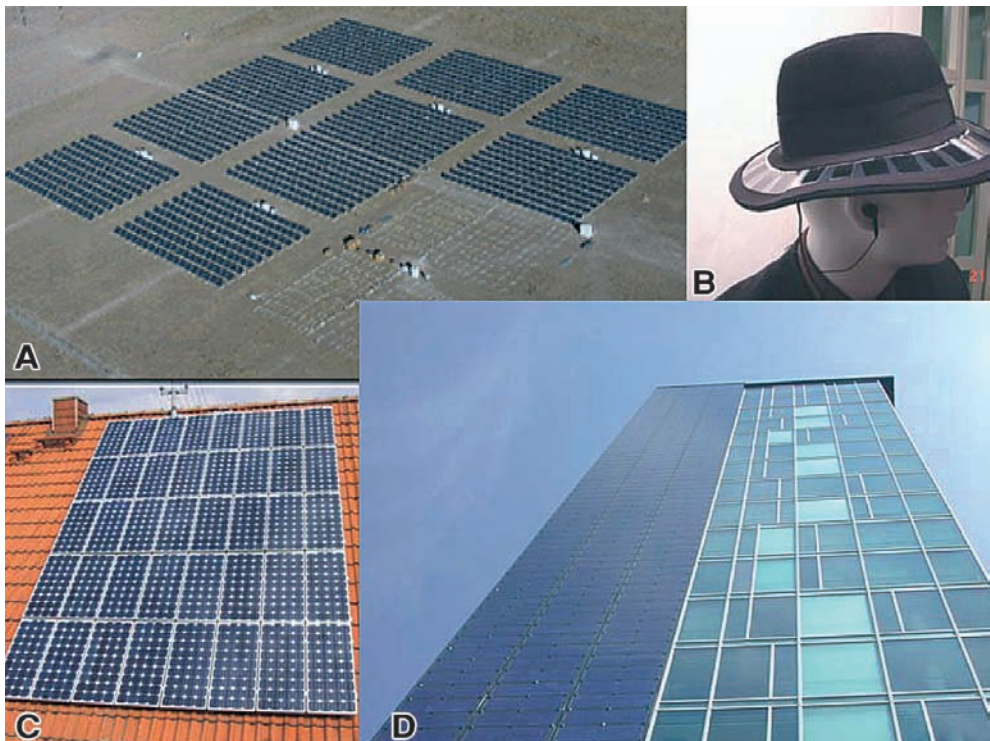


Abb. 1 Dank ihres modularen Aufbaus kann die Photovoltaik durch Verschaltung von Zellen zu Modulen und von Modulen zu Anlagen elektrische Leistungen in nahezu jeder beliebigen Größe liefern. Die Bilder zeigen (A) das Photovoltaik-Kraftwerk der *Tucson Electric Company* in Arizona mit 2,4 MW elektrischer Leistung, (B) einen Solarhut mit einer Leistung von 3 W. In (C) ist eine Hausdach-Photovoltaik-Anlage mit einer Leistung von 1,6 kW dargestellt. Man erkennt deutlich den Aufbau der Module aus einzelnen Zellen. Das Teilbild (D) zeigt die in die Fassade des Freiburger Hauptbahnhofs integrierte 30 kW-Anlage.

Bei voller Sonnenbestrahlung ($100 \text{ mW/cm}^2 = 1 \text{ kW/m}^2$ optischer Leistung des terrestrischen AM1,5G-Spektrums¹) liefert eine senkrecht zur Sonne gestellte Zelle aus kristallinem Silizium mit einer Fläche von 10 cm^2 und einem typischen Wirkungsgrad von 15 % eine elektrische Leistung von 1,5 W. Die Leistung von Zellen und Modulen wird für »Standardbedingungen« (Sonnenpektrum AM 1,5 G und für $25 \text{ }^\circ\text{C}$) spezifiziert. Wenn hier im Folgenden Leistungsangaben gemacht werden, dann ist die Leistung unter diesen Bedingungen gemeint.

Eine einzelne, beleuchtete Solarzelle erzeugt unter solchen Standardbedingungen, und wenn die Zelle optimal zur Sonne orientiert ist, eine Spannung von ca. 0,6 V. In einem Modul sind typischerweise 20 bis 40 Zellen hintereinander geschaltet, zum einen, um durch die höhere Spannung Widerstandsverluste zu reduzieren, zum andern, um die Verwendung, Weiterleitung oder Speicherung (z. B. in Bleiakkumulatoren) auf jeweils angepaßten Spannungsebenen zu ermöglichen. *Felder* in Photovoltaik-Anlagen bestehen aus Hintereinander- und Parallelverschaltungen von Modulen. Im Falle von *Inselanlagen* wird die elektrische Energie der Solarmodule über einen Laderegler einem Akkumulator zugeführt. Im Falle einer netzgekoppelten Photovoltaik-Anlage wandelt der *Wechselrichter* den Gleichstrom aus der Photovoltaik-Anlage in Wechselstrom um, bevor er ins Netz eingespeist wird. Für optimalen Ertrag orientiert man in Deutschland eine Photovoltaik-Anlage genau nach Süden. Da die Sonne im Jahreslauf unterschiedlich hoch über dem Horizont steht, muß man beim zur Horizontalen gemessenen Anstellwinkel der Module einen Kompromiß machen, um einen möglichst hohen Jahresertrag an elektrischer Energie bei einer nicht nachgeführten Photovoltaik-Anlage zu erzielen. Der optimale Winkel für Süddeutschland beträgt 30° .

Dieser Beitrag beschreibt den technischen und wirtschaftlichen Stand der Photovoltaik zum Jahresbeginn 2004 und zeigt Perspektiven einer zukünftigen Entwicklung auf. Sofern der politische Wille da ist, wird es technisch möglich sein, mit der Photovoltaik in Deutschland einen hohen Anteil des Stroms zu erzeugen und darüber hinaus einen auf den Export orientierten Wirtschaftszweig aufzubauen, der Zigtausenden von Menschen einen Arbeitsplatz bieten kann. Ende des Jahres 2002 fanden bereits mehr als 7 000 Menschen einen Arbeitsplatz in der deutschen Photovoltaik-Industrie (IEA 2003), im Jahr 2004 wird in Deutschland die Zahl 10 000 überschritten werden.

Nimmt man als weltweiten Mittelwert für Photovoltaik-Systeme, egal ob sie ans Netz angekoppelt sind oder als Inselssysteme betrieben werden, einen Investitionswert von 7 Euro/W an, dann erzielt die Photovoltaik-Industrie im Jahr 2004 bei schätzungsweise 750 MW zu installierender Photovoltaik-Leistung einen Umsatz von über 5 Milliarden Euro. Für das Jahr 2030 schätzt HOFFMANN (2002) ein jährliches Umsatzvolumen von etwa 100 Mrd. Euro ab. Unter diesen Voraussetzungen können weltweit Millionen von Menschen einen Arbeitsplatz in der Herstellung, dem Vertrieb und der Installation von Photovoltaik-Anlagen finden.

1 AM steht für »air mass«. Der Faktor 1,5 bedeutet, daß die Sonne einen 1,5mal längeren Weg durch die Atmosphäre zurücklegt, als wenn sie senkrecht über uns stehen würde. Beim AM1,5-Spektrum steht die Sonne mit einem Winkel von 48° gegenüber der Horizontalen gemessen am unbedeckten Himmel, was in Deutschland bei den Tag- und Nachtgleichen am Frühlingsanfang (21. März) und Herbstanfang (23. September) mittags um 12 Uhr der Fall ist. Das »G« steht für global und schließt neben der direkt von der Sonne kommenden Strahlung auch die von der Atmosphäre auf die Zelle gestreute Strahlung ein.

2. Der gegenwärtige Kraftwerkspark und die Photovoltaik

Nach Angaben der deutschen Stromindustrie (VDEW 2003) sind derzeit in Deutschland Kraftwerke zur Stromerzeugung mit einer elektrischen Leistung von insgesamt 106 GW installiert, der Stromverbrauch Deutschlands betrug im Jahr 2001 insgesamt 534 TWh. Die Auslastung des gesamten Kraftwerksparks lag demnach bei ziemlich genau 5000 h.

Bis Ende des Jahres 2003 waren nach der Vollendung des 100000-Dächer-Programms nach Angabe des *Bundesumweltministeriums* (2003) der Bundesregierung etwa 350 MW an Photovoltaik-Leistung installiert. Bei einer jährlichen Energieausbeute von ca. 1000 kWh/kW (bei angenommenen 1000 Vollaststunden und einem mittleren Jahreswirkungsgrad von 10 % für die gesamte Anlage) typischer in Deutschland betriebener Photovoltaik-Anlagen ergibt sich gegenwärtig ein photovoltaischer Anteil am Strom von 0,35 TWh und damit $0,35 \text{ TWh} / 534 \text{ TWh} = 6,4 \times 10^{-4} = 0,064 \%$ des Gesamtstromverbrauches in Deutschland. In der installierten Kraftwerksleistung macht die Photovoltaik am Ende des Jahres 2003 gerade einmal $350 \text{ MW} / 106 \text{ GW} = 3,3 \times 10^{-3} = 0,33 \%$ aus.

Was die Stromversorgung von Deutschland betrifft, ist der Anteil der Photovoltaik demnach gegenwärtig marginal und liegt selbst weit unter dem der Windenergie, die Ende des Jahres 2003 mit ca. 14000 Anlagen (www.wind-energie.de), 14 GW Leistung und ca. 3000 Vollaststunden immerhin eine Energieausbeute von 42 TWh, d. h. fast 18 % des Stroms in Deutschland liefern hätte können.

Der gegenwärtig geringe Beitrag der Photovoltaik zur Stromerzeugung in Deutschland hat einen einzigen Grund: *die Stromkosten*. Zur Zeit betragen die Kosten für in Deutschland erzeugten Photovoltaik-Strom ca. 0,60 Euro/kWh. Diese Kosten sind jedoch in den letzten Jahren drastisch gefallen, und sie können bis auf ca. 0,20 Euro/kWh im Jahr 2020 sinken, sofern das gegenwärtig rasante Wachstum des Marktes anhält und die Massenproduktion von Solarmodulen weiter fortschreitet. Durchbrüche in der Forschung werden höhere Wirkungsgrade und weitere Kostensenkungen gegenüber den heutigen Modulen (typischer Wirkungsgrad 13 %) ermöglichen.

Die rasante Markteindringung der Photovoltaik ist bereits heute sichtbar: nicht nur in Nischenmärkten und batteriegepufferten Insel-Anwendungen in der Konsumer-Elektronik, Inselanwendungen in Entwicklungsländern, Telekommunikationsanlagen in abgelegenen Gegenden Deutschlands, an Parkscheinautomaten, Beleuchtungssystemen, Ampeln, Autobahnbaustellen, sondern eben auch in netzgekoppelten Anlagen auf Hausdächern, an Fassaden sowie in Kraftwerken mit Leistungen im Megawatt-Bereich.

Nach Angaben der *International Energy Agency* (IEA 2003) waren im Jahr 1992 von damals weltweit insgesamt 100 MW installierter Photovoltaik-Leistung nur etwa 29 % an das Stromnetz angeschlossen (nur Systeme mit mehr als 40 W Leistung gezählt). Bei weltweit installierten 1,3 GW Photovoltaik-Gesamtleistung lag Ende 2002 der netzgekoppelte Anteil schon bei 74 %. Im Jahr 2003 hat die weltweit installierte Gesamtleistung den Wert von 2 GW überschritten, wovon über 1,5 GW Photovoltaik-Leistung in Stromnetze eingespeist werden. Diese Leistung entspricht etwa der elektrischen Leistung eines Kernkraftwerkblocks.

3. Das technische Potential der Photovoltaik

3.1 Sonneneinstrahlung und Flächenargumente

Auf die ca. 3000 km² Dachfläche in Deutschland fällt bei einer typischen Sonneneinstrahlung von 1000 kWh/m² pro Jahr eine Energiemenge von 3000 TWh, also fast das Sechsfache des »Stromverbrauchs« Deutschlands von 534 TWh/a. Vom Jahresmittelwert her gesehen könnten also Photovoltaik-Anlagen mit mittleren Jahreswirkungsgraden von 18 % (die technisch in konventioneller Siliziumtechnologie bereits heute möglich sind) den gesamten Stromverbrauch von Deutschland abdecken. Heutige kommerzielle Photovoltaik-Anlagen haben jedoch keine so hohen Jahreswirkungsgrade, und die Frage der Speicherung solch großer elektrischer Energiemengen ist völlig offen. Außerdem stehen wegen Abschattungen, Dachfenstern, Kaminen etc., oder durch Konkurrenz mit solarthermischen Anlagen auch nicht die gesamten Dachflächen zur Verfügung. Allerdings ist das Flächenpotential an Fassaden und auf Freiflächen etwa mindestens noch einmal so groß wie das auf den Dächern.

Je nachdem, wie man den Wert der für Photovoltaik verfügbaren Fläche auf Dächern, an Fassaden und auf Freiflächen zwischen 1000 und 5000 km² annimmt, ob der Wirkungsgrad von Photovoltaik-Anlagen bei 8 oder bei 16 % liegt, kommen verschiedene Autoren auf ein Stromerzeugungspotential zwischen 130 und 690 TWh/a. Die Daten wurden von BERNREUTHER (2002a) verglichen und sind hier in Tabelle 1 dargestellt. Das Argument, daß in Deutschland zu wenig Fläche für Photovoltaik da wäre oder die Einstrahlung zu gering sei, ist längst vom Tisch.

Tab. 1 Jährliches Stromerzeugungspotential der Photovoltaik in Deutschland nach verschiedenen Autoren. Der Stromverbrauch in Deutschland beträgt gegenwärtig 534 TWh/a. Je nach Annahme über den Systemwirkungsgrad η und über die für Photovoltaik zur Verfügung gestellten Flächen liegt das Potential zwischen 135 und 690 TWh/a.

| Autor | η [%] | Dächer [km ²] | Fassaden [km ²] | Siedlungs- flächen [km ²] | Frei- flächen [km ²] | Gesamt [km ²] | Strom [TWh/a] |
|--------------------------------|--|------------------------------|--------------------------------|---|--|------------------------------|------------------|
| KALTSCHMITT und WIESE 1993 | 8–9 | 800 | | | 3518 | 4318 | 510 |
| KALTSCHMITT und SCHNEIDER 2002 | 5,4–5,7 ^[1] 11,7–12,4 ^[2] | 838 | 200 | | 4140 | 5178 | 315 690 |
| NITSCH 2001 | 11,7 | 200 | 150 | 350 | 300 | 1000 | 135 |
| QUASCHNING 2000 | 13,5 | 864 | 200 | 39 | 250 | 1353 | 175 |
| LEHMANN und PETER 2003 | 16 | 986 | 531 | | | 1516 | 209 |

[1] amorphes Silizium; [2] kristallines Silizium

3.2 Photovoltaik im Kraftwerkspark

Nachts scheint die Sonne nicht, nicht einmal für Photovoltaik-Forscher! Und wenn die Sonne am »wenigsten« scheint, im Winter, braucht Deutschland den meisten Strom. Großtechnische Stromerzeugung mit Hilfe von photovoltaischen Kraftwerken kann also nur im Zusammenhang mit anderen Arten der Stromerzeugung betrachtet werden, sei es aus erneuerbaren, fossilen oder nuklearen Energieträgern.

Auch wenn Photovoltaik-Anlagen in Deutschland nur 1000 Vollaststunden haben (Erdgaskraftwerke 2300 h, Windkraftwerke 3000 h, Steinkohlekraftwerke 4300 h, Kernkraftwer-

ke 7200 h), dann liefern sie doch 4000 h im Jahr Strom, allerdings nicht mit höchster Leistung (BERNREUTHER 2003a). Auch der bisherige Kraftwerkspark in Deutschland läuft nicht ständig mit Vollast! Der derzeitigen, gesamten installierten Kraftwerksleistung von 106 GW steht eine Jahreshöchstlast von 78 GW gegenüber. Zur Zeit schwankt der Strombedarf Deutschlands tages- und jahreszeitlich bedingt zwischen 45 GW und diesen 78 GW. Das deutsche Stromnetz ist bereits heute dazu in der Lage, solche Schwankungen aufzunehmen.

HEINLOTH (2003) geht deshalb davon aus, daß es möglich sein sollte, wenigstens 25 GW an elektrischer Leistung aus Windkraft und Photovoltaik ins Netz einzuspeisen, *ohne Energieverluste bei konventionellen Kraftwerken hinnehmen zu müssen*. Mit intelligenten Techniken auf der Verbraucherseite müßte es nach Meinung des Autors des vorliegenden Artikels prinzipiell auch möglich sein, fluktuierende Angebote von Strom aus regenerativen Energiequellen im Bereich von bis zu 50 GW ohne größere Speicher aufzunehmen oder auszugleichen.

Rein technisch gesehen erscheint es QUASCHNING (2000, S. 40–50) sogar möglich, mit Hilfe von Photovoltaik (35 % Anteil), Windkraft (33 %), Wasserkraft (5 %), Biomasse (10 %) und Import/Speicherung (17 %) den deutschen Strom im Jahr 2050 fast völlig aus erneuerbaren Energien zu erzeugen. Interessanterweise ergänzen sich hierbei Photovoltaik und Windkraft im fluktuierenden Leistungsangebot in nahezu idealer Weise. QUASCHNING geht in seinem Szenario von insgesamt 203 GW installierter Leistung an Photovoltaik aus. Das Szenario von NITSCH und FISCHEDICK (2002) nimmt 5,1 % Photovoltaik-Anteil an der deutschen Stromversorgung und 23 GW installierte Leistung im Jahr 2050 bei 43 % Strom aus fossilen Kraftwerken an; die Stromkosten lägen bei etwa 6 Euro-Cent/kWh. HEINLOTH (2003) nimmt an, daß bis ins Jahr 2050 in Deutschland 5 GW Photovoltaik installiert sind, eine geringe Leistung, wenn man bedenkt, daß heute schon fast 1/10 dieser Leistung installiert ist.

Der Anteil, den die Photovoltaik in den nächsten Jahrzehnten zur Stromerzeugung in Deutschland und weltweit beitragen wird, ist folglich weder durch die Flächen noch durch die technische Beherrschbarkeit des schwankenden Strahlungsangebotes der Sonne bestimmt. Geeignete technische Lösungen wie die Steuerung der Nachfrage durch moderne Regelungstechnik und Datenkommunikation, verknüpft mit der Wettervorhersage und -beobachtung erscheinen mittelfristig realisierbar. Jeder simple Nachtstromspeicherofen zeigt, wie eine solche Regelung auf der Verbraucherseite im Prinzip aussehen könnte. Kleinere dezentrale Speicher vor Ort könnten diejenige elektrische Energie, die für Beleuchtung und Kommunikationselektronik unbedingt nötig ist, zwischenspeichern. Die zeitliche Nachfrage nach Strom kann relativ einfach über den Preis geregelt werden. Allerdings erfordert natürlich ein solchermaßen strukturiertes Stromnetz nicht nur ein Umdenken, sondern auch geeignete technische Maßnahmen am Stromversorgungsnetz.

Wenn das jährliche Wachstum der Photovoltaik auch in Deutschland so anhält wie in den letzten Jahren, dann könnten im Jahr 2020 schon 6,5 GW (bei 20 % Wachstum) bis 23 GW (30 % Wachstum) und im Jahr 2030 insgesamt 40 GW (20 % Wachstum), 320 GW (30 % Wachstum) Photovoltaik-Leistung installiert sein. Vermutlich ist es nicht sinnvoll, wesentlich mehr als 50 GW Photovoltaik-Leistung in Deutschland zu installieren, solange die Speicherprobleme nicht gelöst sind. Da der Stromverbrauch in Deutschland durch die sinkende Bevölkerungszahl und bessere Techniken eher fallen als steigen wird, könnten von den ca. 500 TWh/a gesamtdeutschem Stromverbrauch bei 1 000 Photovoltaik-Vollaststunden und Jahr mit 25 GW bzw. 50 GW installierter Photovoltaik-Leistung 5 bzw. 10 % am deutschen Strom mit Photovoltaik erzeugt werden. Um im Jahr 2020 etwa 2 % des Stromverbrauchs mit Photovoltaik abzudecken, müßten dann 10 GW an Photovoltaik installiert sein.

3.3 Energierücklaufzeiten

»Eine Photovoltaik-Anlage verbraucht mehr Energie bei der Herstellung, als sie während ihrer Lebensdauer in Deutschland einspielt.« Solche oder ähnliche Aussagen sind seit vielen Jahren widerlegt. Dennoch tauchen sie immer wieder in der Diskussion auf.

Eine komplette Hausdach-Photovoltaik-Anlage spielt selbst in Deutschland in allerspätestens 5 Jahren die gesamte Energie wieder ein, die zu ihrer Herstellung nötig ist; bei Anlagen, die Dünnschichtzellen nutzen, sind es etwa 4 Jahre (BERNREUTHER 2002b). Die *Energierücklaufzeit* oder energetische Amortisationszeit einer Photovoltaik-Anlage ist diejenige Zeit, über welche die Anlage betrieben werden muß, bis die gesamte *Primärenergie*, die für ihren Bau aufgewendet wurde, durch Umwandlung der Sonnenstrahlung in Form von elektrischer Energie wieder eingespielt ist. Folglich hängt die Energierücklaufzeit zum einen von den Einstrahlungsbedingungen ab, unter denen die Photovoltaik-Anlage betrieben wird, zum anderen vom Kraftwerkswirkungsgrad des Landes, in dem sie hergestellt wurde. Wenngleich die Photovoltaik-Anlage während ihres Betriebes keine Energie »verbraucht«, ist der Einsatz von Primärenergie für die *Herstellung* der Module, Wechselrichter etc. nötig. Die berechneten Energierücklaufzeiten hängen deshalb auch davon ab, welcher Kraftwerksmix auf Seiten der eingesetzten Energie vorausgesetzt wird.

GÜRZENICH (2002, S. 73) zeigte kürzlich in seiner Dissertation, daß es von der Energierücklaufzeit her gesehen am günstigsten wäre, in Europa eine Photovoltaik-Anlage in Österreich herzustellen und in Spanien zu betreiben; für diesen Fall sinkt die Energierücklaufzeit bis auf 1,7 Jahre. Bedingt durch den hohen Anteil von Wasserkraftwerken an der Stromerzeugung in Österreich ist dort der mittlere Kraftwerkswirkungsgrad relativ hoch, während Spanien eine hohe Anzahl von Sonnenscheinstunden pro Jahr hat. Dieser Energierücklaufzeit von 1,7 Jahren muß man die von vielen Modulherstellern gegebene Garantie von mindestens 20 Jahren gegenüberstellen. Eine Photovoltaik-Anlage liefert unter diesen Bedingungen mindestens 11mal mehr Energie während der garantierten Lebensdauer der Module, als für die Herstellung der gesamten Anlage aufgewendet werden muß.

Oft vergißt man bei der Diskussion von Energierücklaufzeiten, daß ein fossiles oder nukleares Kraftwerk *nie* die Energie, die für seinen Aufbau aufgebracht werden muß, einspielt. Im Gegenteil, es verbraucht sogar noch »Treibstoff« während seines Betriebes. Schon wenn man es direkt nach seinem Aufbau stilllegen würde, wäre die energetische Amortisationszeit unendlich. Durch den ständig nachzuliefernden nuklearen oder fossilen Treibstoff wird nach der Definition der Rücklaufzeit diese sogar »größer als unendlich«.

4. Marktwachstum und Kostenreduktionen

4.1 Marktwachstum

Es gibt gegenwärtig nur eine einzige Barriere, die verhindert, daß der Photovoltaik-Markt noch schneller wächst, als er es heute schon tut: die Kosten von Photovoltaik-Anlagen. Dabei darf man nicht übersehen, daß dieser Markt regelrecht explodiert! Es gibt kaum einen Wirtschaftszweig, der weltweit so rasant wächst wie die Photovoltaik. Gleichzeitig sind die Kosten für Photovoltaik-Anlagen in den letzten Jahren drastisch gefallen.

Abbildung 2 zeigt das Marktwachstum der Photovoltaik. Im Jahr 2002 wurden weltweit Photovoltaik-Module mit einer Gesamtleistung von 560 MW installiert; auf Deutschland entfielen etwa 100 MW. In den letzten acht Jahren lag das jährliche Marktwachstum jeweils über 30 %; weltweit, wohlgermerkt! Dieser Markt teilt sich nach HOFFMANN (2002, 2003) in vier wesentliche Segmente: *Konsumer-Anwendungen* (Uhren, Taschenrechner, Batterieladegeräte, Boote, Autos) mit einem Marktanteil von 9 % in 2001, *Netzferne Industrieanwendungen* (Fernsehumsetzer, Mobilfunkstationen usw.) mit 23 % Anteil, *Solar-Home-Systeme* in Entwicklungsländern mit 11 % Anteil und *netzgekoppelte Systeme* mit einem Anteil von 57 %.

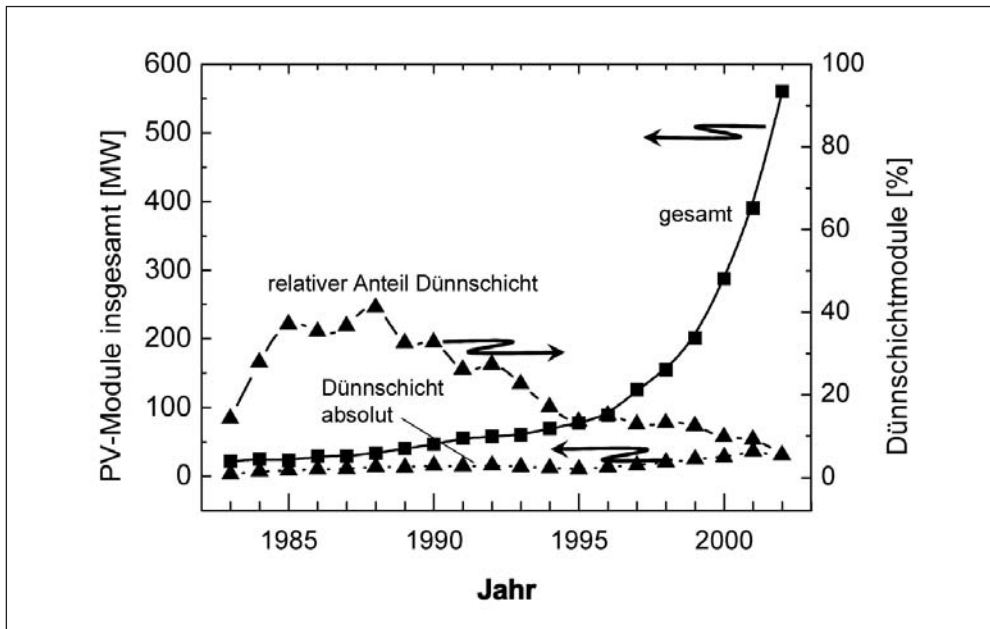


Abb. 2 Marktentwicklung der Photovoltaik. In den letzten acht Jahren lag die jährliche Wachstumsrate jeweils über 30 %. Im Jahr 2002 wurden Module mit einer (Spitzen-) Leistung von über 560 MW verkauft. Die untere Kurve zeigt den absoluten Anteil an Dünnschichtmodulen, der nur geringfügig gestiegen ist und nahezu konstant bei ca. 30 MW/Jahr liegt. Wegen des starken Wachstums des Gesamtvolumens ist der *relative* Anteil dieser Dünnschicht-Module drastisch auf ca. 5 % im Jahr 2002 gefallen.

In den Solarmodulen wird bisher vor allem ein Material zur Umwandlung der Sonnenstrahlung in elektrische Energie benutzt: *Kristallines* Silizium, entweder als einkristalline oder als polykristalline Scheibe. Diese Scheiben waren in der Vergangenheit etwa 300 μm dick. Um Material einzusparen, werden viele Hersteller in den nächsten Jahren die Dicken bis auf ca. 200 μm reduzieren. Wesentlich dünner können die Scheiben aus mechanischen Gründen (Bruchgefahr) nicht mehr werden, wenn man die derzeitige verwendeten Prozesse zur Herstellung der Zellen beibehalten will.

Im Jahr 2002 betrug der Marktanteil des kristallinen Siliziums 95 %. Die restlichen 5 % entfielen auf *Dünnschicht*module. Meist (ca. 25 der 30 MW in Abb. 2) handelt es sich hierbei

bei der aktiven photovoltaischen Schicht nicht um kristallines, sondern um *amorphes* Silizium, das mit einer Dicke von ca. 1 μm direkt auf Glasplatten deponiert ist. Amorphes Silizium absorbiert das Sonnenlicht wesentlich besser als kristallines Silizium, deshalb reicht eine so dünne Schicht aus. Allerdings ist der Umwandlungswirkungsgrad dieser amorphen Zellen etwa nur halb so groß wie derjenige von kristallinen Silizium-Zellen.

Seit einigen Jahren sind auch Module, die CdTe und Cu(In,Ga)Se₂ enthalten, am Markt erhältlich. Ihr Marktanteil ist bisher vernachlässigbar gering. Seit Jahrzehnten erwartet man durch Einsatz der Dünnschichttechnologien Vorteile gegenüber den Herstellkosten der Module aus den 300 μm dicken *kristallinen* Siliziumscheiben. Leider sind diese Hoffnungen bisher nicht erfüllt worden. Es gibt keinen im Markt erbrachten Nachweis dafür, daß bei den bisher verwendeten Materialien amorphes Silizium, CdTe, Cu(In,Ga)Se₂ die auf das Watt elektrischer Leistung bezogenen Herstellkosten (und damit die Preise) von Dünnschichtmodulen niedriger seien als bei Siliziumscheiben. Deswegen hat sich auch die jährliche weltweite Produktion an Dünnschichtmodulen bei ca. 30 MW stabilisiert. Die nahezu horizontale unterste Kurve in Abbildung 2 zeigt dies deutlich.

Die Kurve ganz links in Abbildung 2 demonstriert, daß der relative Marktanteil der Dünnschichtmaterialien in den letzten Jahren nicht etwa gestiegen, sondern *dramatisch gesunken* ist: Von über 30 % auf gerade noch 5 % im Jahr 2002. Der Grund ist relativ einfach: Die Wirkungsgrade bei kommerziellen Modulen aus amorphem Silizium liegen bei 5 bis 7 %, bei kristallinem Silizium bei 12 bis 15 %. Man braucht also bei amorphem Silizium mindestens doppelt so viel Fläche (und damit auch Glas, Kontaktmaterial, Modulrahmen, Aufständerungen, Kabel). Diese Fläche gibt es nicht kostenlos.

Nur bei geringen Beleuchtungsintensitäten kann das amorphe Silizium einen Vorteil ausspielen: Es hat eine größere Bandlücke als kristallines Silizium, deswegen »sperrt« eine amorphe Diode besser als eine kristalline. Außerdem sind parasitäre Verluste durch »Shunt«-Widerstände beim amorphem Silizium niedriger. Solarmodule und -zellen aus amorphem Silizium haben zwar bei »normaler« Beleuchtung (AM1,5G-Sonnenspektrum und 25 °C) einen geringeren Wirkungsgrad als mittelmäßige Zellen (mit 13 % Wirkungsgrad) aus kristallinem Silizium; sie sind aber bei schwacher Beleuchtung besser. Erst sehr teure und gute *einkristalline* Siliziumzellen (Wirkungsgrad 20 %) können mit amorphem Silizium auch bei geringen Beleuchtungsintensitäten mithalten. Als Konsequenz davon enthalten Taschenrechner, Armbanduhren, Gartenlampen usw. auch heute noch vor allem Zellen aus amorphem Silizium. Dieser Markt ist aber auf ca. 25 MW pro Jahr beschränkt (siehe Abb. 2).

Abschnitt 5 diskutiert die Dünnschichttechniken, darunter auch die Hoffnungsträger CdTe und Cu(In,Ga)Se₂. Der Zellwirkungsgrad in beiden Technologien liegt auch bei normaler Beleuchtung weit oberhalb der Werte von amorphem Silizium. Wahrscheinlich schaffen es aber auch diese beiden Dünnschichtmaterialien nicht, große Marktanteile erringen zu können. Nicht nur die Physik (WERNER et al. 2004a) und die Ökologie, sondern vor allem die Ökonomie stellt sehr hohe Hürden auf.

Module aus kristallinem Silizium werden heutzutage in so großen Mengen hergestellt, die Prozeßtechnologie des kristallinen Siliziums entwickelt sich so rasant, daß sich neue Technologien – wenn überhaupt – nur in Nischenmärkten etablieren können. Man sollte sich vergegenwärtigen, was ca. 500 MW jährlich verkaufte Module (siehe Abb. 2) bedeuten: Bei einer elektrischen Leistung von 1 bis 2 W (je nach Zellgröße einer im vollen Sonnenlicht betriebenen Solarzelle) und 250 Arbeitstagen im Jahr werden 1 bis 2 Millionen Solarzellen *pro Tag* hergestellt. Bei einem angenommenen mittleren Wirkungsgrad von 13 % entspricht der

heutige, weltweite jährliche Ausstoß von 500 MW der jährlichen Bedeckung einer Fläche von etwa $3,8 \text{ km}^2$, der *tägliche* Ausstoß damit aber mehr als 15000 m^2 . Diese täglich produzierte Zellfläche deckt mehr als 3 Fußballfelder (Länge 100 m, Breite 50 m) mit kristallinem Silizium ab. Mit nahezu 50 % Anteil am Weltmarkt liefert allein die Firma Sharp die Zellen für 1,5 Fußballfelder-Felder pro Tag! Es wird schwierig sein, mit irgendeiner Dünnschichttechnik gegen diese Produktionszahlen zu konkurrieren, wenn diese Technik keinen entscheidenden *physikalischen* Vorteil gegenüber der klassischen Photovoltaik hat.

4.2 Kostenreduktion bei Modulen, Lernkurve der Photovoltaik

Abbildung 3 zeigt den dramatischen Preisverfall bei Photovoltaik-Modulen aus kristallinem Silizium. Diese Preise gelten für die Abnahme von Modulen in großen Mengen. Zum Jahresbeginn 2004 (gesamte weltweit installierte Leistung ca. 2,1 GW) kann ein Großhändler in Deutschland Photovoltaik-Module zu einem Bestpreis von ca. 2,8 Euro/W einkaufen. Der Hersteller der Module wird Kosten haben, die nur geringfügig darunter liegen; bedingt durch den hohen Konkurrenzdruck sind die Gewinnmargen bei den Zell- und Modulherstellern relativ gering. Der Endkunde, der eine Photovoltaik-Anlage mit einer Leistung von ca. 3 kW in-

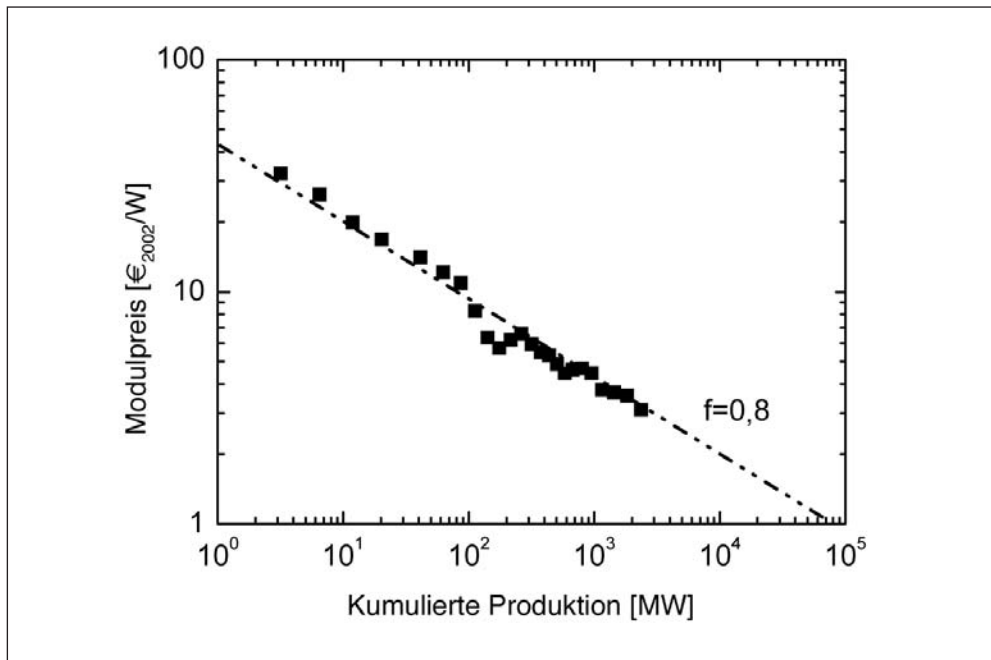


Abb. 3 Die Photovoltaik folgt einer »80 %-Lernkurve« nach Gleichung [1]. Jeweils bei verdoppelter akkumulierter Produktion von Modulen hat sich deren Preis um 20 % reduziert. Als Folge davon halbiert sich der Preis für jede Verzehnfachung der akkumulierten Produktion. Am Anfang des Jahres 2004, bei insgesamt 2 GW akkumulierter Produktion, liegen die Modulpreise (und Kosten) bei ca. 3 Euro/W. Bei linearer Fortschreibung dieser Lernkurve werden die Preise die 1 Euro/W Linie bei etwa 70 GW akkumulierter Produktion unterschreiten. Da die Module einen sehr hohen Anteil an den Kosten eines Photovoltaik-Systems ausmachen (siehe Abb. 4), werden hierdurch auch die Stromkosten auf etwa ein Drittel des heutigen Wertes von 0,60 Euro-Cent/kWh fallen.

stalliert, erhält die Module zum gleichen Zeitpunkt in Deutschland zu einem Preis von ca. 4 Euro/W. Die gesamte, fertig installierte und vom Installateur ans Netz angeschlossene »schlüsselfertige« Photovoltaik-Anlage kostet ohne Mehrwertsteuer ca. 5 Euro/W.

Wie andere industrielle Güter folgt auch die Lernkurve der Photovoltaik-Module in Abbildung 3 einem empirischen Potenzgesetz. Die Herstellkosten pro Stück eines industriellen Gutes (Autos, Waschmaschinen, Kleidung usw.) reduzieren sich nicht etwa *direkt* mit der Zeit, sondern über die Massenproduktion. Es kommt darauf an, wie viel Stück von diesem Produkt bisher insgesamt hergestellt worden sind. Über die ständige Steigerung der Effizienz der Produktionsprozesse und den Erfindungsreichtum der Forscher, Entwickler und Produzenten kommt es zu ständigen Kostenreduktionen in der Produktion. Entscheidend ist die *akkumulierte* Produktion, die in der doppelt-logarithmischen Darstellung in Abbildung 3 als Abszisse auftritt.

Für die Produktionskosten C_n der n -ten Serie eines industriellen Gutes gilt

$$C_n = AP_a^{-\beta} \quad . \quad [1]$$

Hierbei ist P_a die akkumulierte Produktion, die in Abbildung 3 als insgesamt installierte Photovoltaik-Leistung dargestellt ist. Die Größe A in Gleichung [1] steht für die Anfangskosten. Am wichtigsten ist die *Abnahmerate* β ; eine rasche Kostendegradation erfordert ein großes β . Wenn sich die akkumulierte Produktion von P_a nach $P_b = 2 P_a$ gerade verdoppelt hat, dann gilt für das Verhältnis C_b/C_a der Produktionskosten

$$\frac{C_b}{C_a} = \left(\frac{P_b}{P_a} \right)^{-\beta} = 2^{-\beta} =: f. \quad [2]$$

Die Größe f ist der »Lernfaktor«. Für die Kurve in Abbildung 3 gilt $f = 0,8$.

Bei Verdopplung der akkumulierten Produktion sind die Herstellkosten bei Photovoltaik-Modulen in der Vergangenheit von C_a auf $C_b = fC_a = 0,8 C_a$ gesunken, d. h. bei jeder Verdopplung um $f = 1-f = 20 \%$. Für $f = 0,8$ gilt für die Potenz $\beta = -\log f / \log 2 = -3,32 \log f$, der Wert $\beta = -0,32$. Für die Kurve in Abbildung 3 halbieren sich die Kosten ziemlich genau bei einer Verzehnfachung des gesamten Produktionsvolumens. Da sich in der Vergangenheit das Produktionsvolumen jeweils etwa alle zehn Jahre verzehnfachte, halbierten sich die Produktionskosten ebenfalls alle zehn Jahre.

Extrapoliert man die Lernkurve in Abbildung 3 mit $f = 20 \%$ weiter, dann wird bei einer insgesamt installierten Leistung von ca. 70 GW (was etwa der elektrischen Leistung von 70 Kernkraftwerksblöcken entspricht) der Preis von 1 Euro/W erreicht sein. Für $f' = 18 \%$ ist nach HOFFMANN (2002) dieser Preis bei 100 GW, für $f' = 15 \%$ bei 300 GW *weltweit* installierter Photovoltaik-Leistung erreicht.

Es ist essentiell, daß sich die Modulkosten weiter reduzieren. Abbildung 4 demonstriert, daß sie den größten Anteil der Kosten einer Photovoltaik-Anlage ausmachen. Bei den in Abbildung 4 verwendeten Daten der 2kW-Hausdach- und Fassaden-Anlage des Autors liegen sie bei 74 %. Bei größeren Anlagen ist der Anteil noch höher. Bei der Herstellung eines Moduls entfallen nach HOFFMANN (2002) jeweils etwa 1/3 der Modulkosten auf die Herstellung der Siliziumscheiben, die Zellfertigung und die Modulherstellung.

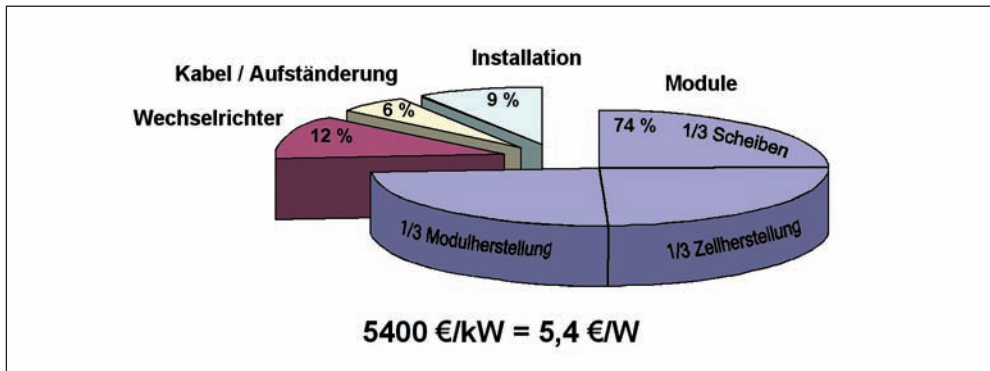


Abb. 4 Kostenanteile einer typischen, im Jahr 2002 installierten Photovoltaik-Anlage von 2 kW Leistung mit Modulen aus polykristallinem Silizium und einem über 20 Jahre garantierten Mindest-Wirkungsgrad von 12,2 %. Der angegebene Preis von 5400 Euro/kW gilt ohne 16 % Mehrwertsteuer. Für den Endkunden entfallen fast drei Viertel der Kosten auf die Module.

4.3 Kosten von Photovoltaik-Strom bei Netzeinspeisung

Abbildung 3 enthält keine Zeitachse. Je nachdem wie das Marktwachstum nach Abbildung 2 zeitlich weiter verläuft, geht auch die Kostendegression auf der Lernkurve in Abbildung 3 schneller oder langsamer. Aussagen über die zukünftige Entwicklung von Modulpreisen, die Kosten einer gesamten Anlage und folglich über die Erzeugungskosten für Photovoltaik-Strom hängen von den angenommenen Wachstumsraten des Marktes ab, d. h. von der Steilheit der obersten Kurve in Abbildung 2.

Abbildung 5 nach HOFFMANN (2002) zeigt die zeitliche Entwicklung der Gesteungskosten von Photovoltaik-Strom für eine mit 900 Vollaststunden pro Jahr (z. B. in Norddeutschland) bzw. mit 1800 h/a (z. B. in Zypern) betriebene Photovoltaik-Anlage im Vergleich zu Stromkosten aus deutschen Mittel- und Grundlastkraftwerken. Aufgrund der Reduktion bei Modul- und Anlagenkosten (siehe Abb. 3) nahmen die Gesteungskosten von Photovoltaik-Strom unter typischen deutschen Bedingungen im Zeitraum von 1990 bis zum Jahr 2000 von 1,2 Euro/kWh auf 0,60 Euro/kWh ab. In Südeuropa liegen sie bereits heute bei ca. 0,30 Euro/kWh.

Die Kurven in Abbildung 5 beruhen auf folgenden Annahmen:

- Investitions- und Betriebskosten $A_z = 7500$ Euro/kW für eine im Jahr 2000 installierte über $n = 20$ Jahre betriebene, zu einem Zinssatz $i = 5\%$ finanzierte Photovoltaik-Anlage.
- Eine Kostendegradation bei Photovoltaik-Systemen von 5% pro Jahr, wie es auch das Einspeisegesetz der Bundesregierung annimmt.

Unter diesen Annahmen wird nach Abbildung 5 Solarstrom um das Jahr 2020 unter deutschen Einstrahlungsbedingungen etwa 0,20 Euro/kWh kosten und damit in den Markt des Mittel- und Spitzenlaststroms eindringen können.

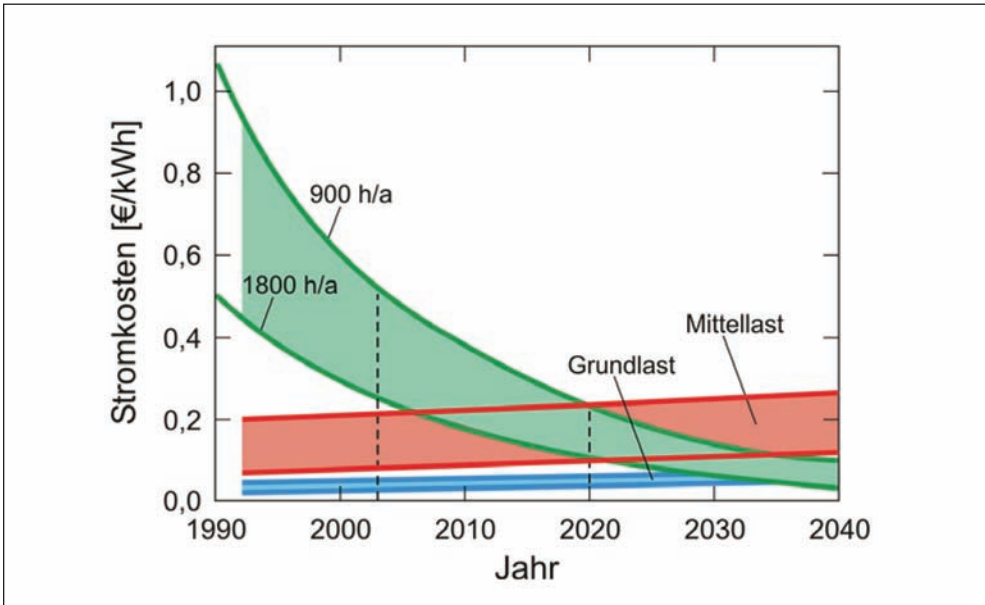


Abb. 5 Kosten von Photovoltaik-Strom für den Erzeuger. Von 1990 bis 2000 haben sich durch die rasante Entwicklung des Marktes (Abb. 2) und die gesunkenen Modulpreise (Abb. 3) die Photovoltaik-Stromkosten faktisch halbiert. In Deutschland liegen sie im Jahr 2004 bei 0,60 Euro/kWh, in Südeuropa bei etwa 0,30 Euro/kWh. Falls der Markt sich weiterhin so dynamisch entwickelt wie bisher, wird (bei einer angenommenen jährlichen Wachstumsrate von 22,5 %) nach HOFFMANN (2002) Photovoltaik-Strom im Jahr 2020 nur noch 0,20 Euro/kWh kosten, im Süden Europas noch weniger. Dann kann Photovoltaik-Strom in den Markt von Spitzenlaststrom eindringen.

Tatsächlich liegen die Investitionskosten für Photovoltaik-Anlagen heute aber schon niedriger als bei der seit 2000 angenommenen jährlichen Kostenreduktion von 5 %. Die Anlage des Autors kostete im August 2002 einen marktüblichen Preis von 5400 Euro (ohne Mehrwertsteuer). Die verwendeten Module aus polykristallinem Silizium haben einen über 20 Jahre garantierten Mindest-Wirkungsgrad (Rahmenfläche eingerechnet) von 12,2 %. Die Anlage lieferte im Jahr 2003 elektrische Energie von 1050 kWh pro kW installierter Leistung.

Abbildung 6 demonstriert genauer, wie die Gestehungskosten von Photovoltaik-Strom vom Energieertrag (d. h. den Einstrahlungsbedingungen) und von der Finanzierung der Photovoltaik-Anlage abhängen. Die berechneten Stromgestehungskosten beruhen auf der Annuitätenmethode. Danach berechnen sich die Gestehungskosten G gemäß

$$G = \frac{A_z K}{E_{Jahr}} \quad [3]$$

Hierbei ist angenommen, daß die Photovoltaik-Anlage über einen Kredit finanziert wird, der in n gleich bleibenden jährlichen Raten zurückgezahlt wird. Alle mit der Erstellung und dem Betrieb der Photovoltaik-Anlage verbundenen Investitionskosten A_z über ihre gesamte Nutzungszeit von n Jahre sind auf den Zeitpunkt der Inbetriebnahme bezogen (aufgezinst oder abdiskontiert). Eine Photovoltaik-Anlage wird heutzutage typischerweise über $n = 20$ Jahre finanziert. Die jährlichen Jahresfestkosten der Anlage betragen $A_z K$. Die Größe $K = i/[1-(1+i)^{-n}]$ ist der Annuitätsfaktor mit dem über n Jahre konstanten Zinssatz i . Die

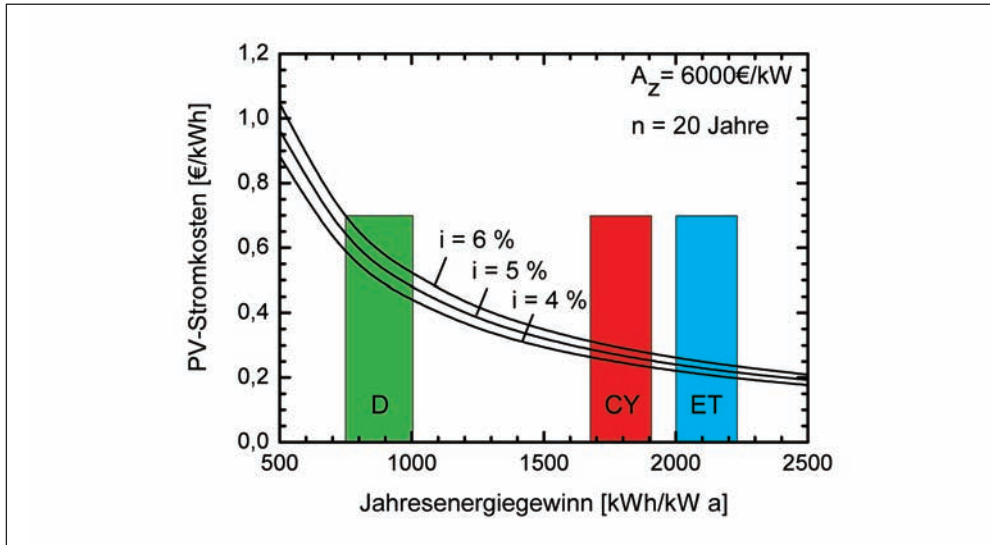


Abb. 6 Abhängigkeit der Stromkosten vom Energieertrag der Anlage und vom angenommenen Zinssatz i für die Finanzierung. Die Anlage wird über $n = 20$ Jahre betrieben. In der gleichen Zeit wird der Kredit A_z zur Finanzierung zurückgezahlt. Die Farben markieren typische Energieerträge für Deutschland (grün), Zypern (rot) und Ägypten (blau).

jährliche Belastung $A_z K$ bleibt bei der Annuitätenmethode konstant; am Anfang ist die Zinslast hoch, die Tilgung gering, später dreht sich dieses Verhältnis um. Die Größe E_{Jahr} bezeichnet die jährliche Energieausbeute der Anlage. Für Süddeutschland gilt typischerweise $E_{\text{Jahr}} \approx 1000 \text{ kWh}/(\text{kW a})$.

Bei Investitionskosten $A_z = 5400 \text{ Euro}/\text{kW}$, einer Anlagennutzung von $n = 20$ Jahren und einem Zinssatz von $i = 6\%$, $K = 8,71\%$ ($i = 4\%$, $K = 7,35\%$) betragen (wenn keinerlei Kosten für Wartung, Reparatur und Entsorgung über die Nutzungszeit der Anlage anfallen) die Gestehungskosten G für die kWh Strom $G = 47 \text{ Euro-Cent}/\text{kWh}$ bei $i = 6\%$ Zinsen (bzw. $G = 40 \text{ Euro-Cent}/\text{kWh}$ bei $i = 4\%$ Zinsen). Mit einer bis 31. 12. 2003 geltenden, über 20 Jahre garantierten Einspeisevergütung von $45,7 \text{ Euro-Cent}/\text{kWh}$ amortisierte sich dann die Photovoltaik-Anlage des Autors nach gerade knapp 20 Jahren. Da die Anlage jedoch zu einem subventionierten Zinssatz von $i = 1,9\%$ Zins ($K = 6,06\%$) finanziert ist, betragen die Gestehungskosten nur $G = 32,7 \text{ Euro-Cent}/\text{kWh}$. Bei der ab 1. 1. 2004 geltenden Einspeisevergütung von $62,4 \text{ Euro-Cent}/\text{kWh}$ wird bei neu installierten Anlagen ein klarer Gewinn erzielt, sofern der Zinssatz nicht wesentlich über $i = 8\%$ liegt. Neben den Anfangskosten müssen auch die Betriebskosten über die Lebensdauer der Anlage gering sein. Während die Siliziummodule eine hohe Lebensdauer haben und keine Wartung erfordern, sind die Wechselrichter in Photovoltaik-Anlagen kritisch; typische Lebensdauern liegen derzeit zwischen 5 und 10 Jahren. Durch Fortschritte in der Leistungselektronik erscheinen Lebensdauern von 20 bis 30 Jahren machbar.

Aus Gleichung [3] wird unmittelbar klar, daß die Stromgestehungskosten G linear von den Anlagenkosten A_z und damit (siehe Abb. 4) vor allem von den Kosten der Module (und Wechselrichter) abhängen.

4.4 Jährlich notwendige Produktionszahlen

Wenn man im Jahr 2030 mit 50 TWh/a etwa 10 % des deutschen jährlichen Stromverbrauchs von 500 TWh/Jahr (siehe Tab. 1) abdecken wollte, wäre hierzu eine Fläche von ca. 500 km² (bei 10 % Wirkungsgrad) an Photovoltaik-Modulen nötig. Mit einer Energieausbeute (Speicherproblematik außer Acht gelassen) von 1000 kWh/(kW a) und einer mittleren Modulleistung von 100 W/m² betrüge die notwendigerweise installierte Photovoltaik-Leistung 50 GW. Bei einer (schon heute garantierten) Modullebensdauer von 20 Jahren (hier wäre auch ein Faktor 2 mehr denkbar), müßten *allein in Deutschland* pro Jahr Photovoltaik-Module mit 2,5 GW (1,25 GW) Leistung ausgetauscht werden. Dieser Wert entspricht dem Fünfundzwanzigfachen (Zwölffachen) der gegenwärtigen deutschen jährlichen Photovoltaikproduktion von etwa 100 MW/a.

Es ist schwer vorstellbar, daß so große Mengen an Modulen auf anderen Materialien als Silizium basieren. Kapitel 6.1 zeigt zum Beispiel, daß auf der Basis des Verbindungshalbleiters Cu(In,Ga)Se₂ und der derzeitigen Technik *weltweit* jährlich nur ca. 1 GW Photovoltaik-Module produziert werden könnten, da die aktuellen jährlichen Förderraten des relativ selten vorkommenden Elementes Indium die Photovoltaik-Produktion einschränken. Im Gegensatz dazu ist das Vorkommen des Elements Silizium (in jedem Stein oder Sand enthalten) praktisch unbegrenzt.

5. Wirkungsgradgrenzen

5.1 Obergrenze des Zellwirkungsgrades

Photovoltaik-Strom könnte erheblich billiger sein, wenn der Wirkungsgrad von typischen kommerziellen Modulen nicht bei 12 bis 15 %, sondern z. B. bei 60 % liegen würde (und solche hocheffizienten Module zu einem ähnlichen Quadratmeterpreis produziert werden könnten wie herkömmliche Module). Tatsächlich erscheinen weitaus höhere Wirkungsgrade möglich als bisher gedacht. In einer klassischen Arbeit zeigten SHOCKLEY und QUEISSER (1961), daß Solarzellen, wenn man sie außerhalb der Erdatmosphäre der näherungsweise als Schwarzkörperspektrum beschriebenen Sonnenstrahlung aussetzt, maximal 30 % des Sonnenlichtes in elektrische Energie umwandeln können. Angesichts der Tatsache, daß die weltbesten Solarzellen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Arbeit von SHOCKLEY und QUEISSER gerade um 10 % Wirkungsgrad erzielten, war den meisten Forschern diese Obergrenze zu Anfang der 60er Jahre nicht so wichtig. Inzwischen haben sich die Überlegungen jener klassischen Arbeit jedoch als fundamental herausgestellt.

SHOCKLEY und QUEISSER führten ihre Berechnungen für das Sonnenspektrum außerhalb der Erdatmosphäre (AM0-Spektrum) durch, ihre Überlegungen gelten aber für *jede* Beleuchtung einer Solarzelle. Die theoretische Obergrenze des Wirkungsgrades liegt für das durch die Erdatmosphäre gefilterte und gestreute AM1,5G-Sonnenspektrum nach TIDJE et al. (1984) bei 33 %. Dennoch ist die Luft zwischen der Shockley-Queisser-Grenze und den besten Solarzellen dünn geworden: Mit 24,7 % ist die weltbeste Solarzelle, die von einer Gruppe um ZHAO aus kristallinem Silizium fabriziert wurde (ZHAO et al. 1999), der theoretischen Grenze sehr nahe gekommen. Allerdings sind solche hohen Wirkungsgrade nur möglich, wenn man sehr aufwendige und deshalb kostenträchtige Techniken aus der Silizium-Mikroelektronik ver-

wendet. Für die Herstellung großflächiger Module für den Massenmarkt sind solche Verfahren zu teuer.

Die Berechnung von SHOCKLEY und QUEISSER (1961) geht von folgender Überlegung aus: Wenn eine Solarzelle beleuchtet wird, entstehen dort durch die Absorption von Photonen Elektron/Loch-Paare, weil Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband angeregt werden. Diese Überschuss-Elektronen können dann von den Kontakten der Solarzelle über eine externe Verbindung fließen und elektrische Leistung an einen Verbraucher abgeben. Hierzu müssen jedoch die Elektronen die Kontakte auch wirklich erreichen, d. h., daß sie im Halbleiter nicht vorher »rekombinieren« (zurück ins Valenzband fallen) dürfen. Eine gute Solarzelle muß den internen Verlust von angeregten Elektronen soweit wie möglich vermeiden. Durch die Perfektion der strukturellen und elektronischen Qualität des Materials (am besten durch Herstellung eines Einkristalls unter Vermeidung auch geringster Verunreinigungen) muß die »Lebensdauer« der Ladungsträger möglichst groß gemacht werden. Auf diese Weise gelingt es dann tatsächlich, sehr hohe Wirkungsgrade zu erzielen.

Die Vergrößerung der Lebensdauer und damit der »Ausbeute« von Elektronen an den Kontakten hat allerdings eine natürliche, nicht zu umgehende, thermodynamisch streng vorgegebene und in der Arbeit von SHOCKLEY und QUEISSER (1961) erstmals beschriebene Grenze. Es ist schlichtweg nicht möglich, *alle* durch Strahlungsabsorption erzeugten Überschuss-Elektronen an den Kontakten abzuziehen. Innerhalb der Solarzelle müssen *immer* Elektronen durch Rekombination verloren gehen. Diese Forderung folgt allein aus den Kirchhoffschen Gesetzen und dem Planckschen Strahlungsgesetz: Wenn wir irgendeinem Material eine bestimmte Temperatur zuschreiben, dann können wir allein aus der Temperatur (und dem Absorptionsvermögen) des Materials voraussagen, welches Strahlungsspektrum dieser Körper abstrahlt. Das von einem Halbleiter abgestrahlte Spektrum wird gerade durch rekombinierende Elektron/Loch-Paare erzeugt. Es müssen also *mindestens* so viele Elektronen rekombinieren, daß diese thermodynamisch vorgeschriebene Abstrahlung möglich ist. Natürlich sind weitere Verlustprozesse in einer Solarzelle möglich, z. B. die Rekombination durch Übertragung der Überschussenergie des Elektrons an andere Elektronen (Auger-Rekombination), an Gitterschwingungen (Phononenerzeugung) oder über »tiefe Störstellen« in der Bandlücke, d. h. durch ein Zurückfallen des Elektrons nicht direkt ins Valenzband, sondern über einen Zwischenzustand in der Bandlücke. Solche Bandlückenzustände entstehen durch Verunreinigungen oder durch kristallographische Defekte wie Zwischengitteratome, Versetzungen oder – im Falle von polykristallinen Materialien – durch Korngrenzen. Die Abgabe der Überschussenergie des Elektrons erfolgt dann dadurch, daß diese Fremdatome oder Atome des Halbleiters selbst zu Schwingungen angeregt werden (Phononenerzeugung). Alle diese Prozesse kann man (wenigstens theoretisch) abschalten; die strahlende Rekombination jedoch nicht.

Die klassische Berechnung der maximalen Wirkungsgrade enthält neben der strahlenden Rekombination noch zwei nahezu triviale Verlustprozesse, die beide mit dem Sonnenspektrum zusammenhängen: Das Sonnenspektrum ist sehr »breitbandig«. Es enthält viele verschiedene Farben, das heißt, Photonen mit vielen verschiedenen Energien. Für unser Auge ist nur ein sehr kleiner Teil dieser Strahlung sichtbar. Für die Umwandlung von Sonnenstrahlung in elektrische Energie mit Hilfe von Solarzellen wäre es ideal, wenn die Sonne nur monochromatisch scheinen, am besten sogar nur unsichtbare Strahlung mit einer Wellenlänge von 1,1 μm aussenden würde. Dann könnte man z. B. mit Silizium Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 60 % bauen. Aus der Tatsache, daß die Sonne (zum Glück) nicht monochromatisch, sondern vielfarbig scheint, ergeben sich für die Photovoltaik zwei Probleme:

- *Niederenergie-Verluste*: Ein Halbleiter kann beim photovoltaischen Effekt nur solche Photonen ausnutzen, die eine Energie $h\nu$ haben, welche größer ist als seine Bandlücke E_g , dem energetischen Abstand zwischen Valenzband und Leitungsband. Photonen mit einer Energie $h\nu < E_g$ gehen einfach durch den Halbleiter hindurch. Sie werden nicht absorbiert und regen deshalb auch keine Überschüßelektronen ins Leitungsband an.
- *Hochenergie-Verluste*: Photonen mit einer Energie oberhalb der Bandlücke, $h\nu > E_g$, werden im Halbleiter absorbiert. Sie regen über die Bandlücke hinweg ein Elektron vom Valenzband ins Leitungsband an. Hierzu reicht bereits die Energie eines Photons aus, das genau der Bandlückenenergie $h\nu = E_g$ entspricht (z. B. $E_g = 1,12$ eV für Silizium). Ist die Photonenenergie größer, so wird das Elektron energetisch gesehen sehr hoch ins Leitungsband angeregt. Die über die Bandlücke hinausgehende Photonenenergie konnte man bisher aber nicht für die Photovoltaik ausnützen (vgl. auch Kapitel 6), sondern die Überschüßenergie des Photons wird lediglich in Überschüßenergie (kinetische Energie) des erzeugten Elektrons umgesetzt. Dieses Elektron fliegt mit hoher Geschwindigkeit durch das Kristallgitter, stößt gegen Atome und bringt sie zum Schwingen, wodurch sich der Kristall nur aufheizt. Das Elektron verliert dann so lange Energie durch Erzeugung von Gitterschwingungen, bis es seine über die Bandlücke hinausgehende Energie abgegeben hat.

Photonen mit einer Energie *unterhalb* der Bandlücke gehen also vollständig verloren. Der Energieanteil von Photonen *oberhalb* der Bandlücke, d. h. der Anteil, der über die Bandlücke hinausgeht, wird lediglich in Wärme umgesetzt. Wenn es nur diese beiden Verlustprozesse geben würde, dann könnte man – bei Optimierung der Bandlücke des Halbleiters auf das vor-

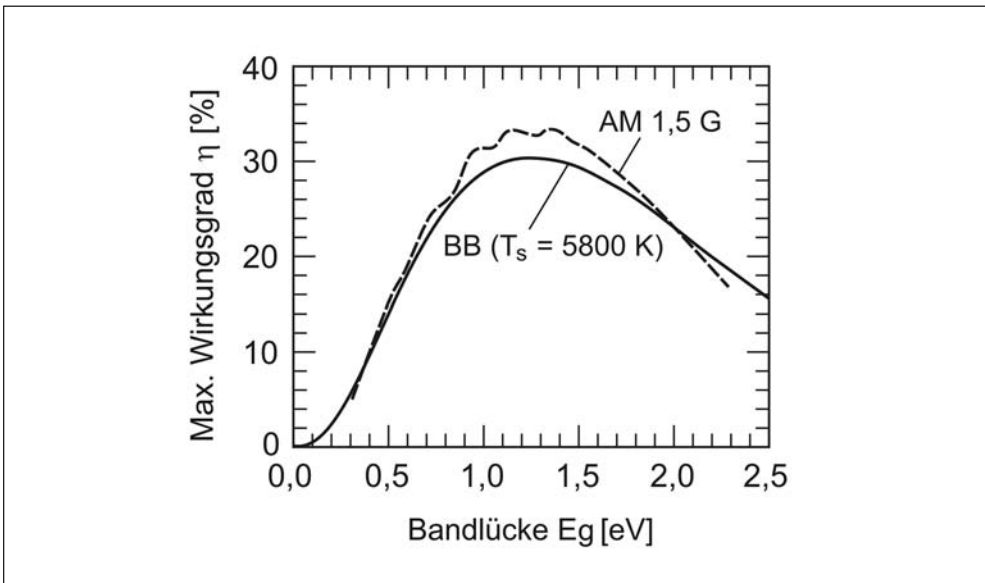


Abb. 7 Theoretische Obergrenzen des maximalen Wirkungsgrades von Solarzellen. Die obere Kurve gilt für die Beleuchtung einer Solarzelle auf der Erdoberfläche mit einem AM1,5G-Spektrum. Die untere Kurve gilt, wenn man das AM0-Sonnenspektrum außerhalb der Erdatmosphäre durch dasjenige eines Schwarzen Strahlers der Temperatur $T = 5800$ K annähert.

gegebene Sonnenspektrum – nach SHOCKLEY und QUEISSER (1961) theoretisch Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 40 % bauen. Da es zusätzlich noch die strahlende Rekombination gibt, kommen gerade die berühmten 30 % als Obergrenze des Wirkungsgrades heraus.

Da das Sonnenspektrum eine breite Verteilung hat, gibt es einen idealen Wert der Bandlücke. Für eine Solarzelle außerhalb der Atmosphäre der Erde unter AM0-Beleuchtung (z. B. an einem Satelliten) liegt die ideale Bandlücke bei $E_g = 1,26$ eV, für das AM1,5G-Spektrum liegt der optimale Wert bei $E_g = 1,16$ eV (der Bandlücke von Silizium) oder bei $E_g = 1,45$ eV (der Bandlücke von Galliumarsenid) (siehe Abb. 7). Diese Rechnungen gelten unter der Annahme, daß man die gesamte Umwandlung mit Hilfe eines einzigen Halbleiters vornimmt. Natürlich kann man theoretisch (und praktisch) die Wirkungsgrade steigern, wenn mehrere Materialien mit unterschiedlichen Bandlücken, d. h. Stapelzellen, verwendet werden (vgl. Kapitel 7).

Nachdem die in Abbildung 7 gezeigte Shockley-Queisser-Grenze über dreißig Jahre unangetastet blieb, lösten Arbeiten von WERNER, KOLODINSKI und QUEISSER (1994) Überlegungen und Forschungsarbeiten aus, die heute – etwas irreführend – mit dem Stichwort »Photovoltaik der dritten Generation« bezeichnet werden. Hierbei geht es um Bemühungen, Bedingungen zu finden, unter denen nicht nur theoretisch, sondern auch experimentell Wirkungsgrade über 30 % erzielt werden können. Da die strahlende Rekombination in keinem Fall vermieden werden kann, versuchen alle Ideen, die oben beschriebenen Hoch- oder Niederenergieverluste zu minimieren. Neben der Vermeidung aller Verlustprozesse bis auf die strahlende Rekombination muß man die Photonenergien besser ausnützen: Entweder muß man Photonen, die eine Energie unterhalb der Bandlücke haben, auch absorbieren, oder man kann versuchen, die Energie von Photonen mit $h\nu > E_g$ besser auszunutzen, am besten beides.

Kürzlich sind Bücher von GREEN (2003b) sowie MARTI und LUQUE (2004) erschienen, in denen die Überlegungen der letzten Jahre zusammengefaßt sind. Einige der Hocheffizienzkonzepte sind in Kapitel 7 beschrieben.

5.2 Wirkungsgrade realer Zellen, Module und Anlagen

Abbildung 8 vergleicht für verschiedene Photovoltaik-Technologien die jeweils weltweit besten Werte der Wirkungsgrade für kleinflächige Zellen (typischerweise wenige Quadratzentimeter groß), »Mini-Module« (Hintereinanderschaltung mehrerer kleiner Zellen zu Modulen von ca. 10 cm²) und die Werte für kommerzielle Module mit typischen Flächen von 1 m². Durch die Hintereinanderschaltung von Zellen entstehen Serienwiderstandsverluste und Verluste durch die nicht vollständige Gleichartigkeit der einzelnen Zellen. Deshalb fällt der Wirkungsgrad für alle Technologien mit zunehmender Fläche. Die Kunst besteht also darin, Weltrekorde im Wirkungsgrad kleinflächiger Zellen auf große Flächen zu übertragen.

Für kristallines Silizium liegt der Weltrekord für eine Zelle von 4 cm² Fläche bei 24,7 % Umwandlungswirkungsgrad der Sonnenstrahlungsenergie in elektrische Energie. Typischerweise haben aber kommerzielle Module, bei deren Herstellung viel einfachere (und billigere Technologien) eingesetzt werden als bei Höchsteffizienz-Zellen, »nur« ca. 13 bis 15 % Wirkungsgrad. Als grobe Faustregel gilt für alle Technologien, daß kommerziell erhältliche, großflächige (1 m²) Module etwa den halben Wirkungsgrad der weltbesten kleinflächigen Zelle haben. Allerdings ist dieses Verhältnis nicht etwa physikalisch vorgegeben. Im Falle der Module aus kristallinem Silizium wird der Markt in den nächsten Jahren kräftig in Bewegung ge-

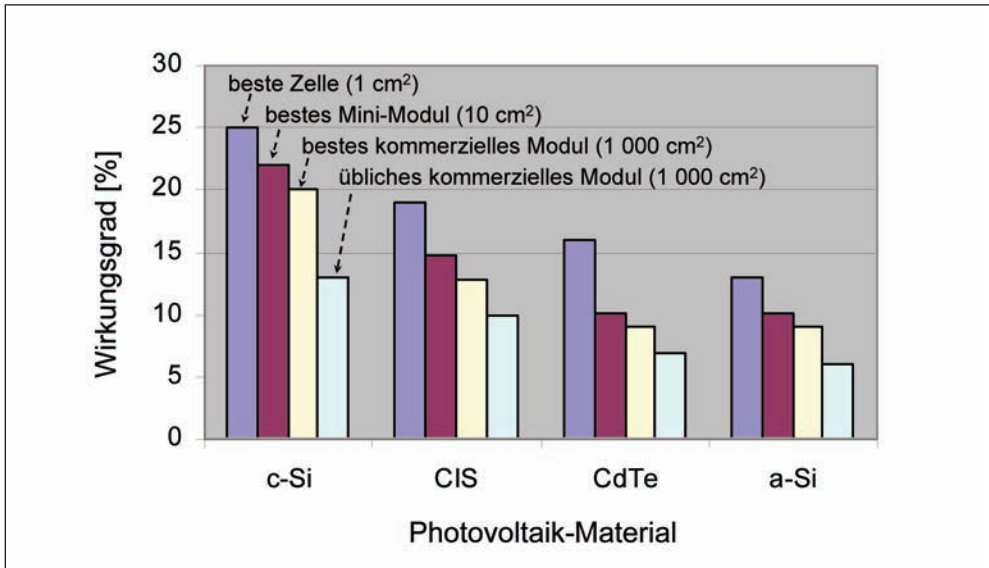


Abb. 8 Beste Wirkungsgrade von kleinflächigen Zellen bis hin zu großflächigen, kommerziellen Modulen. Die Wirkungsgrade werden unter Standard-Bedingungen (normiertes AM1,5G-Sonnenspektrum) und 25 °C angegeben. Konventionelle, kommerziell erhältliche Module aus kristallinem Silizium haben typischerweise Wirkungsgrade zwischen 13 und 15 %.

raten, da die Firma Sunpower (siehe z. B. VERLINDEN et al. 2001) mit Modulen aus einkristallinem Silizium und einem Wirkungsgrad von 20 % in den Markt gehen wird. Die Wirkungsgrade dieser großflächigen Module liegen damit bei über 80 % der Bestmarke von kleinflächigen Zellen.

Der Jahreswirkungsgrad einer Photovoltaik-Anlage ist noch einmal geringer als der Wirkungsgrad der Module. Da der Wirkungsgrad der Module von Temperatur und Beleuchtung abhängt und auch der Wechselrichter nicht ständig am optimalen Punkt, sondern auch bei Teillast betrieben wird, liegt der Jahreswirkungsgrad einer Photovoltaik-Anlage bei ca. 80 % des für Standardbedingungen angegebenen Modulwirkungsgrades. Im Jahresmittel werden damit in Deutschland ca. 10 % der über das Jahr eingestrahltene optische Leistung der Sonne in elektrische Energie umgewandelt.

6. Dünnschichttechniken, zweite Generation Photovoltaik

Photovoltaik auf der Basis von dünnen, auf ein Fremdsubstrat aufgetragenen Halbleiterschichten wird heute oft als »Photovoltaik der zweiten Generation« bezeichnet. Amorphes Silizium, Cu(In,Ga)Se₂ und CdTe werden jeweils seit ca. 20 Jahren erforscht, kristallines Silizium als Dünnschichtmaterial rückt seit ca. 10 Jahren mehr und mehr ins Blickfeld der Forscher.

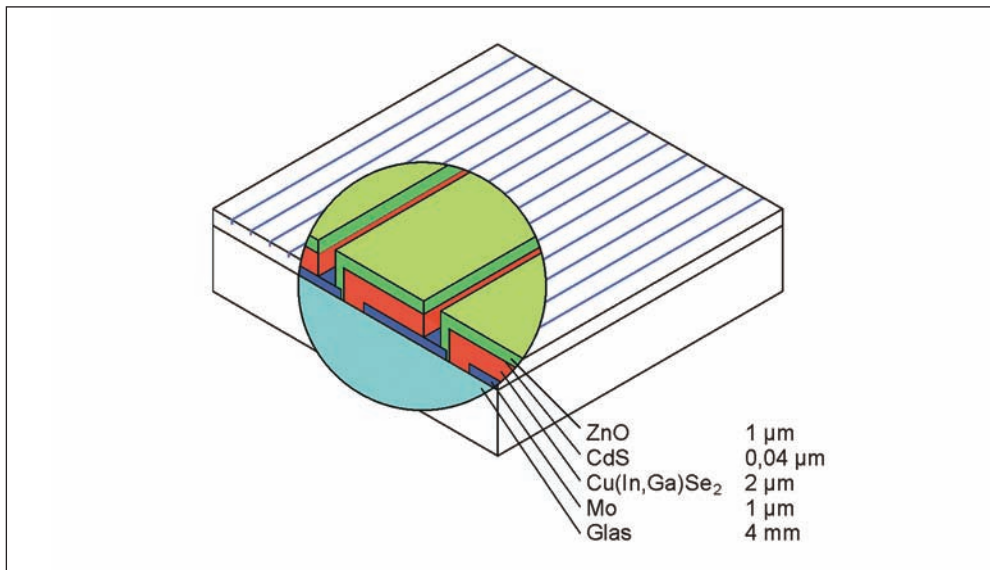


Abb. 9 Integrierte Serienschaltung für Solarmodule der zweiten Generation

Abbildung 9 zeigt den grundsätzlich anderen Aufbau von Modulen aus dünnen Schichten. Im Gegensatz zur klassischen Scheiben-Technologie aus kristallinem Silizium werden nicht zunächst Scheiben, dann Zellen und anschließend Module fabriziert, sondern die Modulherstellung erfolgt in einem integrierten Prozeß. Die photovoltaisch aktive Schicht, welche die Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie umwandelt, ist auf einem möglichst kostengünstigen Substrat großflächig abgeschieden und auf Vorder- und Rückseite mit Kontaktschichten versehen. Statt eine einzige große Zelle herzustellen, die einen hohen Strom, aber eine geringe Spannung liefern würde, strukturiert man die Schichten auf dem Substrat zu einzelnen Zellstreifen und verschaltet mit Hilfe einer integrierten Serienschaltung diese Streifen zum Modul. Auf diese Weise erzielt man große Spannungen und reduziert dadurch ohmsche Verluste nach dem gleichen Prinzip, wie man Transportverluste in der klassischen Energietechnik durch den Einsatz von Hochspannungsleitungen reduziert. Auch Dünnschichtmodule haben typischerweise Spannungen von 20 bis 60 V.

Die Herstellung der integrierten Serienschaltung erfolgt meist mit Hilfe von Lasern, welche die (mindestens) drei deponierten Schichten (Rückseitenkontakt, photovoltaisch aktive Schicht[en], Vorderseitenkontakt) in Streifen »schneiden«. Dabei sind die drei Laserschnitte räumlich gegeneinander so versetzt, daß sich beim fertigen Modul die Hintereinanderschaltung zweier benachbarter Zellen ergibt, d. h., der Rückseitenkontakt einer Streifenzelle ist mit dem Vorderseitenkontakt der benachbarten Zelle verbunden. Jede Streifenzelle ist so lang wie das gesamte Modul, z. B. 1,20 m bei einem kommerziell erhältlichen Modul aus Cu(In,Ga)Se₂.

6.1 Dünnschichtzellen aus amorphem Silizium, Cu(In,Ga)Se_2 und CdTe

Gegenwärtig werden drei verschiedene Materialien für die Herstellung solcher Dünnschichtmodule eingesetzt: amorphes Silizium, CdTe und Cu(In,Ga)Se_2 .

6.1.1 Amorphes Silizium

Wenn man Silizium bei Temperaturen unterhalb von ca. 400 °C aus der Gasphase auf Glas oder ein anderes Substrat deponiert, bilden sich keine Kristallite, sondern die Si-Atome ordnen sich in einer unregelmäßigen amorphen Struktur an. Es entsteht keine periodische Anordnung der Atome wie in einem Kristall. Verglichen mit einem Siliziumkristall liegt der Vorteil darin, daß das amorphe Silizium das Licht viel besser (d. h. in dünneren Schichten) absorbiert. Der Nachteil ist, daß aufgrund der unregelmäßigen Anordnung der Si-Atome nicht jedes Atom vier nächste Bindungsnachbarn findet. Die nicht abgesättigten Bindungen führen zu elektronischen Defekten in der Bandlücke von amorphem Silizium. Zwar kann man viele, doch leider nicht alle dieser Defekte mit Wasserstoff passivieren. An den verbleibenden Defekten »rekombinieren« durch Licht erzeugte Elektron/Loch-Paare. Letztendlich ist es aufgrund der guten Absorption von Licht möglich, ca. 1 µm dünne Schichten aus amorphem Silizium in Dünnschichtmodulen einzusetzen. Leider haben diese Module wegen der grundsätzlich nicht vollständig vermeidbaren elektronischen Defekte in der amorphen Struktur aber wesentlich geringere Wirkungsgrade als Module aus kristallinem Silizium. Der geringe Wirkungsgrad von Zellen und Modulen aus amorphem Silizium degradiert zusätzlich unter Beleuchtung.

Die weltbeste kleinflächige Zelle aus amorphem Silizium, die aus einer Stapelfolge von drei verschiedenen amorphen Si-Solarzellen mit unterschiedlichem Ge-Gehalt besteht, zeigt nach YANG und Mitarbeitern (1997) zu Beginn der Beleuchtung einen Standard-Wirkungsgrad von 14,6 %, nach 1000 h Beleuchtung ist ein stabiler Wert von 13 % erreicht. Einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung geben DENG und SCHIFF (2003).

Degradationen des Wirkungsgrades um 10 bis 20 % sind typisch für Solarzellen und Module aus amorphem Silizium. Kommerzielle Module haben nach SCHADE und MAURUS (2003) typische (stabilisierte) Standard-Wirkungsgrade von 5 bis 6 %. Leider sind die Herstellkosten von Modulen mit nur 1 µm dünnen Schichten von amorphem Silizium *nicht* niedriger als die von solchen mit 300 µm dicken Siliziumscheiben. Da der Wirkungsgrad von Zellen und Modulen aus amorphem Silizium (und seinen Legierungen mit Kohlenstoff und Germanium) typischerweise nur halb so groß ist wie bei Modulen aus kristallinem Silizium, sind die Kosten *pro Watt* elektrischer Ausgangsleistung der »amorphen Module« etwa gleich groß wie die der »Kristallinen« oder liegen sogar darüber.

Zellen und Module aus amorphem Silizium finden Anwendungen in Nischenmärkten: Wenn man flexible Zellen braucht (Beschichtung von Stahlbändern, Textilien, Plastikfolien) und bei Betrieb von Zellen unter geringen Beleuchtungsintensitäten (Armbanduhren, Taschenrechner, Gartenlampen usw.) kann dieses Material einen Vorteil ausspielen. Amorphes Silizium (oft auch a-Si genannt) hat eine Bandlücke $E_g = 1,7$ eV (verglichen mit $E_g = 1,1$ eV für kristallines Silizium). Deshalb zeigen a-Si-Zellen niedrige Sperr sättigungsströme auf, was weniger Verluste im Falle von geringen Beleuchtungsintensitäten, z. B. unter Beleuchtungsbedingungen in Innenräumen ergibt. Genau deshalb enthalten Taschenrechner (die ja auch im

Winter in Innenräumen funktionieren sollen) a-Si-Zellen. GEMMER (2003) untersuchte kürzlich die Verlustprozesse von Zellen aus amorphem Silizium, Cu(In,Ga)Se_2 und kristallinem Silizium unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen in einer Dissertation am Institut des Autors. In Innenräumen hat amorphes Silizium tatsächlich einen auch theoretisch verstandenen Vorteil gegenüber Standardzellen mittleren Wirkungsgrades (15 %) aus kristallinem Silizium.

6.1.2 CdTe

Es ist erstaunlich, daß eine Verbindung, die das toxische Schwermetall Cd enthält, überhaupt für eine »grüne« Technologie wie die Photovoltaik eingesetzt wird. Ein CdTe-Modul der Fläche 1 m^2 mit einer Leistung von 100 W enthält nach ZWEIBEL, MOSKOWITZ und FTHENAKIS (1998) etwa so viel Cd wie eine NiCd-Taschenlampenbatterie, d. h. ca. 10 g.

Die CdTe-Forschung für Solarzellen hat eine lange Tradition. Da das Phasendiagramm von Cd und Te nur eine einzige stabile Verbindung, CdTe, enthält, kann man dieses Material heutzutage relativ leicht mit verschiedenen Verfahren (z. B. durch Sublimation, Gasphasentransport, Elektrodeposition, Kathodenzerstäuben usw.) in Form von dünnen Filmen herstellen. Als Substrat dient meist eine Glasplatte. Erste brauchbare Kristalle für die Elektronik stellte FRERICHS (1947) her. Für die Photovoltaik wurde CdTe interessant, weil LOFERSKI (1956) zum ersten Mal CdTe als ideales Photovoltaikmaterial vorschlug. Er begründete diesen Vorschlag damit, daß die Bandlücke von CdTe mit $E_g = 1,5 \text{ eV}$ optimal auf das Sonnenspektrum angepaßt sei. Die ersten CdTe-Solarzellen von seinem RCA-Kollegen RAPPAPORT (1959) zeigten einen Wirkungsgrad von etwa 2 %, seither treibt die Forschung an diesem Material die Wirkungsgrade in die Höhe. LOFERSKIS Rechnungen sind seit mindestens 1961 überholt, als SHOCKLEY und QUEISSER (1961) zeigten, daß die ideale Bandlücke bei einer ganz anderen Energie ($E_g = 1,26 \text{ eV}$, siehe Abb. 7) liegt und die Obergrenzen auch durch ganz andere, thermodynamisch begründbare, oben diskutierte Mechanismen (strahlende Rekombination) begrenzt werden, als LOFERSKI (1956) annahm. Mit dem damaligen Stand des Wissens legte LOFERSKI 1956 z. B. die für Silizium maximal denkbare, theoretische Obergrenze des Wirkungsgrades auf 21 %. Mit experimentell erreichten 24,7 % Effizienz ist dieser Wert längst überschritten. Trotzdem begründen selbst heute CdTe-Forscher (z. B. MCCANDLESS und SITES 2003 in einem kürzlich erschienenen Übersichtsartikel) ihre Forschung immer noch mit diesen längst überholten Rechnungen von LOFERSKI und der Aussage, CdTe hätte »die ideale Bandlücke« für ein Photovoltaik-Material.

Tatsächlich liegt der bisher beste von WU et al. (2001) erzielte Wirkungsgrad für CdTe-Zellen mit 16,5 % weit unter demjenigen von einkristallinem Silizium (24,7 %). Allerdings sind die auf Glas abgeschiedenen CdTe-Schichten polykristallin, und die Polykristallinität ist wohl eine der wesentlichen Ursachen, wieso CdTe selbst bei kleinen Flächen die 20 %-Marke bisher nicht erreicht hat. Allein von der Bandlücke her gesehen, müßte nach Abbildung 7 schließlich *jedes* Material mit einer Bandlücke E_g zwischen $E_g = 0,9 \text{ eV}$ und $E_g = 1,6 \text{ eV}$ unter AM1,5G-Beleuchtung die 30%-Marke übertreffen, *wenn es in diesem Halbleiter nur die strahlende Rekombination* als einzigen elektronischen Verlust gäbe. Es kommt also entscheidend darauf an, die kristallographische und elektronische Perfektion, insbesondere die Beweglichkeit der Ladungsträger und die Homogenität der Halbleiter zu optimieren, um ideale Strom/Spannungskennlinien zu erhalten.

WERNER, MATTHEIS und RAU (2004) wiesen kürzlich darauf hin, daß räumliche Potentialfluktuation im Volumen und an Korngrenzen in polykristallinen Materialien genau die in CdTe (und auch Cu(In,Ga)Se₂ sowie feinkristallinem Silizium) beobachteten, so genannten »Idealitäten« (d. h. Abweichungen von der idealen Form) in Strom/Spannungskennlinien verursachen können. Diese Effekte führen zu den von feinkristallinen Halbleitern wohlbekannten Begrenzungen der Leerlaufspannungen, Füllfaktoren und damit des Wirkungsgrades.

In Deutschland produziert die Firma ANTEC großflächige (ca. 1 m² große) CdTe-Module in einer Fertigungsanlage mit einer jährlichen Produktionskapazität von 10 MW. Die Modulwirkungsgrade betragen typischerweise 7 %. Neben der amerikanischen Firma First Solar (ca. 2 MW jährliche Produktionskapazität) ist ANTEC weltweit der letzte Hersteller mit einer Produktionskapazität von einigen MW. Ende des Jahres 2002 haben die Firma BP-Solar (10 MW Produktion) in den USA und die Firma Matsushita Battery (1,2 MW Produktion) in Japan die Produktion von CdTe-Modulen eingestellt. In Japan wird die Forschung an CdTe aus ökologischen Gründen nicht mehr gefördert.

CdTe hat mit $E_g = 1,5$ eV eine relativ große Bandlücke. Derzeit ist nicht klar, ob diese große Bandlücke für CdTe einen (theoretisch denkbaren) höheren Energieertrag über das Jahr erbringt. Wegen des in Deutschland relativ oft bedeckten Himmels ist neben dem Wirkungsgrad bei voller Sonnenstrahlung auch derjenige bei geringen Beleuchtungsintensitäten für einen hohen Jahresenergieertrag, gemessen in kWh/(kW a), entscheidend. Während diese Ausbeute für Module aus kristallinem Silizium in Deutschland typischerweise 1000 kWh/(kW a) beträgt, sind die Werte für CdTe widersprüchlich und reichen von 700 kWh/(kW a) bis 1100 kWh/(kW a). Es wäre vorstellbar, daß die hohe Bandlücke von CdTe zu einem besseren Shuntverhalten und so zu einer geringeren Wirkungsgradabnahme bei geringerer Beleuchtungsintensität führt. Darüber hinaus ist rein theoretisch nach GREEN (2003a) bei einer höheren Bandlücke auch die Wirkungsgradabnahme bei hohen Temperaturen (die Module erhitzen sich in Deutschland auf dem Dach bis zu 60 °C) geringer als bei kristallinen Siliziummodulen.

Erst sehr genaue Messungen werden in den nächsten Jahren zeigen, ob hier ein Vorteil von CdTe liegen könnte. Bei der Angabe solcher Jahresenergieausbeute kommt es sehr genau darauf an, wie groß die in Watt gemessene Leistung der Module tatsächlich ist. Man erhält rein rechnerisch eine hohe gemessene Jahresenergieausbeute pro kW Leistung einer Photovoltaik-Anlage, wenn die tatsächliche Leistung der Module größer ist als tatsächlich angenommen. Die Leistung auf dem Typenschild der Module wird mit oft nur ± 10 % Genauigkeit spezifiziert.

6.1.3 Cu(In,Ga)Se₂

Auch bei Modulen aus Cu(In,Ga)Se₂ ist vor wenigen Jahren für Siemens-Module von JARDINE und Mitarbeitern (2001) eine höhere Jahresausbeute als bei kristallinem Silizium berichtet worden. Auch hier ist jedoch offen, ob die für die Module angenommene Leistung der tatsächlichen Leistung entspricht, da sich Module aus Cu(In,Ga)Se₂ unter Beleuchtung verändern.

Die Herstellung des Halbleiters² Cu(In,Ga)Se₂ erfolgt bei Temperaturen um 550 °C und damit bei wesentlich niedrigeren Temperaturen als die Herstellung von Siliziumscheiben, was eine Einsparung des Energieeinsatzes bei der Modulherstellung verspricht. Die besten Schichten erhält man, wenn man die vier Elemente Cu, In, Ga, Se gleichzeitig im Vakuum auf Glasplatten aufdampft und das Mischungsverhältnis genau auf Cu(In_{0,77},Ga_{0,23})Se₂ ausrichtet. Für

² Die Verbindung wird oft auch CIGS genannt.

Zellen mit einer Fläche von $0,5 \text{ cm}^2$ sind von RAMANATHAN et al. (2003) Wirkungsgrade von über 19 % erzielt worden. Vom Wirkungsgrad unter Standardbedingungen her gesehen ist dieser Verbindungshalbleiter damit der bei weitem erfolgreichste und vielversprechendste Dünnschichthalbleiter.

RAU und SCHOCK (1999) sowie SHAFARMAN und STOLT (2003) geben einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung. Nach vielen Jahren Vorarbeit am Institut für Physikalische Elektronik (*ipe*) und am Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung (ZSW) in Stuttgart ging die Technologie des *ipe* und des ZSW vor wenigen Jahren in Marbach am Neckar bei der neu gegründeten Firma WÜRTH SOLAR zunächst in eine Pilotproduktion von ca. 1 MW Solarmodulen pro Jahr. Die Entscheidung über einen Ausbau zu einer Produktion von 10 MW/Jahr steht an. Bereits heute liefern Module einer Größe von $60 \times 120 \text{ cm}^2$ regelmäßig Wirkungsgrade um 12 % und erreichen damit nahezu den Wirkungsgrad handelsüblicher Module aus kristallinem Silizium.

Vom physikalischen Standpunkt her gesehen ist das Materialsystem $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}, \text{Ga}_x)\text{Se}_2$ deshalb besonders interessant, weil die Bandlücke E_g vom Ga-freien CuInSe_2 mit $E_g = 1,04 \text{ eV}$ bis zum In-freien CuGaSe_2 mit $E_g = 1,68 \text{ eV}$ kontinuierlich durch Veränderung des Gehaltes x variiert werden kann. Es wäre im Prinzip denkbar, auf der Basis dieses Materialsystems mehrere dünne Halbleiterschichten mit unterschiedlichem Gallium-Gehalt x und dadurch unterschiedlicher Bandlücke E_g aufeinander zu stapeln, um so das Sonnenlicht besser auszunutzen. Leider hat sich diese Hoffnung bisher nicht erfüllt. Die besten Solarzellen erhält man mit einem optimalen Ga-Gehalt von $x = 0,23$ und einer Bandlücke von $E_g = 1,15 \text{ eV}$. Sobald man den Ga-Gehalt gegenüber dem optimalen x erhöht oder erniedrigt, fällt der Wirkungsgrad. Vermutlich wird es nicht gelingen, hocheffiziente Tandemzellen zu bauen und auf diese Weise einen prinzipiellen Vorteil gegenüber der auf Siliziumscheiben basierenden Photovoltaik auszuspielen zu können.

Derzeit stellen sich folgende physikalische, ökologische und ökonomische Fragen bei dieser Technologie:

- *Physikalische Wirkungsgradbegrenzungen:* CIGS ist polykristallin, wenn es auf ein Fremdsubstrat deponiert wird. Die Korngrößen von unter $1 \mu\text{m}$ führen zu einer inhärenten strukturellen Inhomogenität auf mikroskopischer Skala und damit auch zu inhomogenen elektronischen Eigenschaften. Vermutlich begrenzen Inhomogenitäten auf allen Größenskalen die maximal möglichen Wirkungsgrade selbst bei kleinsten Zellenflächen für CIGS auf ca. 20 %. Der Unterschied gegenüber Weltrekordzellen aus einkristallinem Silizium beträgt dann ca. 5 %. Dieser Unterschied wird langfristig auch auf Modulebene herrschen. Es ist bereits heute möglich, kommerzielle Module aus kristallinem Silizium mit 20 % Wirkungsgrad herzustellen. Im Falle von CIGS gibt es möglicherweise eine durch die physikalischen Konsequenzen der elektronischen Inhomogenitäten vorgegebene Obergrenze von 15 % Modulwirkungsgrad.
- *Instabilitäten und Verkapselung der Module:* CIGS-Module verändern ihren Wirkungsgrad unter Beleuchtung, allerdings werden sie im Gegensatz zu amorphem Silizium besser; hier sind derzeit viele Fragen offen. Die ca. $2 \mu\text{m}$ dünnen Schichten werden zwischen zwei 3 mm dicke Glasplatten eingeschlossen, um das Eindringen von Wasserdampf zu vermeiden, was zu einer Degradation führen würde. Dünnschicht-Module aus CIGS sind bei gleicher Fläche und Leistung nahezu doppelt so dick (und schwer) als diejenigen aus kristallinem Silizium, die mit einer Glasplatte auskommen.

- *Ökologische Fragen:* Das Element Se im Cu(In,Ga)Se_2 hat eine relativ geringe biologische Aktivität, aber viele seiner Verbindungen sind sehr aktiv und hochgradig giftig. Insbesondere das Gas H_2Se , das in manchen Selenisierungsprozessen eingesetzt wird, ist extrem toxisch. Selbst wenn man diesen Prozeß vermeidet, enthalten bisher alle Module eine ca. 50 nm dünne CdS-Schicht als elektronisch notwendigen Puffer zum Frontkontakt aus ZnO. Ganz abgesehen von der Giftigkeit von Cd selbst wird zur Deposition von CdS eine giftige, wäßrige Lösung mit Thioharnsäure verwendet. Manche Herstellprozesse erfordern das Abätzen von metallischen Oberflächenphasen unter Verwendung von giftigen Zyanidlösungen. Je größer die Produktionsstätten, um so größer werden – abgesehen von den Gesundheitsgefahren für das Personal – die Entsorgungsprobleme der bei der Produktion entstehenden Abfälle. Solche Probleme sind jedoch nicht neu. In der galvanischen Industrie werden sie sicher beherrscht. Selbst wenn in einigen der Herstellprozesse giftige Chemikalien eingesetzt werden, sind die im Modul vorhandenen Giftstoffe – von den Mengen her gesehen – nahezu vernachlässigbar, und es ist nicht zu erwarten, daß im Normalbetrieb aus den Solarmodulen Giftstoffe in die Umgebung gelangen.
- *Ökonomische Fragen:* FRANTZIS et al. (2000) und SCHOTT (2003) diskutieren die Ökonomie der Herstellprozesse unterschiedlicher Dünnschichttechnologien im Vergleich zur scheinbaren Siliziumtechnologie. Derzeit liegen demnach *alle* Dünnschichttechnologien in den direkten Herstellkosten pro Watt Modulleistung *oberhalb* derjenigen von Modulen aus (blockgegossenem) kristallinem Silizium. Nach SCHOTT (2003) sind etwa im Jahr 2010 für eine CIGS-Fabrik einer Produktionskapazität von ca. 50 MW/Jahr gleich hohe Herstellkosten wie beim kristallinen Silizium zu erwarten. Das Kostenniveau, auf dem der Gleichstand von SCHOTT (2003) erwartet wird, liegt bei 0,5 bis 1 Euro/W. Es ist nur schwer vorstellbar, daß selbst die Siliziumtechnologie diese Kosten schon im Jahr 2010 erreicht.
- *Vorkommen der Elemente:* Das Vorkommen und die jährlichen Produktionsraten von Indium könnten langfristig das Durchsetzungsvermögen der Technologie von Cu(In,Ga)Se_2 begrenzen. Wenn man 20 % des derzeit weltweit jährlich gewonnenen Indiums für die Photovoltaik einsetzen würde, dann wäre nach ANDERSON (2000) eine jährliche Produktion von 1 GW CIGS-Modulen mit derzeitiger Technologie möglich.³ Wenn das gegenwärtige Wachstum des Modulumsatzes mit 20 bis 30 % Zuwachs pro Jahr anhält, dann beträgt die gesamte jährliche weltweite Photovoltaik-Produktion im Jahr 2010 zwischen 2 und 5 GW und im Jahr 2020 zwischen 15 und 60 GW. Es müßte also zu erheblich höheren Produktionsraten von In kommen, wenn man mit Cu(In,Ga)Se_2 in einer solchen Situation einen größeren Marktanteil am Modulmarkt abdecken wollte. Wahrscheinlich würden die Preise für In dann steigen. Wenn das gesamte derzeit bekannte und ökonomisch abbaubare In mit 100 % Ausbeute in CIGS-Modulen verwendet würde, könnte man weltweit nach ANDERSON (2000) überhaupt nur 90 GW an Photovoltaik-Leistung aus CIGS-Modulen installieren. Aufgrund des Vorkommens von Te betrüge die Obergrenze für CdTe-Solarzellen 300 GW, verglichen mit einer derzeit weltweit installierten Kraftwerksleistung von ca. 3 TW und einem weltweiten Stromverbrauch von ca. 14000 TWh. Wenn man demnach sämtliches derzeit bekannte, ökonomisch abbaubare Indium mit 100 % Ausbeute in CIGS-Modulen verarbeitete und ständig wieder mit 100 % Ausbeute recycelte, bedeuten 90 GW an

3 Eine CIGS-Fabrik mit 100 MW Jahreskapazität, die es vielleicht erlaubte, in den Herstellkosten mit der Silizium-Scheibentechnik gleichzuziehen, würde damit 2 % der gegenwärtigen jährlichen Weltproduktion von Indium verbrauchen!

CIGS Modulen nur 90 GW/3000 GW = 3 % an der weltweiten Kraftwerksleistung und (1000 anstatt 5000 Vollaststunden) nur 0,6 % am weltweiten Stromverbrauch gemessen in Wattstunden.

6.2 Dünnschichtzellen aus kristallinem Silizium

Ganz anders als bei CdTe und Cu(In,Ga)Se₂ gäbe es im Falle einer Dünnschichttechnologie auf der Basis von kristallinem Silizium weder Probleme mit der Ökologie noch mit dem Vorkommen des Elements. Das vollkommen ungiftige Element Silizium ist (nach Sauerstoff) das zweithäufigste Element in der Erdkruste und – wegen seiner Anwendung in der Mikroelektronik – am besten von allen Elementen erforscht. Sofern man Silizium in einkristalliner Form zu Solarzellen prozessiert, erhält man die oben berichteten Wirkungsgrade von nahezu 25 %. Sobald jedoch aus Kostengründen nicht einkristalline, sondern polykristalline Scheiben verwendet werden, fallen diese Wirkungsgrade schnell unter 20 %. Im Falle von dünnen, auf Fremdsubstraten wie z. B. aus der Gasphase abgeschiedenen, polykristallinen Filmen ist es sehr schwer, selbst die 10 % Marke zu übertreffen. WERNER et al. (2001), BERGMANN (1999) und SOPORI (2003) beschreiben den Stand der aktuellen Forschung.

Bei der Herstellung von Dünnschichtzellen aus kristallinem Silizium steht man vor dem Hauptproblem, daß kristallographische Defekte im Silizium stark elektronisch aktiv sind, viel mehr als in CdTe und Cu(In,Ga)Se₂. Sobald die Korngrößen in Siliziumfilmen unter 100 µm fallen, sinken nach WERNER (2000) auch die Wirkungsgrade drastisch. Bei der Deposition von Silizium auf Fremdsubstraten erhält man jedoch maximal ca. 1 µm große Körner und damit Wirkungsgrade weit unter 10 %. Es scheint im Falle des kristallinen Siliziums nur zwei Wege zu mit CdTe- und Cu(In,Ga)Se₂-Filmen vergleichbaren Wirkungsgraden zu geben:

- *Sehr langsame Deposition von Si aus der Gasphase in einer stark wasserstoffhaltigen Atmosphäre.* Bei langsamer Deposition (ca. 0,5 nm/s) haben dann die auf dem Substrat deponierten Si-Atome genügend Zeit, ihre Bindungen gut mit Nachbar-Atomen oder Wasserstoff abzusättigen. Da mindestens etwa 2 µm dicke Schichten nötig sind, um im Falle des relativ schlecht absorbierenden kristallinen Siliziums genügend Licht in der dünnen Schicht zu absorbieren (bei amorphem Silizium ist die Absorption viel besser), benötigt man ca. zwei Stunden, um die Schicht abzuschneiden. Sobald die Depositionsraten höher oder die Schichtdicke noch größer wird, sinken die Wirkungsgrade unter die 10 % Marke. Eine derartige Technologie wird von der Firma KANEKA eingesetzt. Die Höchstwirkungsgrade von kleinflächigen stabilisierten Zellen betragen nach YAMAMOTO et al. (2000) 12,0 %. Die 0,4 m² großen, in Japan kommerziell erhältlichen Module auf kostengünstigen Glassubstraten erzielen unter Standardbedingungen (nicht stabilisierte) typische Wirkungsgrade von 11 %.
- *Verwendung möglichst großer Körner.* Nach der Deposition aus der Gasphase kann man die kleinen Siliziumkörner mit Hilfe von Lampen oder Elektronenstrahlquellen wieder aufschmelzen und langsam abkühlen, um größere Körner zu erhalten. Hierzu sind jedoch teure Hochtemperatursubstrate wie z. B. Graphit nötig, welche die Schmelztemperaturen von Silizium von über 1400 °C auch aushalten. Es ist deshalb fraglich, ob solche Technologien jemals die klassische erste Generation der Photovoltaik ablösen können.

Wirklich hohe, mit CIGS vergleichbare Wirkungsgrade kann man wahrscheinlich nur mit *einkristallinen* Filmen aus Silizium erzielen. Eine Möglichkeit hierzu ist es, dünne Filme von einer einkristallinen Scheibe abzulösen und auf ein Glassubstrat zu transferieren. Die Forschungsgruppe des Autors (BERGMANN et al. 2002), hält mit einem Zellwirkungsgrad von über 16 % derzeit den Weltrekord bei dieser Technologie und peilt 20 % Wirkungsgrad an. Techniken, die *einkristallines* Silizium verwenden, sind gleichzeitig in der Lage, hohe Wirkungsgrade zu erzielen und die Vorteile der Dünnschichttechnik zu nutzen. Ob solche Techniken allerdings kostengünstiger sind als die konventionelle Technik Siliziumscheiben, ist derzeit vollkommen offen.

6.3 Perspektiven der Dünnschichttechnik

Während noch vor fünf Jahren eine gewisse Euphorie bei den Vertretern der klassischen Dünnschichttechnik für die Photovoltaik zu verzeichnen war, scheint sich in letzter Zeit Ernüchterung breit zu machen. Tatsächlich hat keines der Dünnschichtmaterialien amorphes Silizium, CdTe, Cu(In,Ga)Se₂ bisher bewiesen, daß es jemals einen signifikanten Kostenvorteil in der Modulherstellung gegenüber Modulen aus kristallinem Silizium hätte. In den letzten Jahren sind mehr Produktionsstätten geschlossen als aufgebaut worden. Ob für Cu(In,Ga)Se₂ in Deutschland eine Massenproduktion entsteht, ist derzeit offen. Geringere Herstellkosten als beim kristallinen Silizium sind auf viele Jahre hinaus nicht sichtbar.

Es scheint, daß es mit Dünnschichttechnik auf der Basis von CdTe und Cu(In,Ga)Se₂ schwierig sein wird, mit der Leistung, Kostendegradation und langfristig auch der Verfügbarkeit von Modulen aus kristallinem Silizium mithalten zu können. Da schon heute in einer einzelnen Fabrik Produktionsvolumina für kristallines Silizium von über 100 MW pro Jahr existieren (z. B. Firma Sharp in Japan), erscheint es schwer vorstellbar – wenn nicht unmöglich – mit einer Produktionsleistung von einigen MW pro Jahr in der Dünnschichttechnik mit der »economy of scale« der klassischen Siliziumtechnik mithalten, geschweige denn, dagegen zu konkurrieren. Folglich werden sich CdTe und Cu(In,Ga)Se₂ wahrscheinlich nur Nischenmärkte erobern können. Solche Nischenmärkte könnten im Bereich der flexiblen Zellen, z. B. für die Unterhaltungselektronik liegen.

Flexible Module sind bisher nur auf der Basis von amorphem Silizium verfügbar. Es wird schwer, dieses Material durch CdTe oder Cu(In,Ga)Se₂ zu verdrängen. Allein die für CdTe und Cu(In,Ga)Se₂ erforderlichen Prozeßtemperaturen sprechen dagegen, da wirklich kostengünstige Substrate wie z. B. Plastik zwar mit amorphem Silizium bei ca. 100–150 °C, aber nicht mit CdTe oder Cu(In,Ga)Se₂ beschichtet werden können, bei denen die Herstelltemperaturen zwischen 400 und 550 °C liegen. Für den Einsatz der Photovoltaik bei Leistungen oberhalb von ca. 100 W (auf Hausdächern, in Fassaden oder in Großkraftwerken) sind dagegen gar keine flexiblen Module nötig. Der Markt für flexible Module ist deshalb begrenzt, und es bedarf keiner jährlichen Produktionskapazität von mehr als 50 MW. Mit geringeren Produktionskapazitäten für Dünnschichttechnologien an *einem* Standort wird es aber sehr schwer werden, mit der Kostendegradation der Technik von kristallinem Silizium mithalten zu können. Eventuell gelingt es aber, der CdTe- oder Cu(In,Ga)Se₂-Technologie ganz neue Märkte zu erschließen. Diese könnten zum Beispiel in der Anwendung für Satelliten (CIGS hat eine besonders hohe Strahlenhärte) oder in der Beschichtung von Autodächern liegen.

Dennoch ist kaum zu erwarten, daß sich die Lernkurve der Module aus kristallinem Silizium (siehe Abb. 3) mit einer Dünnschichttechnik auf der Basis von CdTe oder Cu(In,Ga)Se₂

schneller durchlaufen ließe, selbst wenn man diese Materialien auf Glassubstraten herstellte. Dagegen spricht allein schon die erforderliche akkumulierte Produktion und die Psychologie des Marktes. Es stellen sich drei grundsätzliche Fragen:

- Werden Photovoltaik-Module, die Schwermetalle oder toxische Materialien enthalten, einen Markt finden, wenn es Konkurrenzprodukte mit gleichen technischen Eigenschaften, aber ohne diese Giftstoffe, gibt? Selbst wenn die Schichten maximal 2 µm dünn und zwischen zwei Glasplatten eingeschlossen sind, ist die Verwendung toxischer Stoffe in einem Photovoltaik-Modul zumindest in Deutschland und Japan schwer vermittelbar.
- Ist es zielführend und der Öffentlichkeit vermittelbar, die Markteinführung solcher Module, die Schwermetalle enthalten, zu unterstützen, wenn es darum geht, einer »grünen« Technologie zum Durchbruch zu verhelfen?
- Ist es sinnvoll, solche Photovoltaik-Technologien weiter zu verfolgen, die aufgrund des Vorkommens und der Förderraten der Elemente langfristig keinen wesentlichen Beitrag zum weltweiten Stromverbrauch leisten können?

Langfristig könnte für CdTe und Cu(In,Ga)Se₂ der Absatzmarkt fehlen, der das unternehmerische Risiko des Aufbaus von Produktionsstätten für die Massenproduktion rechtfertigt.

Die Europäische Union plant, ab dem Jahr 2008 keine Batterien, die Cd enthalten, mehr zuzulassen und Cd aus elektronischen Geräten zu verbannen. Es ist schwer nachvollziehbar, warum ausgerechnet ein »grünes« Produkt wie ein Solarmodul von solchen Regelungen ausgenommen sein sollte. Mit CdTe und Cu(In,Ga)Se₂ wird sich deshalb die Dünnschichtmodultechnik in der Photovoltaik möglicherweise *nicht* breit durchsetzen und die auf Scheiben von kristallinem Silizium basierende konventionelle Technik auch nicht ersetzen können.

Von allen Technologien hat die Dünnschichttechnik auf der Basis von *kristallinem* Silizium weitaus das größte Potential. Sie könnte es ermöglichen, möglichst viel Wissen, Prozeß-Know-how und bereits getätigte Investitionen in Produktionsmitteln von Scheiben, Zellen und Modulen aus kristallinem Silizium auch für dünne Schichten *aus Silizium* zu nutzen. Die Vorteile des kristallinen Siliziums (unbegrenzt Vorkommen des Elements, vollkommene Ungiftigkeit, problemlose Entsorgbarkeit, nachgewiesenes Potential für hohe Wirkungsgrade, hohe Ladungsträgerbeweglichkeit, Produktionsstätten im MW-Bereich, Wissenstransfer aus der Mikroelektronik und der Technologie der Flachbildschirme usw.) können mit den Vorteilen der Dünnschichttechnik (geringer Materialverbrauch, hoher Durchsatz, geringere Erwärmung der Module, Nischenmärkte für flexible Zellen eroberbar, usw.) kombiniert werden.

7. Wege zu höheren Wirkungsgraden, dritte Generation Photovoltaik

Wirkungsgrade oberhalb 30 %

Sobald man nicht nur ein einziges Halbleitermaterial verwendet, sondern mehrere Halbleiter aufeinander stapelt, dann sind theoretisch bis zu 68 % Umwandlungswirkungsgrad in Solarzellen möglich. Wenn man das Sonnenlicht zudem noch konzentriert, sind – rein theoretisch gesehen – die Wirkungsgrade durch strahlende Rekombination in den Halbleitern, wie in Tabelle 2 dargestellt, auf maximal 86 % begrenzt. Es gibt also viel Spielraum für Grundlagenforschung, um die Wirkungsgrade weiter zu erhöhen. Die derzeitige Forschung an Photovoltaikeffekten, die zu sehr hohen Wirkungsgraden führen könnten, lösten WERNER et al.

(1994a,b) aus, welche zeigten, daß man die Obergrenzen von 86 % auch mit einem einzigen Halbleitermaterial erreichen könnte, wenn man effiziente Stoßionisation in Solarzellen ausnutzte.

Tab. 2 Maximal theoretisch mögliche Wirkungsgrade η_{\max} von Stapel-Solarzellen aus m verschiedenen Halbleitermaterialien, deren Bandlücken jeweils optimal auf das angenommene AM0-Spektrum der Sonne angepaßt sind, nach DE VOS (1992, S. 131). Das Sonnenlicht ist entweder nicht ($C_{\text{conc}} = 1$) oder maximal ($C_{\text{conc}} = 46\,300$) konzentriert. Als einziger, thermodynamisch nicht vermeidbarer Verlustprozeß ist strahlende Rekombination zugelassen. Sobald man mehr als ein einziges Halbleitermaterial verwendet oder das Sonnenlicht konzentriert, steigen die Wirkungsgrade über die Shockley-Queisser-Grenze von 30 %.

| Anzahl m der Halbleitermaterialien | η_{\max} [%], $C_{\text{conc}} = 1$ | η_{\max} [%], $C_{\text{conc}} = 46\,300$ |
|--------------------------------------|--|--|
| 1 | 30 | 41 |
| 2 | 43 | 56 |
| 3 | 49 | 64 |
| ∞ | 68 | 86 |

Es gibt im wesentlichen fünf verschiedene Möglichkeiten für Wirkungsgradsteigerungen, die auch in den Büchern von GREEN (2003b) sowie MARTI und LUQUE (2004) diskutiert sind:

- *Verwendung von mehreren aufeinander gestapelten Halbleitern mit unterschiedlichen Bandlücken:* Bereits heute gibt es nach KING et al. (2003) Solarzellen aus aufeinander gestapelten GaInP/GaAs/Ge-Schichten, die das nicht konzentrierte, terrestrische AM1,5G-Sonnenspektrum mit 33 % Effizienz umwandeln. Leider sind diese Solarzellen sehr teuer und deshalb nur für Anwendungen im Weltraum geeignet. Für das »Arbeitspferd« der Photovoltaik, kristallines Silizium, ist bisher kein kostengünstiges und hoch entwickeltes »Topmaterial« mit einer Bandlücke von etwa 2 eV verfügbar, das die kurzwelligen Anteile des Sonnenlichtes besser nutzt. In der Entwicklung eines solchen Materials liegen die größten Chancen für die Erzielung noch größerer Wirkungsgrade bei gleichzeitiger Ausnutzung des gesamten Know-hows des kristallinen Siliziums. Tabelle 2 zeigt, welche Werte für das AM0-Sonnenspektrum außerhalb der Erdatmosphäre möglich wären.
- *Konzentration des Sonnenlichtes:* Sobald man das Sonnenlicht optisch konzentriert, können die Wirkungsgrade auch mit einem einzigen Halbleitermaterial theoretisch über 30 % gesteigert werden, siehe Tabelle 2. Die GaInP/GaAs/Ge-Zellen von KING et al. (2003) zeigen bei 66facher Konzentration des Sonnenlichtes eine Effizienz von 35,2 %. Allerdings müssen die optischen Systeme der Sonne nachgeführt werden, und es ist nur der direkt von der Sonne kommende Anteil der Strahlung, nicht dagegen der diffus in der Atmosphäre gestreute Anteil des Sonnenlichtes nutzbar. Da im Jahresmittel der Anteil der diffusen Strahlung in Deutschland zwei Drittel beträgt (nur ein Drittel kommt direkt von der Sonnenscheibe auf die Zellen), bietet der Einsatz von nachgeführten Konzentratorsystemen in unseren Breiten keinen ökonomischen Vorteil. Einen Ausweg würden die z. B. von SWANSON (2003) diskutierten stationären Konzentratoren anbieten.
- *Ausnutzung der Photonenenergie unterhalb der Bandlücke:* Selbst wenn man nur einen einzigen Halbleiter verwendet, kann man sich vorstellen, daß Photonen mit einer Energie unterhalb der Bandlücke durch hintereinander geschaltete mehrmalige Absorption von Photonen über die Bandlücke angeregt werden. Dazu müßte es innerhalb der Bandlücke erlaubte energetische Zustände geben, die zwar die optische Anregung der Elektronen über

solche Zwischenzustände vom Valenzband ins Leitungsband zulassen, den Rückweg, die Rekombination, jedoch nicht. Bereits GÜTLER und QUEISSER (1970) diskutierten diesen Prozeß. Unter bestimmten Bedingungen, wenn alle Übergänge nur durch strahlende Prozesse möglich wären, erscheinen nach LUQUE und MARTI (1997) und MARTI et al. (2004) – wenigstens im Prinzip – Wirkungsgradsteigerungen möglich.

- *Ausnutzung der Photonenenergie oberhalb der Bandlücke:* Diejenige Energie der Photonen, welche die Bandlücke übersteigt, führt bisher lediglich zu einer Erwärmung der Solarzelle. Sobald die Überschußenergie der Elektronen noch einmal den Wert der Bandlücke übertrifft (dann muß die Photonenenergie mindestens doppelt so groß sein wie die Bandlücke), kann theoretisch die Überschußenergie der Elektronen dazu benutzt werden, ein zweites Elektron vom Valenzband ins Leitungsband zu schießen. WERNER et al. (1994b) wiesen nach, daß ein solcher Prozeß nicht nur theoretisch, sondern auch experimentell möglich ist, und lösten damit die Forschungsaktivitäten zur »dritten Generation« der Photovoltaik aus. WÜRFEL (1997) schlug vor, die »heißen« Elektronen über energiselektive Kontakte aus den Solarzellen abzuführen.
- *Photonen-Konversion:* Am interessantesten wäre es, wenn man das farbige Sonnenlicht vor Eintritt in das Halbleitermaterial mit möglichst geringem Verlust an Energie und Photonen monochromatisch oder wenigstens schmalbandiger machen könnte. Dazu muß man z. B. ein hochenergetisches Photon des ultravioletten Lichtes in zwei infrarote Photonen umwandeln (»down-conversion«) oder umgekehrt (»up-conversion«). Diese Effekte wurden von TRUPKE et al. (2002a,b) diskutiert. Gegenwärtig sind allerdings keine realen Systeme in Sicht, welche diese Photonenkonversion effizient unter der Beleuchtung mit nicht konzentriertem Sonnenlicht vornehmen könnten. Am ehesten ist noch die »down-conversion« denkbar, welche die Obergrenze des Wirkungsgrades für nicht konzentriertes Sonnenlicht für ein einziges Halbleitermaterial mit optimaler Bandlücke von 30 % auf 40 % anhebt.

Die fünf diskutierten Möglichkeiten haben sehr unterschiedliche kurz- oder mittelfristige Realisierungschancen. Stapelzellen gibt es bereits heute. Allerdings haben sie nicht zu Kostensenkungen in der Photovoltaik beigetragen, da sie in ausreichender Qualität nur auf der Basis teurer, sonst für Halbleiterlaser eingesetzter III/V-Halbleiter epitaktisch herstellbar sind. Da es bisher kein hoch entwickeltes Halbleitermaterial gibt, das man oben auf einer Hocheffizienz-Zelle aus kristallinem Silizium als »Top-Material« epitaktisch in hoher elektronischer Qualität abscheiden könnte, gibt es bisher auch keine hocheffizienten Stapelzellen auf der Basis des kristallinen Siliziums. Alle bisherigen Versuche, ein solches Top-Material auf Silizium abzuscheiden, sind an der relativ kleinen Gitterkonstanten von Silizium gescheitert. Geeignete und bekannte Materialien mit einer Bandlücke um 2,0 eV, die theoretisch gut zu Silizium passen würden, haben eine wesentlich größere Gitterkonstante und können deshalb nicht in der notwendigen Perfektion epitaktisch auf Silizium hergestellt werden. Hier könnte der *Transfer* von Halbleitermaterialien einen Ausweg bieten.

Bis auf Tandem- und Konzentratorzellen hat von den neuartigen Konzepten, die hochenergetische oder niederenergetische Photonen ausnutzen möchten, als einziges die von WERNER et al. (1994b) diskutierte Ladungsträgermultiplikation durch Stoßionisation einen fundierten experimentellen Nachweis. Für eine effiziente, praktische Ausnutzung des Konzeptes muß aber die Bandstruktur von Halbleitern optimiert werden. Im Vergleich dazu ist es sicherlich einfacher, Tandemzellen auf der Basis von Silizium zu entwickeln.

Photonenkonversion, vor allem *down-conversion*, erscheint noch am ehesten machbar. Allerdings müßte der optische Wirkungsgrad der Konverter sehr hoch sein, damit gegenüber einer hocheffizienten Zelle aus kristallinem Silizium überhaupt ein Gewinn möglich wäre.

8. Schlußfolgerungen

Die Photovoltaik hat in den letzten Jahrzehnten eine drastische Kostendegradation durchlaufen. Alle zehn Jahre halbieren sich die Preise der Module und die Erzeugungskosten von Photovoltaik-Strom. In den letzten Jahren ist der Umsatz der Photovoltaik-Module jährlich um jeweils etwa 30 % gestiegen. Wenn das Wachstum der in Deutschland installierten Photovoltaik-Anlagen mit nur 22 % bis zum Jahr 2020 anhält, wird die Photovoltaik dann etwa 2 % zum elektrischen Strom in Deutschland beitragen und die Erzeugungskosten von Photovoltaik-Strom sich auf ca. 20 Euro-Cent/kWh belaufen. Für den Endverbraucher wären diese Gestehungskosten dann etwa gleich hoch wie derjenige Preis, den er bereits heute für die kWh Strom (einschließlich Grundpreis) an sein Elektrizitätswerk bezahlt. Im Süden von Europa liegen die Gestehungskosten für Photovoltaik-Strom etwa bei der Hälfte des Wertes von Deutschland.

Weder die verfügbaren Flächen noch die energetischen Rückzahlzeiten sind heute noch ernst zu nehmende Argumente gegen die Photovoltaik. Sie kann deshalb in den Jahren nach 2020 erheblich größere Anteile als 2 % zur Stromerzeugung in Deutschland beitragen. Ein Anteil von 10 % für das Jahr 2050 erscheint ohne weiteres möglich.

Wenn sich die Photovoltaik überhaupt für die großtechnische Erzeugung von Strom durchsetzt, dann kann sie das auf absehbare Zeit wohl nur auf der Basis von kristallinem Silizium, das heute den Modulmarkt zu über 95 % beherrscht. Für andere Materialien wie CdTe oder Cu(In,Ga)Se₂ bleiben wahrscheinlich nur Nischenmärkte. Sie haben keine entscheidenden physikalischen, chemischen oder technologischen Vorteile gegenüber kristallinem Silizium. Im Gegenteil: CdTe hat gravierende ökologische Nachteile. In geringerem Maße gilt diese Aussage auch für Cu(In,Ga)Se₂, bei dem das geringe Vorkommen und die geringe Förderrate des Metalls Indium einer großflächigen Anwendung entgegen stehen.

Eine wesentliche ökonomische Verbesserung der Dünnschichttechnologie gegenüber der Silizium-Scheibentechnologie erscheint möglich, sofern es gelingt, eine effiziente Dünnschichttechnologie auf der Basis von kristallinem Silizium selbst zu entwickeln. Hier bedarf es noch erheblicher Forschungsanstrengungen, da das kristalline Silizium nur in einkristalliner oder polykristalliner Form mit mindestens 1 mm Korngröße die hohen Wirkungsgrade von Filmen aus Cu(In,Ga)Se₂ erreicht. Auch für eine solche Dünnschichttechnologie auf der Basis von Filmen aus kristallinem Silizium sind Module mit Wirkungsgraden, die wesentlich über 15 % hinausgehen, aber nicht zu erwarten.

Höhere Wirkungsgrade auf der Basis von Siliziumscheiben oder -filmen wären möglich, wenn ein »Top«-Material mit einer Bandlücke oberhalb von 2 eV entwickelt werden könnte. Dieser Halbleiter könnte – auf der Frontseite einer Silizium-Solarzelle aufgebracht – den hochenergetischen Anteil des Sonnenspektrums besser umwandeln. Dieses neue Material müßte aber exzellente elektronische Eigenschaften haben, vergleichbar mit einkristallinem Silizium; eine hohe Beweglichkeit der Ladungsträger und geringe Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen wären unabdingbare Forderungen an ein solches Material. Dieses noch unbekanntes Material müßte nicht unbedingt ein »direkter« Halbleiter mit starker Absorption des Sonnenlichtes sein.

Relativ wenig erforscht sind stationäre Konzentratoren, die das Sonnenlicht auf die Zellen in einem Modul konzentrieren, ohne daß die Optik nachgeführt werden muß. Hier scheint erhebliches Potential zu liegen.

Prinzipiell könnte man auch ohne Konzentration des Sonnenlichtes Solarzellen mit Wirkungsgraden weit über 30 % bauen. Allerdings sind einige der Konzepte der »Photovoltaik der dritten Generation«, welche in diese Richtung zielen, noch spekulativ. Nur wenige Konzepte beruhen nicht nur auf theoretischen Überlegungen, sondern auch auf gemessenen physikalischen Effekten. Von allen neuen Konzepten erscheint die Konversion von Photonen noch am einfachsten, da hierzu die optischen Eigenschaften der photoelektrischen Wandler von den elektrischen Eigenschaften getrennt optimiert werden könnten. Die photonen-konvertierenden Vorrichtungen könnten mit der jetzigen Solarzellentechnologie kombiniert werden und so zu Wirkungsgradsteigerungen beitragen.

Auch die »konventionelle« Technologie der kristallinen Siliziumscheiben entwickelt sich rasant weiter. Hier stecken noch erhebliche Kostensenkungspotentiale. So werden die Wirkungsgrade der Module in den nächsten Jahren bei sinkenden Kosten immer mehr in Richtung 20 % steigen und neue Technologien Einzug in die Photovoltaik-Fabriken halten. Hierzu gehören z. B. die Reduktion aller Prozeßtemperaturen durch das Prozessieren mit Lasern, dünnere und größere Scheiben, zunehmende Automatisierung, Vereinfachungen in den Reinigungsschritten zur Herstellung von »solar grade«-Silizium, bessere und einfachere Oberflächenpassivierungen, Kontaktierungen und Verschaltungen. Eine nachhaltige Förderung der Forschung und Markteinführung wird zu einem Durchlaufen der Lernkurve hin zu geringeren Herstellkosten führen.

In jedem Fall wird die Photovoltaik, wenn sie sich überhaupt für die großtechnische Erzeugung von elektrischem Strom durchsetzt, für diesen Markt auf dem Material Silizium basieren müssen, langfristig eventuell noch kombiniert mit einer seiner Verbindungen oder einer anderen häufig vorkommenden, ungiftigen und über Jahrzehnte stabilen, sehr robusten Materialverbindung.

Dank

Der Autor dankt Ralf BERGMANN, Hans-Joachim QUEISSER, Uwe RAU, Hans-Werner SCHOCK und Markus SCHUBERT für die jahrelange fruchtbare wissenschaftliche Zusammenarbeit. Elsette DOMAINES-OTT, Isabel KESSLER, Regine NOACK, Christine VON REKOWSKI und Fritz PFISTERER waren von unverzichtbarer Hilfe bei der Erstellung des Manuskriptes.

Literatur

- ANDERSSON, A.: Materials availability for large-scale thin-film photovoltaics. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 8, 6–76 (2000)
- BERGMANN, R. B.: Crystalline Si thin-film solar cells: A review. *Appl. Phys. A* 69, 187–194 (1999)
- BERGMANN, R. B., RINKE, T., BERGE, C., SCHMIDT, J., and WERNER, J. H.: Advances in monocrystalline Si thin-film solar cells by layer transfer. *Solar Energy Materials Solar Cells* 74, 213–218 (2002)
- BERNREUTHER, J.: Ein riesiges Potenzial. *Photon* 57–60 (2002a)
- BERNREUTHER, J.: Mehrfache Ernte. *Photon* 49–52 (2002b) Dezember 2002
- BERNREUTHER, J.: Passender Mosaikstein. *Photon* 55–61 (2003)
- Bundesumweltministerium*: www.bmu.de (2003)
- DE VOS, A.: *Endreversible Thermodynamics of Solar Energy Conversion*. Oxford: Oxford University Press 1992
- DENG, X., and SCHIFF, E. A.: Amorphous silicon-based solar cells. In: LUQUE, A., and HEGEDUS, S. S. (Eds.): *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*; pp. 505–565. New York: Wiley 2003

- FRANTZIS, L., JONES, E., and LITTLE, A. D.: Opportunities for cost reductions in photovoltaic modules. In: SCHEER, H., McNELIS, B., PALZ, W., OSSENBRINK, H. A., and HELM, P. (Eds.): Proc. 16th EU Photovolt. Solar. Energ. Conf.; pp. 2100–2103. London: James and James 2000
- FRERICHS, R.: The photo-conductivity of »incomplete phosphors«. Phys. Rev. 72, 594–601 (1947)
- GEMMER, C.: Analytische und numerische Untersuchungen von Solarzellen unter wechselnden Beleuchtungsbedingungen. Stuttgart: Diss. Univ. Stuttgart 2003
- GREEN, M. A.: General dependence of solar cell performance and implications of device modelling. Prog. Photovolt: Res. Appl. 11, 333–340 (2003a)
- GREEN, M. A.: Third Generation Photovoltaics. Advanced Solar Energy Conversion. Berlin: Springer 2003b
- GÜRZENICH, D.: Methodische Aspekte zu kumulierten Energieaufwendungen und Emissionen bei Photovoltaikanlagen in der Europäischen Union. Bochum: Diss. Univ. Bochum 2002
- GÜTTLER, G., and QUEISSER, H.-J.: Impurity photovoltaic effect in silicon. Energy Conversion 10, 51–55 (1970)
- HEINLOTH, K.: Die Energiefrage – Bedarf und Potentiale, Nutzung, Risiko und Kosten. 2. Aufl. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg 2003
- HOFFMANN, W.: PV Solar electricity: One among the millennium industries. In: McNELIS, B., PALZ, W., OSSENBRINK, H. A., and HELM, P. (Eds.): Proc. 17th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.; pp. 851–861. München: WIP-Renewable Energies 2002
- HOFFMANN, W.: <http://www.fv-sonnenenergie.de/fileadmin/fvsonne/politik/03.06.PA.Hoffmann.pdf> (2002)
- IEA: Trends in Photovoltaic Applications. Report IEA-PVPS T1-12:2003, www.iea-pvps.org (2003)
- JARDINE, C. N., CONIBEER, G. J., LANE, K., and PV-COMPARE: Direct comparison of eleven PV-technologies at two locations. In: McNELIS, B., PALZ, W., OSSENBRINK, H. A., and HELM, P. (Eds.): Northern and Southern Europe, Proc. 17th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.; pp. 724–727. München: WIP-Renewable Energies 2002
- KALTSCHMITT, M., and WIESE, A.: Photovoltaische Stromerzeugung. In: Erneuerbare Energieträger in Deutschland. Potentiale und Kosten. S. 19–64. Berlin: Springer 1993
- KALTSCHMITT, M., und SCHNEIDER, S.: Photovoltaische Stromerzeugung. In: KALTSCHMITT, M., WIESE, A., und STREICHER, W. (Eds.): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. S. 263. Berlin: Springer 2002
- KING, R. R., FETZER, C. M., COLTER, P. C., EDMONDSON, K. M., STAVRIDES, A. A. P., YOON, H., KINSEY, G. S., COTAL, H. L., ERMER, J. H., SHERIF, R. A., and KARAM, N. H.: Lattice matched and metamorphic GaIn/GaAs/Ge concentrator solar cells. In: Proc. 3rd World Conf. Photovolt. (2003, im Druck)
- LEHMANN, H., and PETER, S.: Assessment of Roof and Façade Potentials for Solar Use in Europe ISES Solar World Congress – Solar Energy for a Sustainable Future. Göteborg 2003 (im Druck)
- LOFERSKI, J. J.: Theoretical considerations governing the choice of the optimum semiconductor for photovoltaic solar energy conversion. J. Appl. Phys. 27, 777–784 (1956)
- LUQUE, A., and MARTI, A.: Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions of intermediate levels. Phys. Rev. Lett. 78, 5014–5017 (1997)
- MARTI, A., and LUQUE, A.: Next Generation Photovoltaics – High Efficiency through Full Spectrum Utilization. Bristol: Institute of Physics 2004
- MARTI, A., CUADRA, L., and LUQUE, A.: Intermediate-band solar cells. In: MARTI, A., and LUQUE, A. (Eds.): Next Generation Photovoltaics; pp. 140–146. Bristol: Institute of Physics Publishing 2004
- MCCANDLESS, B. E., and SITES, J. R.: Cadmium telluride solar cells. In: LUQUE, A., and HEGEDUS, S. S. (Eds.): Handbook of Photovoltaic Science and Engineering; pp. 617–662. New York: Wiley 2003
- NITSCH, J.: Perspektiven regenerativer Energien am Beispiel Deutschlands. TA-Datenbank-Nachrichten 10 (3), 12–21 (2001)
- NITSCH, J., und FISCHEDICK, M.: Eine vollständig regenerative Energieversorgung mit Wasserstoff – Illusion oder realistische Perspektive? Deutscher Wasserstoff-Energietag www2.dlr.de/TT/system/publications/Wasserstoff/Es-sen.pdf (2002)
- QUASCHNING, V.: Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert. Düsseldorf: VDI Verlag 2000
- RAMANATHAN, K., CONTRERAS, M. A., PERKINS, C. L., ASHER, S., HASOON, F. S., KEANE, J., YOUNG, D., ROMERO, M., METZGER, W., NOUFI, R., WARD, J., and DUDA, A.: Properties of 19,2 % efficiency ZnO/CdS/CuInGaSe₂ thin-film solar cells. Prog. Photovolt. Res. Appl. 11, 225–230 (2003)
- RAPPAPORT, P.: The photovoltaic effect and its utilization. RCA Rev. 20, 373–397 (1959)
- RAU, U., and SCHOCK, H. W.: Electronic properties of Cu(In,Ga)Se₂ heterojunction solar cells – Recent achievements, current understanding and future challenges. Appl. Phys. A 69, 131–147 (1999)
- SCHADE, H., and MAURUS, H.: Experiences and lessons learned from a pilot line. In: BUBENZER, A., and LUTHER, J. (Eds.): Photovoltaic Guidebook for Decision Makers; pp. 170–178. Berlin: Springer 2003
- SCHOTT, T.: Industrial technology and cost reduction assessment. In: BUBENZER, A., and LUTHER, J. (Eds.): Photovoltaic Guidebook for Decision Makers; pp. 107–170. Berlin: Springer 2003
- SHAFARMAN, W. N., and STOLT, L.: Cu(In,Ga)Se₂ solar cells. In: LUQUE, A., and HEGEDUS, S. S. (Eds.): Handbook of Photovoltaic Science and Engineering; pp. 567–616. New York: Wiley 2003

- SHOCKLEY, W., and QUEISSER, H.-J.: Detailed balance limit of efficiency of p - n junction solar cells. *J. Appl. Phys.* 32, 510–519 (1961)
- SOPORI, B.: Thin-film silicon solar cells. In: LUQUE, A., and HEGEDUS, S. S. (Eds.): *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*; pp. 307–357. New York: Wiley 2003
- SWANSON, R. M.: Photovoltaic concentrators. In: LUQUE, A., and HEGEDUS, S. S. (Eds.): *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*; pp. 449–503. New York: Wiley 2003
- TIEDJE, T., YABLONOVITCH, E., CODY, G. D., and BROOKS, B. G.: Limiting efficiency of silicon solar cells. *IEEE Trans. Electron. Dev.* ED–31, 711–716 (1984)
- TRUPKE, T., GREEN, M. A., and WÜRFEL, P.: Improving solar cell efficiency by down-conversion of high-energy photons. *J. Appl. Phys.* 92, 1668–1674 (2002a)
- TRUPKE, T., GREEN, M. A., and WÜRFEL, P.: Improving solar cell efficiencies by up-conversion of sub-band-gap light. *J. Appl. Phys.* 92, 4117–4122 (2002b)
- VEDW: www.strom.de (2003)
- VERLINDEN, P. J., TERAQ, A., SMITH, D. D., MCINTOSH, K., SWANSON, R. M., GANAKAS, G., and LASICH, J. B.: Will we have a 20 %-efficient (PTC) photovoltaic system? In: MCNELIS, B., PALZ, W., OSSENBRINK, H. A., and HELM P. (Eds.): *Proc. 17th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.*; pp. 385–390. München: WIP-Renewable Energies 2001
- WERNER, J. H.: Perspectives of crystalline silicon thin film solar cells. In: KONAGAI, M. (Ed.): *Technical Digest of 13th Sunshine Workshop on Thin Film Solar Cells*; pp. 41–48. Tokyo: NEDO 2000
- WERNER, J. H., BRENDDEL, R., and QUEISSER, H.-J.: New upper efficiency limits for semiconductor solar cells. In: *Proc. 1st World Conf. Photovoltaic Energy Conversion*; pp. 1742–1745. New York: IEEE 1994a
- WERNER, J. H., DASSOW, R., RINKE, T. J., KÖHLER, J. R., and BERGMANN, R. B.: From polycrystalline to single crystalline silicon on glass. *Thin Solid Films* 383, 95–100 (2001)
- WERNER, J. H., KOLODINSKI, S., and QUEISSER, H.-J.: Novel optimization principles and efficiency limits for semiconductor solar cells. *Phys. Rev. Lett.* 72, 3851–3854 (1994b)
- WERNER, J. H., MATTHEIS, J., and RAU, U.: Efficiency limits of thin film solar cells – Case of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$. In: JAEGER-WALDAU, A. (Ed.): *The Path to Ultra High Efficient Photovoltaics*. Ispra: JRC 2004 (im Druck)
- WU, X., KEANE, J. C., DHERE, R. G., DEHART, C., ALBIN, D. S., DUDA, A., GESSERT, T. A., ASHER, S., LEVI, D. H., and SHELDON, P.: 16.5 % efficient CdS/CdTe polycrystalline thin-film solar cell. In: MCNELIS, B., PALZ, W., OSSENBRINK, H. A., and HELM P. (Eds.): *Proc. 17th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf.*; pp. 995–1000. München: WIP-Renewable Energies 2001
- WÜRFEL, P.: Solar energy conversion with hot electrons from impact ionisation. *Solar energy mater. Solar Cells* 46, 43–52 (1997)
- YAMAMOTO, K., YOSHIMI, M., TAWADA Y., OKAMOTO, Y., and NAKAJIMA, A.: Thin film Si solar cell fabricated at low temperature. *J. Non-Cryst. Solids.* 266–269, 1082–1087 (2000)
- YANG, J., BANERJEE, A., and GUHA, S.: Triple-junction amorphous silicon alloy solar cell with 14.6 % initial and 13.0 % stable conversion efficiencies. *Appl. Phys. Lett.* 70, 2975–2977 (1997)
- ZHAO, J., WANG, A., and GREEN, M. A.: 24.5 % efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7 % efficiency PERL cells on FZ substrates. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 7, 471–474 (1999)
- ZWEIBEL, K., MOSKOWITZ, P., and FTHENAKIS, V.: Thin-film telluride photovoltaics: Environmental, safety and health issues, solutions, and perspectives. NREL Technical Report 520–24057 (1988)

Prof. Dr. Jürgen H. WERNER
Institut für Physikalische Elektronik
Pfaffenwaldring 47
70569 Stuttgart
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 711 6857141
Fax: +49 711 6857143
E-Mail: juergen.werner@ipe.uni-stuttgart.de

Stromerzeugung aus Windenergie – Stand und Perspektiven

Hermann-Josef WAGNER (Bochum)

Mit 6 Abbildungen und 4 Tabellen



Zusammenfassung

Am Ende des Jahres 2003 drehten sich in Deutschland ca. 15000 Windenergiekonverter und erzeugten rd. 5 % des Stromes. Der Gesetzgeber macht ihren Betrieb für den Investor über die letztendlich von allen Stromverbrauchern zu zahlende Einspeisevergütung rentabel. Die nächste Generation von Windenergiekonvertern, die in *Offshore*-Windparks im Meer eingesetzt werden soll, befindet sich zurzeit in der Entwicklungsphase. Deutschland ist bei der Windenergienutzung weltweit die Nummer 1 geworden.

Ausgehend von den physikalischen Grundlagen, dem technischen Stand der Windenergiekonverter und den Entwicklungstendenzen wird im Folgenden das Thema des zukünftigen Potentials aufgegriffen. Dabei wird auch die Fragestellung, inwieweit Windenergieparks bestehende Kraftwerksleistung ersetzen können und wie viel Elektrizität aus Windenergie das bestehende Elektrizitätsnetz aufnehmen kann, berücksichtigt.

Abstract

There are about 15.000 wind energy converters connected to the electrical grid in Germany at the end of the year 2003. Approximately 5 % of the total electricity is produced by wind energy. The investment is profitable for the shareholders due to a reimbursement model for wind energy paid by every electricity consumer in Germany. Germany has become world leader in the use of wind energy. The next step using wind energy will be the installation of large offshore wind farms in the North Sea and in the Baltic Sea.

The following article describes the basic physics of wind energy conversion and the technical status of the converters themselves. The future potential of wind energy use will be discussed with a special view on fitting the produced electricity in the existing grid and its capacity limits.

1. Bauarten von Windenergiekonvertern

Die langjährige Entwicklung der Windenergienutzung hat mehrere Bautypen von Windenergiekonvertern hervorgebracht, die unterschiedlichen Anforderungen entsprechen. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Bauarten.

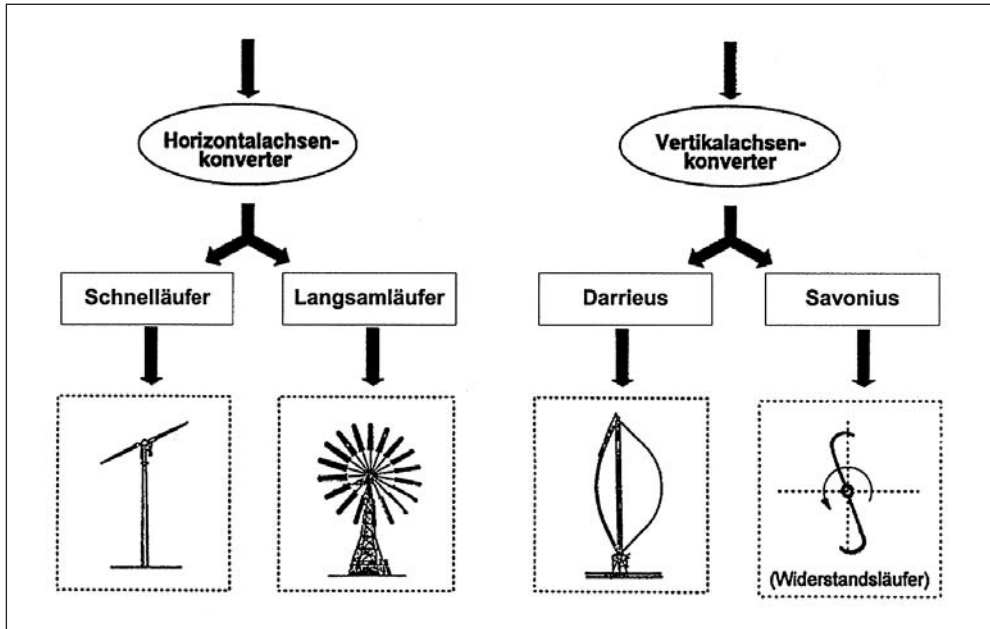


Abb. 1 Übersicht verschiedener Typen von Windenergiekonvertern

1.1 Horizontalachsenkonverter

Die am weitesten verbreitete Technik ist der *Horizontalachsenkonverter*. Er ist gekennzeichnet durch wenige aerodynamisch gut ausgelegte Rotorblätter. Diese sind bei den meisten größeren Konvertern um ihre Längsachse verstellbar und übernehmen somit Steuerungs- und Regelungsaufgaben (*Pitch-Regelung*). Eine weitere Regelungsart besteht darin, die Profile der Flügel aerodynamisch so auszulegen, daß die Strömung ab einer gewissen Leistung abreißt und sich Verwirbelungen bilden (*Stall-Regelung*).

Windenergiekonverter werden heute in der Größenordnung von 10 kW bis zu einigen Megawatt gebaut. Zu Beginn des Jahres 2002 lag die Leistung des größten kommerziell verfügbaren Windenergiekonverters bei 2,5 MW. Größere Anlagen sind – insbesondere im Hinblick auf den *Offshore*-Einsatz – in der Entwicklung.

Horizontalachsenkonverter haben einen relativ hohen Wirkungsgrad und werden deshalb bevorzugt zur Stromerzeugung eingesetzt. Ihre Auslegung erlaubt hohe Rotordrehzahlen, wodurch sie häufig als »Schnellläufer« oder »High-Speed«-Maschinen bezeichnet werden.

Eine ältere Bauweise von Horizontalachsenkonvertern ist der »Vielblattrotor«. Solche Anlagen wurden bereits vor 100 Jahren gebaut und eingesetzt. Sie haben ein großes Anfahr-

drehmoment und werden deshalb bevorzugt zum Wasserpumpen über eine mechanische Verbindung zwischen der Pumpe und dem Rotor eingesetzt. Die Drehzahl des Rotors ist gering, und die Geometrie der Rotorblätter ist aerodynamisch nicht ausgereizt. Als Pumpenantrieb benötigen sie keine Regelung, es muß lediglich ein mechanisches Sicherheitssystem installiert werden, um die Anlage gegen Sturmschäden zu schützen. Um eine ausreichende Energieeffizienz zu erreichen, ist eine Vielzahl von Rotorblättern erforderlich. Wenn diese »Langsamläufer« zur Stromerzeugung eingesetzt werden, müssen ihre Rotorblätter hinsichtlich der aerodynamischen Form optimiert werden. In diesem Fall weisen sie eine kleinere Fläche auf, bedingen aber aufgrund ihrer besseren aerodynamischen Form eine größere Drehgeschwindigkeit. Es hat sich gezeigt, daß die mechanische Stabilität von »Langsamläufern« sehr hoch ist. Viele Anlagen zum Wasserpumpen sind 50 Jahre und länger in Betrieb.

1.2 Vertikalachsenkonverter

Die zweite Gruppe der Windenergiekonverter sind die *Vertikalachsenkonverter*. Ihr Vorteil besteht darin, daß sie nicht der Windrichtung nachgeführt werden müssen. Nachteilig bei ihrem Einsatz ist das niedrige Anlaufdrehmoment. So muß der Darrieus-Konverter über den Generator, der kurzfristig als Motor betrieben wird, in Rotation versetzt werden. Häufig wird auf seiner Spitze ein Savonius-Rotor installiert, der dafür sorgt, daß der Darrieus-Rotor sich in Bewegung setzt.

Savonius-Rotoren – auch in abgewandelter Form – werden häufig als Windgeschwindigkeitsmeßgeräte verwendet.

Eine größere Anzahl von Darrieus-Konvertern wurde Ende der 80er Jahre in Kalifornien, USA, installiert. Beim späteren Ausbau der Windenergie in Europa konnten sie sich jedoch gegen den Horizontalachsenkonverter nicht durchsetzen. Als einer der möglichen Gründe sei die größere Geräuschentwicklung während ihres Betriebes erwähnt. Ein weiterer Nachteil, der die Marktentwicklung beeinflußt hat, besteht darin, daß sie bodengebunden sind. Da die Windgeschwindigkeit mit der Höhe ansteigt, können Darrieus-Rotoren nur relativ geringe Windgeschwindigkeiten ausnutzen. Ihr Einsatzbereich beschränkt sich heute auf einige Kilowatt für die dezentralisierte Elektrizitätsversorgung in Gegenden ohne elektrisches Netz, beispielsweise in Entwicklungsländern.

Der Savonius-Rotor spielt bei der Energieerzeugung keine Rolle. Er wird deshalb im Folgenden nicht näher betrachtet.

2. Physikalische Grundlagen

Zum besseren Verständnis der Zusammenhänge sollen einige physikalische Grundlagen der Windenergienutzung im Folgenden dargestellt werden.

Die Leistung des strömenden Windes (P) errechnet sich wie folgt:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho_a \cdot v^3 \quad [1]$$

mit: E : kinetische Energie, A : Fläche senkrecht zur Windgeschwindigkeit, v : Windgeschwindigkeit, ρ_a : spezifische Dichte der Luft.

Aus Gleichung [1] geht hervor, daß die Leistung des Windes und damit die kinetische Energie proportional zu v^3 ist. Folgerichtig sollten Windenergiekonverter so ausgelegt werden, daß sie möglichst die Zeiten großer Windgeschwindigkeiten ausnutzen. Die Häufigkeit der Windgeschwindigkeit läßt sich mathematisch nach einer Weibull-Verteilung beschreiben. Abbildung 2 läßt den Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die Leistung erkennen.

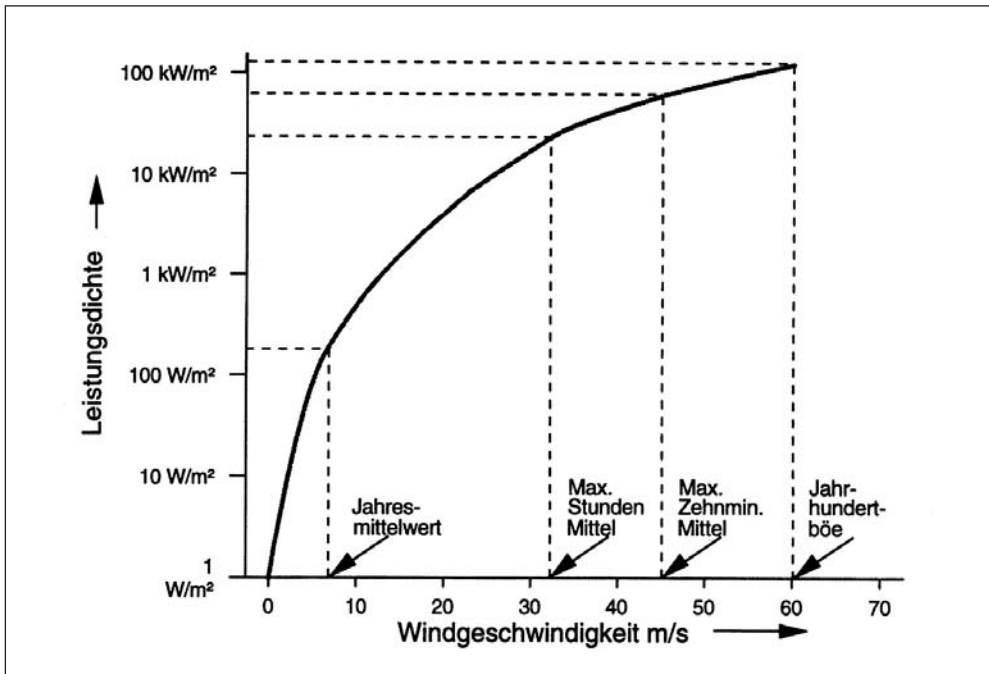


Abb. 2 Windgeschwindigkeit und spezifische Leistung des Windes

In Lehrbüchern findet man häufig die Angabe, daß die Windenergiedichte in Deutschland etwa 200–300 Watt pro m^2 beträgt. Dieser Wert entspricht der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit in Deutschland, die zwischen 5 und 6 m/s liegt. Für den praktischen Betrieb und die Auslegung von Windenergiekonvertern haben diese Werte keinerlei Bedeutung. Die Weibull-Verteilung bedeutet, daß mehr als zwei Drittel der erzeugten Elektrizität im oberen Drittel des Spektrums der Windgeschwindigkeiten anfällt. Vor dem Bau eines Windenergiekonverters müssen deshalb Windgeschwindigkeitsverteilungsprofile in Nabenhöhe des zu bauenden Konverters gemessen werden, um den Konverter optimal für die Bedingungen am Standort konfigurieren zu können.

Aus Sicht der mechanischen Stabilität müssen Windenergiekonverter auf Sekunden Spitzenwerte der Windgeschwindigkeit ausgelegt werden. Ebenfalls aus Sicherheitsgründen müssen sie ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit abgeschaltet und aus dem Wind gedreht werden.

Eine charakteristische Größe für die Auslegung von Windenergiekonvertern ist der *Leistungsbeiwert* c_p . Er gibt an, welcher Anteil der kinetischen Energie des Windes als mechanische Energie auf den Rotor übertragen werden kann. Überlegungen von BETZ belegen, daß der maximale Leistungsbeiwert 59,3 % beträgt (Betz-Zahl). Dieser Wert kann dann erreicht werden, wenn die Geschwindigkeit des Windes hinter der Rotorfläche auf ein Drittel der Geschwindigkeit vor der Rotorfläche reduziert wird. Gut dimensionierte Windenergiekonverter erreichen in der Praxis Leistungsbeiwerte, die knapp unter 50 % liegen. Zusätzliche Verluste treten bei Windenergiekonvertern in den Lagern, im Getriebe und im Generator auf. Auch müssen Hilfssysteme, wie Blattverstellung, Azimutantrieb zur Gondeldrehung oder Bremsen mit Energie versorgt werden. Der gesamte Wirkungsgrad eines Windenergiekonverters – betrachtet als Elektrizität zu kinetischer Energie des Windes – liegt deshalb bei etwa 43 bis 46 %.

Eine weitere Kenngröße stellt die *Schnellaufzahl* λ dar. Sie ist definiert als:

$$\lambda_s = \frac{u_e}{v} \quad [2]$$

mit: u_e : Umlaufgeschwindigkeit an der Rotorblattspitze, v : Windgeschwindigkeit

Die Schnellaufzahl hat einen großen Einfluß auf die Energieeffizienz eines Windenergiekonverters. Konverter mit hoher Energieeffizienz benötigen eine große Schnellaufzahl. Ist dagegen die Schnellaufzahl klein, weist der Konverter eine niedrige Drehzahl auf. Verantwortlich dafür ist das Anwachsen des Anstellwinkels α . Wenn dieser Winkel zu groß wird, reißt die Strömung am Profil ab und wird turbulent. Vergleichbares tritt auf, wenn der Rotor zu schnell dreht und der Anstellwinkel α sehr klein ist. In der Praxis wird die Schnellaufzahl und damit auch die Drehzahl des Rotors durch einen anderen Effekt begrenzt: den Zusammenhang zwischen den Geräuschemissionen und der Umlaufgeschwindigkeit an der Blattspitze in der sechsten Potenz. Aus diesem Grunde werden Windenergiekonverter, die in der Nähe von Wohngebäuden errichtet werden, nachts häufiger mit einer geringeren Umdrehungszahl betrieben als am Tage. Durch spezielle Ausformung der Flügelspitzen (»Winglets«) wird versucht, die Geräuschbildung zu reduzieren.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß Windenergiekonverter möglichst bei hohen Windgeschwindigkeiten arbeiten sollten. Effiziente Anlagen drehen mit hoher Drehzahl, sie haben wenige Rotorblätter, die aber aerodynamisch gut geformt sind.

Langsam laufende Windenergiekonverter verfügen über eine geringere Energieeffizienz. Sie besitzen jedoch ein großes Anfahrtdrehmoment und werden deshalb häufig über einen mechanischen Antrieb zum Pumpen von Wasser eingesetzt. Ihre Rotorblätter sind aerodynamisch nicht optimal geformt, dafür ist eine große Anzahl von Blättern vorhanden.

3. Technische Ausführung von Anlagen

Die nachfolgenden Betrachtungen konzentrieren sich ausschließlich auf schnell laufende Horizontalachsenkonverter. Hinsichtlich der Bauform wird zwischen zwei Design-Typen unterschieden:

- »klassisches« Design mit Getriebe und
- zeitlich jüngere getriebelose Bauform mit einem Vielpol-Generator.

Das so genannte »klassische« oder dänische Design ist in der Abbildung 3 erkennbar.

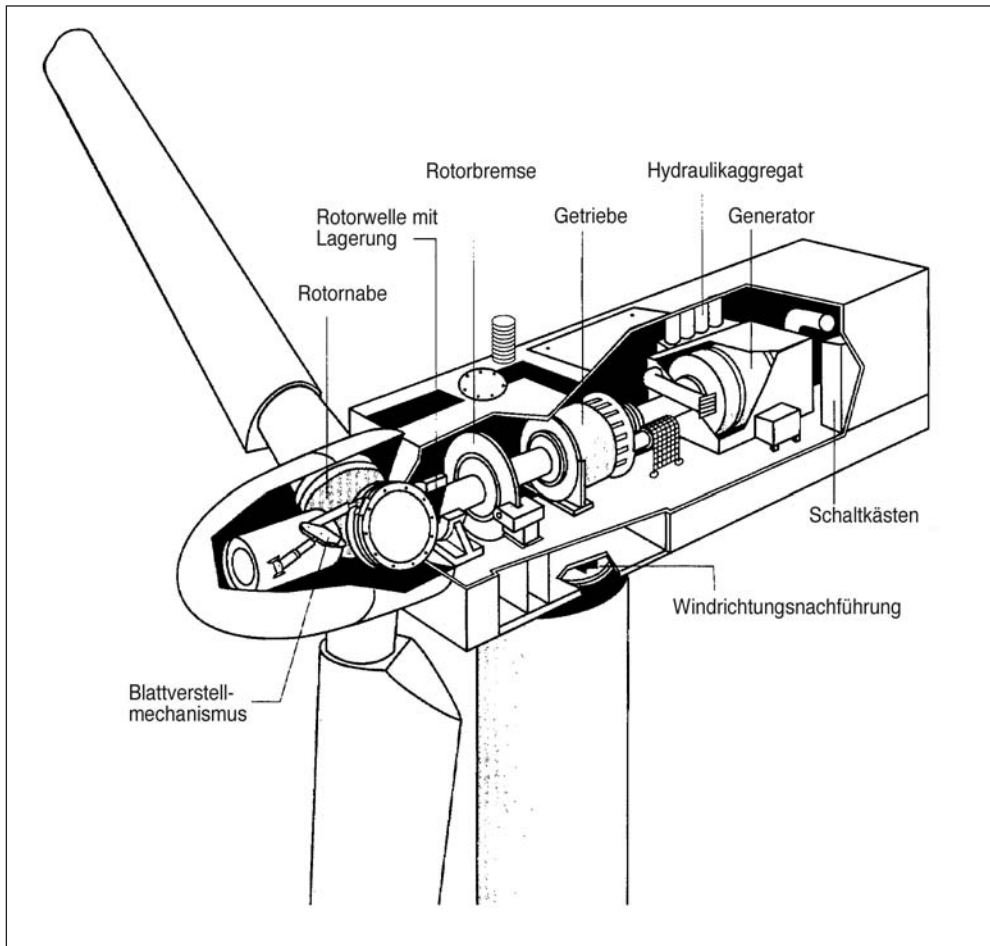


Abb. 3 Windenergiekonverter in der Bauart mit Getriebe

Bei diesem Anlagentyp sind zwei Wellen vorhanden, wobei die erste mit dem Rotorkranz dreht und mittels eines Getriebes auf die nennenswert höhere Drehzahl des elektrischen Generators übersetzt wird. Der elektrische Generator ist mit wenigen Polpaaren ausgestattet und dreht bei einer elektrischen Frequenz von 50 Hz mit 750 U/min (drei Polpaare) bis 3000 U/min (ein Polpaar). Häufig sind die Anlagen mit einer Scheibenbremse ausgestattet. Dies ist dann notwendig, wenn die Rotorblätter nicht einzeln über eine *Pitch*-Regelung verstellt werden können. Ist eine *Pitch*-Verstellung gegeben, so kann der Blattanstellwinkel in einen Bereich gefahren werden, in dem das Blatt so eingestellt ist, daß es bremst. Bei *Stall*-geregelten Anlagen sind mechanische Bremsen erforderlich.

Die Gondel eines Windenergiekonverters wird über elektrische oder hydraulische Antriebe auf dem Turm der Windrichtung nachgefahren. Die Ableitung der elektrischen Energie erfolgt bei großen Anlagen über Kabelschlaufen, die es der Gondel ermöglichen, zwei oder drei

Umdrehungen durchzuführen. Von Zeit zu Zeit muß sie wieder »zurückgedreht« werden. Kleinere Anlagen arbeiten ebenfalls mit Schleifringen. Windenergiekonverter, die nach dem beschriebenen klassischen Design ausgelegt sind, sind von außen an der länglichen Form der Gondel zu erkennen.

Die zweite technische Ausführung verfolgt die Philosophie: die Anzahl der rotierenden Teile aus Wartungsgründen zu begrenzen. Die bauliche Ausführung ist in Abbildung 4 am Beispiel einer Anlage der Firma ENERCON dargestellt.

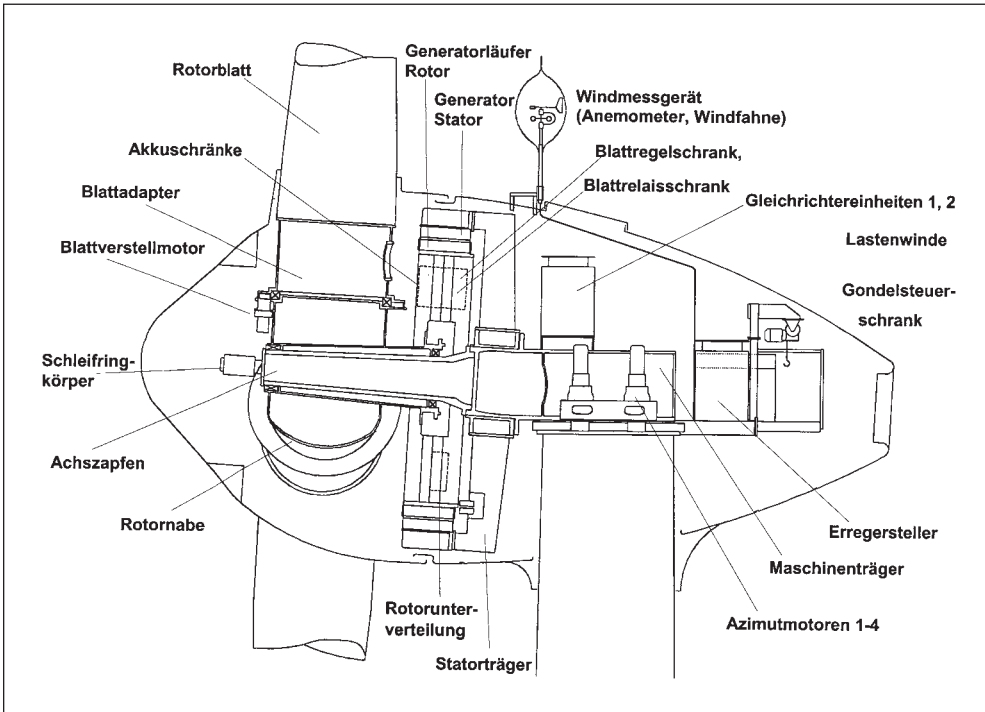


Abb. 4 Windenergiekonverter in der Bauart ohne Getriebe

Bei diesem Typus dreht sich der Rotorkranz um einen feststehenden Schaft. Direkt mit dem drehenden Rotorkranz verbunden ist der Läufer eines Vielpol-Generators (z. B. 60 Polpaare). Die Rotorblätter werden über Einzelantriebe *pitch*-geregelt, so daß die Bremse ebenfalls entfallen kann. Lediglich für Wartungszwecke ist eine einfache mechanische Bremsvorrichtung vorhanden. Die Gondel wird über vier Elektroantriebe Azimut verstellt. Der Vielpol-Generator besitzt einen großen Durchmesser und muß deshalb in die Gondel integriert werden oder aber in einem eigenen Gehäuse vor dem Rest der Gondel untergebracht werden. Von außen ist diese Bauart an der »Eiform« der Gondel erkennbar.

Allen Bauformen gemeinsam ist eine ausgefeilte Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik. Um hohe zeitliche Verfügbarkeiten zu erreichen, sind die Anlagen mit einem Selbstdiagnosesystem ausgestattet, das über ein Fernüberwachungssystem dem Betreiber oder – häufig im Falle eines Wartungsvertrages – dem Hersteller Fehler meldet. Die Umdrehungszahl des Rotorkranzes bewegt sich im Bereich von etwa 10 U/min bis 20 U/min.

Bei einem 1,5 MW-Windenergiekonverter haben die Rotorblätter eine Länge von über 30 m und werden aus Glasfaser verstärktem Kunststoff (GFK) hergestellt. Um Eiswurf im Winter zu verhindern, müssen sie von innen mit warmer Luft beheizt werden. Die Nabenhöhen liegen bei guten Windenergiestandorten entlang der Küste bei etwa 66 m, bei Standorten mit geringerem Windenergieangebot im Binnenland bei Höhen bis zu 100 m.

4. Anbindung an das elektrische Netz

Das elektrische Netz arbeitet mit einer Frequenz von 50 Hz oder 60 Hz (z. B. in USA) und einem konstanten Phasenwinkel. Windenergiekonverter müssen die Elektrizität mit den gleichen Bedingungen in das elektrische Netz einspeisen. Da die Windgeschwindigkeit nicht konstant ist, können Windenergiekonverter die maximale Energieeffizienz nur dann erreichen, wenn sich der Rotor mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten drehen kann. Dies verlangt aber eine Entkopplung der Drehzahl des Rotors von der mit der Drehzahl des Generators verbundenen Netzfrequenz. Sie kann entweder über ein schaltbares, mechanisches Getriebe (mechanische Gänge) oder durch ein Umschalten der Polpaarzahl beim Generator (elektrisches Getriebe) in Stufen erreicht werden. Noch optimaler ist eine Anpassung auf elektrischer Seite zwischen elektrischem Generator und Netz, beispielsweise über bestimmte Bauformen von Asynchrongeneratoren mit weit ausgelegtem Schlupf oder über einen dazwischen geschalteten Gleichstromkreis, der die benötigte Netzfrequenz exakt auf elektronischem Wege aus variablen Inputfrequenzen vom Generator erzeugt. Abbildung 5 verdeutlicht eine solche Schaltungsweise.

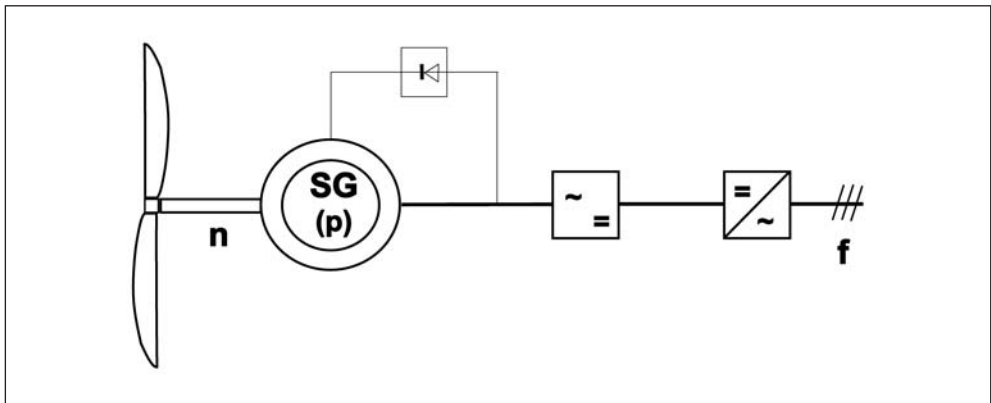


Abb. 5 Ankopplung eines Windenergiekonverters mit einem Synchrongenerator (SG) über einen Gleichstromkreis an das elektrische Netz (p = Polpaarzahl)

Weitere Aspekte, die berücksichtigt werden müssen, sind:

- die Oberwellen, die durch die elektronische Anpassung der Netzfrequenz entstehen können,
- eventuelle Flicker, die sich aus der ungleichmäßigen Drehung des Rotors vor dem Turm ergeben können, und
- die elektromagnetische Verträglichkeit im Hinblick auf elektromagnetische Wellenabstrahlung.

Entsprechende technische Regelwerke schreiben hier Mindestanforderungen vor, die eingehalten werden müssen.

Kleinere Windenergiekonverter haben häufig aus Kostengründen nur eine starre Verbindung zwischen Rotor und elektrischer Netzfrequenz. Sie drehen deshalb mit konstanter (Nenn-) Drehzahl und können Energieanteile, die in höheren Windgeschwindigkeitsprofilen vorhanden sind, nicht ausnutzen. Größere Anlagen dagegen, die auf die vorhin genannte Entkopplung zwischen Drehzahl und Netzfrequenz ausgelegt sind, drehen mit Umdrehungsgeschwindigkeiten von beispielsweise 12 U/min bis 18 U/min. Nur das geschulte Auge des Betrachters ist in der Lage, diese unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu erkennen.

5. Markteinführung und Kostensituation

In den 80er Jahren fiel der Startschuß für den Ausbau der Windenergienutzung in Kalifornien, USA. Über 10000 Windenergiekonverter mit Leistungen bis zu 200 kW pro Anlage wurden installiert. Ein nennenswerter Anteil dieser Anlagen wurde aus Dänemark und auch aus Deutschland importiert. Heute ist ein großer Teil dieser Konverter aufgrund unzureichender Wartung stillgelegt. Zwischenzeitlich ist Deutschland Marktführer beim Bau und bei der Nutzung von Windenergiekonvertern. Tabelle 1 zeigt die Ende 2002 installierte, weltweite Windenergiekapazität (zum Vergleich: Deutschland benötigt am kältesten Tag im Winter eine Kraftwerkskapazität von rd. 80000 MW).

Tab. 1 Weltweit installierte Windenergiekapazität

| Land/Region | Gesamt installierte Windenergiekapazität bis zum Ende des Jahres 2002 (Zahlen gerundet) |
|-----------------|--|
| <i>weltweit</i> | 20000 MW |
| Deutschland | 12000 MW |
| Spanien | 5000 MW |
| USA | 4700 MW |
| Dänemark | 2900 MW |
| Indien | 1700 MW |
| Niederlande | 700 MW |
| Japan | 500 MW |

Eine Vielzahl von Regierungen hat unterschiedliche Förderprogramme, Netzeinspeisevergütungen und/oder Investitionsbeihilfen für die Nutzung erneuerbarer Energien – darunter auch für die Windenergie – eingeführt. In Deutschland wurde die Nutzung der Windenergie für die Betreiber erstmalig durch das Stromeinspeisegesetz, das ab dem Jahr 2000 durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) abgelöst wurde, profitabel. Die Inhalte des EEG sind in Tabelle 2 angegeben.

Tab. 2 Regelungsinhalte des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (Stand: November 2003). Das am 1. April 2000 in Kraft getretene Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) verfolgt das Ziel, den Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Energie- und Stromverbrauch bis 2010 mindestens zu verdoppeln. Im Vergleich zur bisherigen Förderung nach dem Stromeinspeisungsgesetz hat sich u. a. folgendes geändert: Festschreibung von absoluten Vergütungssätzen für Einspeisungen aus erneuerbaren Energien statt der bisherigen Kopplung an die jeweiligen Durchschnittserlöse [Cent/kWh]

| | | | |
|---|---------------------------|------------------------------------|------|
| Wasserkraft, Deponiegas, Grubengas, Klärgas | bis 500 kW | | 8 |
| | von 500 kW bis 5 MW | | 7 |
| Biomasse | bis 500 kW | | 10,2 |
| | von 500 kW bis 5 MW | | 9,2 |
| | von 5 MW bis 20 MW | | 8,7 |
| Windkraft | für die ersten fünf Jahre | Offshore für die ersten neun Jahre | 9,1 |
| | danach Reduzierung bis | | 6,2 |
| Geothermie | bis 20 MW | | 8,9 |
| | über 20 MW | | 7,2 |
| Photovoltaik | bis 5 MW auf Dächern und | | 51 |
| | 100 kW auf Freiflächen | | |

Die Sätze werden ab 1. 1. 2002 bei neu errichteten Anlagen für Biomasse um 1 %, für Windkraft um 1,5 % und für Photovoltaik um 5 % jährlich verringert.

Ausdehnung des Anwendungsbereiches auf Geothermie und Grubengas sowie auf große Biomasse-Anlagen bis 20 MW (bisher: 5 MW);

Degression der Vergütungen für jeweils neu in Betrieb genommene Anlagen für Strom aus Biomasse, Windkraft, solare Strahlungsenergie und Festschreibung dieser Vergütung auf 20 Jahre, bei Altanlagen bis Ende 2019.

Es gilt eine bundesweite Ausgleichsregelung. Danach ist zunächst der unmittelbare Netzbetreiber verpflichtet, eingespeisten Regenerativstrom abzunehmen und zu vergüten. Der Übertragungsnetzbetreiber ersetzt dann dem lokalen Netzbetreiber diese Auslagen. Die Übertragungsnetzbetreiber führen untereinander einen Belastungsausgleich durch. Stromversorger, die Strom an Letztverbraucher liefern, sind grundsätzlich verpflichtet, vom vorgelagerten Übertragungsnetzbetreiber den nach dem EEG abgenommenen Strom anteilig abzunehmen und zu vergüten.

Die aktuellen statistischen Zahlen lassen erwarten, daß die Anzahl der installierten Windenergiekonverter bis zum Ende des Jahres 2003 auf über 15000 mit einer insgesamt installierten elektrischen Leistung von rund 14000 MW anwachsen wird (Tab. 3).

Tab. 3 Übersicht über die Windenergienutzung in Deutschland, Stand 31. 12. 2002 [kW]

| | Leistungsklasse (1000 kW=1 MW) | | | |
|---|--------------------------------|----------|--------|--------|
| | 1- < 750 | 750-1500 | > 1500 | gesamt |
| Anzahl | 7934 | 2125 | 3700 | 13759 |
| Installierte elektrische Leistung [MW] (gerundet) | 3620 | 2350 | 6030 | 12000 |
| Potentielle jährliche elektrische Arbeit [GWh] (gerundet) | 6480 | 4020 | 12600 | 23100 |

Betrachtet man das weltweite Windangebot, so wird deutlich, daß die deutsche Westküste nicht schlecht positioniert ist. Dort lassen sich Ausnutzungsdauern von 2500 h/a erreichen. Dies bedeutet, daß beispielsweise ein Windenergiekonverter mit 1 MW installierter Leistung pro Jahr 2500 MWh Elektrizität erzeugen kann. Diese Elektrizitätsmenge ist jedoch für die elektrische Energieversorgung nicht gesichert. Es kann nicht vorher geplant werden, zu welcher Zeit sie anfällt. Sie muß durch »Backup-Kraftwerke« abgesichert werden. Standorte im Binnenland weisen Ausnutzungsdauern von etwa 1700 h/a auf.

Der gesamte Elektrizitätsverbrauch in Deutschland liegt in der Größenordnung von 500 TWh. Die Windenergie trägt Ende des Jahres 2003 mit knapp 5 % an der gesamten Stromerzeugung bei.

Windenergiekonverter sind für ihre Betreiber profitabel. Häufig werden Windparks als sogenannte Kommanditistenmodelle betrieben. Rund ein Drittel des benötigten Investmentkapitals wird über Kommanditisten als Geldanlagemodell bereitgestellt. Der Rest wird von einer Bank zur Verfügung gestellt und muß innerhalb von 10 bis 15 Jahren zurückgeführt werden. Nach Abschreiben von steuerlichen Anlaufverlusten in den ersten 3 Jahren erhalten die Kommanditisten bis zum 10. Jahr eine relativ geringe Rendite, um dann nach Tilgung des Restkapitals an die Bank eine nennenswerte Rendite zu erwirtschaften. Die Fördersätze des EEG sind so bemessen, daß für die Betreiber der Einsatz ihres Geldes in die Windenergie finanzielle Vorteile bringt. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Struktur der Investitionskosten eines Windparks. Die spezifischen Kosten liegen bei 1 260 Euro/kW.

Tab. 4 Investitionskosten einer Erschließungsmaßnahme von zwei Windparks (Amersdorf und Wellen) mit 10 × 1,5 MW Konvertern, Dezember 2001 (Werte gerundet)

| Investitionsplan | Betrag [Mio Euro] | Anteil [%] |
|---|-------------------|------------|
| Windkraftanlagen, Transport, Montage, Inbetriebnahme, Netzanbindung, Infrastruktur | 15,7 | 83,0 |
| Technische Planung, Baugrunduntersuchungen, Gutachten | 2,0 | 11,0 |
| Ausgleichsmaßnahmen sowie Nutzungsschädigung in der Bauphase | 0,3 | 1,5 |
| Gesellschaftskosten in der Investitionsphase (Notar, Handelsregister, Geschäftsbesorgung), Beratung | 0,3 | 1,5 |
| Kapitalbeschaffung / Finanzierung während der Bauzeit | 0,7 | 3,0 |
| Summe | 19,0 | 100,00 |

6. Dynamik durch die Windenergie im Stromsektor

Wie bereits ausgeführt, stellt die Windenergie für den Lastverteiler ungesicherte Leistung dar. Der Lastverteiler ist dafür verantwortlich, daß zu jeder Zeit genügend Elektrizität in das elektrische Netz eingespeist wird. Er weiß nicht, wann die Windenergie anfällt. Messungen der Gleichzeitigkeit, die im Rahmen des von der Bundesregierung geförderten 250 MW-Windenergieprogramms durchgeführt wurden, zeigen beispielsweise, daß nur 85 % der maximal installierten Kapazität des vermessenen Windparks von 28 MW überhaupt – und dann kurzfristig – zur Verfügung stand (Abb. 6).

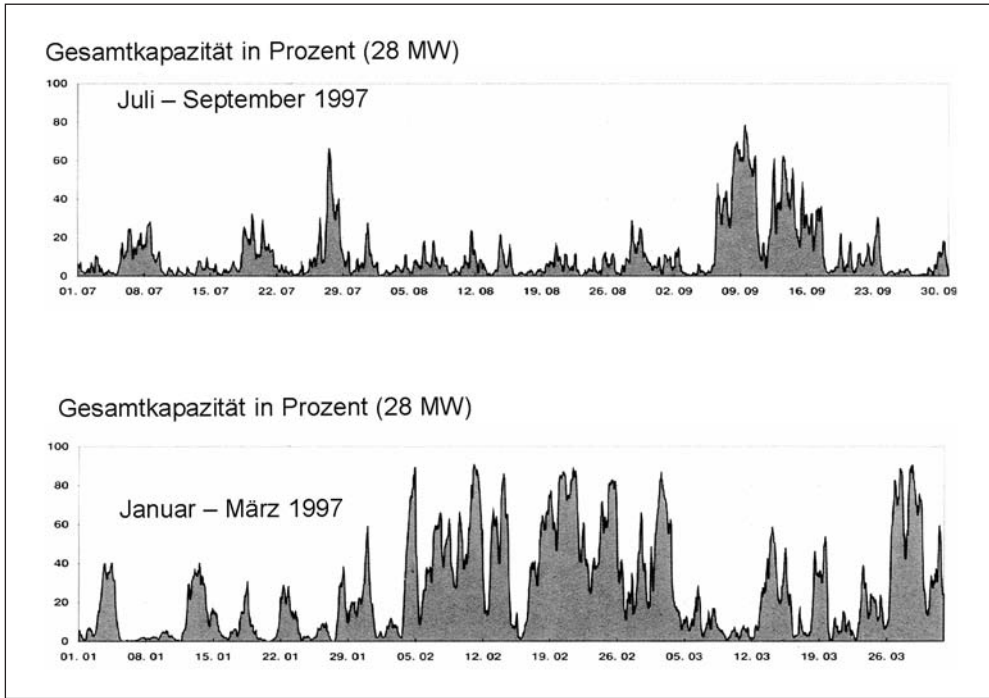


Abb. 6 Gleichzeitigkeit von Windenergiekonvertern, gemessen im Meßprogramm 250 MW Windenergie

Aus den oben genannten Gründen können Windenergiekonverter bisher nur Brennstoffe ersetzen, aber keine Kraftwerkskapazität. Dies war aus Sicht der Netzregelung bisher kein großes Problem, da genügend Regelkapazität im deutschen und europäischen Netz zur Verfügung stand. Es war »lediglich« ein regionales Problem. So wird zu bestimmten Nacht- und Wochenendzeiten in Schleswig-Holstein mehr Energie durch Windenergie erzeugt, als dort benötigt wird. Entsprechende Netzverstärkungen und Weiterleitungen der Energie in die großen Städte sind erforderlich. Bei einem weiteren Ausbau der Windenergienutzung – politisch sind 15 % und mehr Anteil an der Stromerzeugung gewünscht – spielt die Frage der schnellen Regelkapazität eine zunehmend wichtigere Rolle. Auch wenn es wegen der erforderlichen regionalen Betrachtungsweise schwierig ist, genau anzugeben, ab welchem Prozentanteil Windenergie an der Stromerzeugung die Regelkapazität im Netz erweitert werden muß, steht doch fest, daß zukünftig die Nutzung der Windenergie durch diese Aspekte zusätzlich finanziell belastet werden muß.

Die in der Planung befindlichen *Offshore*-Windparks werden mehrere Hundert Megawatt Leistung aufweisen. Derartige Windparks müssen elektrisch ins Höchstspannungsnetz eingebunden werden, da nur dieses Netz in der Lage ist, die von ihnen gelieferte Energie aufzunehmen und zu den Lastschwerpunkten zu transportieren. Andererseits ist das deutsche Höchstspannungsnetz nicht für den erwarteten hohen Nord-Süd-Leistungstransit ausgelegt. Man kann grundsätzlich sagen, daß durch den hohen Anteil an Windenergie das gesamte Sy-

stem der Stromerzeugung, -übertragung und -verteilung bereits gegenwärtig, in der Zukunft jedoch verstärkt, mit neuen technischen und betrieblichen Problemen konfrontiert wird. Zurzeit sind Windenergiekonverter darauf ausgerichtet, die Windenergie bei maximaler Ausbeute in elektrische Energie umzuformen. Der entstehende Strom wird ins elektrische Netz eingespeist, ohne die dortigen Konditionen zu beachten oder zu berücksichtigen. Dieses einseitige Verhalten der Windenergie kann dazu führen, daß Störungen, die bisher beherrscht wurden, sich zu Großstörungen oder gar Netzzusammenbrüchen ausweiten. Aus diesem Grund muß der weitere Ausbau der Windenergie mit nennenswerten Investitionen in die bestehende elektrische Stromversorgung einhergehen.

7. Finanzierung und politische Randbedingungen

Die Finanzierung des Ausbaus der Windenergienutzung erfolgt über das Erneuerbare-Energien-Gesetz durch eine Umlage auf alle Stromverbraucher. Unter Berücksichtigung der auf den Windenergieanteil entfallenden Öko- und Mehrwertsteuer liegt diese Belastung derzeit bei 1,0 Cent/kWh und wird zukünftig mit zunehmender Nutzung der Windenergie weiter ansteigen. Die finanziellen Mittel, die über diesen Weg in den Ausbau der Windenergienutzung fließen, sind nicht unerheblich. Geht man beispielsweise von dem politischen Ziel der Einspeisung von 10 % der jährlichen Elektrizitätsmenge aus Windenergie in das öffentliche Netz aus, dann ergibt sich für die 50 TWh Windenergiestrom folgende Kostenbilanz:

Vergütung nach dem EEG: 9 Cent/kWh
= 4,5 Mrd. Euro/a
abzgl. Brennstoffersparnis bei der konventionellen Stromerzeugung
ca. 2 Cent/kWh = 1 Mrd. Euro/a

Mittel zu Lasten des Stromkunden für die Windenergie
3,5 Mrd. Euro/a.

Positiv zugunsten der Windenergieerzeugung ist die CO₂-Ersparnis in Relation zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern. Unterstellt man, die 50 Mrd. kWh aus der Windenergienutzung müßten ansonsten aus Kohle erzeugt werden (was durch den zunehmenden Anteil des Erdgases im Strommarkt nicht ganz richtig ist), so tritt eine CO₂-Verminderung von rd. 45 Mio. t/a auf. Damit kostet 1 t vermiedenes CO₂ über den Weg der Windenergienutzung 80 Euro. Es bestehen – dies soll der Vollständigkeit halber erläutert werden – noch eine Vielzahl von Möglichkeiten, kostengünstiger CO₂ einzusparen, beispielsweise durch die Beschauelung älterer Turbinen mit neuen Turbinenschaukeln, durch das Einsparen von Elektrizität über energieeffizientere Geräte, durch das Abschalten der *Stand-by*-Schaltungen und durch verbesserte Wärmedämmung von Gebäuden.

Windenergiekonverter sind in Deutschland sogenannte »privilegierte Anlagen«. Kommunen müssen Flächen zur Nutzung der Windenergie ausweisen. In den einzelnen Bundesländern richterlich unterschiedlich entschieden wurde die Frage, ob nur in diesen Gebieten Windenergiekonverter installiert werden dürfen. Wann eine Ansammlung von Windanlagen im juristischen Sinne ein Windpark ist, mit der Notwendigkeit Ausgleichsmaßnahmen nach dem Umweltverträglichkeitsgesetz vorzunehmen, ist ebenfalls noch offen.

8. Offshore-Windparks

Die Begrenztheit von windstarken Standorten auf dem Lande und das höhere Windenergieangebot auf See führen zu einer verstärkten Erschließung von *Offshore*-Potentialen. Erste Windparks wurden bereits in Dänemark und in Schweden installiert. Sie stehen in Wassertiefen bis etwa 10 m. In Deutschland liegen 28 Anträge von 16 Antragsstellern für *Offshore*-Windparks vor. Sie sollen entlang der Nordseeküste in Entfernungen von 30 bis 100 km vor der Küste in Wassertiefen um die 30 m errichtet werden. Ebenso sollen Windparks in der Ostsee installiert werden. Für die beiden ersten Windparks, Borkum-West und Butendiek, wurden zwischenzeitlich Genehmigungen erteilt. Der Betrieb von Borkum-West wird von einem Forschungsprogramm begleitet. Geklärt werden sollen Fragen der Beeinflussung der Schifffahrt, der Natur und weitere Aspekte. Die angestrebten Leistungen der einzelnen Windenergiekonverter sind 4 bis 6 MW. Eine Vielzahl von Fragen ist jedoch noch nicht endgültig geklärt: die Frage der Fundamente, die Frage der elektrischen Energieableitung, etc. Auch die Frage, ob die technische Verfügbarkeit bei *Offshore*-Anlagen in der gleichen guten Größenordnung von fast 98 % wie bei Landanlagen gehalten werden kann, ist offen. Bedingt durch längere Anfahrzeiten und gegebenenfalls auch der Nichterreichbarkeit durch hohen Seegang wird der Wartungszugang erschwert. Dem gegenüber steht eine Ausnutzungsdauer des Windenergieangebotes von bis zu 4500 h/a im Vergleich zu 2500 h/a an sehr guten Landstandorten. Alle Hersteller arbeiten derzeit mit großem Nachdruck an der Entwicklung von *Offshore*-Windenergiekonvertern. Betreibergesellschaften planen und stellen gleichzeitig Finanzierungs-konzepte für den Aufbau von Windparks auf. Eine Schlüsselrolle bei der Finanzierung kommt den Banken zu.

9. Ausklang

Deutschland ist weltweit führend bei der Nutzung und dem Export von Windenergieanlagen. Der Beitrag der Windenergienutzung an der Stromerzeugung betrug am Ende des Jahres 2003 rund 5 %, wobei das politische Ziel von 15 % und mehr angestrebt wird. Finanziert wird der Ausbau der Windenergie über das gesetzliche Instrument des EEG, das eine Umlage der Kosten der Windenergienutzung auf alle Stromverbraucher vorschreibt. Eine Vielzahl der Windparks ist letztendlich als Geldanlagemodell finanziert worden. Die durch die Windenergienutzung vermiedene Tonne CO₂ kostet rund 80 Euro und liegt im Mittelfeld der Kosten für die Verminderung von CO₂.

Aus technischer Sicht haben Windenergiekonverter einen sehr hohen Verfügbarkeitsstandard erreicht. Zwei ausgereifte Baukonzepte sind eingeführt. Die Entwicklungsarbeiten zielen mit großem Einsatz in Richtung von Multimegawatt-Anlagen zum Einsatz in *Offshore*-Windparks. Im Frühjahr des Jahres 2002 wurde der erste Windpark in Deutschland in der Nordsee genehmigt.

Die Potentiale der Windenergie in Deutschland, in Europa und auch weltweit, sind bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Windenergie stellt allerdings für die Elektrizitätswirtschaft keine gesicherte Leistung dar und kann somit keine Kraftwerke ersetzen. Der weitere Ausbau der Windenergienutzung erfordert Investitionen in das elektrische Netz und zusätzliche Installation schneller Regelleistung. Wegen ihrer Umweltvorteile und der anhaltenden Diskussion um Kernenergie verfügen erneuerbare Energien, insbesondere die Windenergie, im energiepoliti-

Hermann-Josef Wagner

schen Umfeld über eine große, stabile positive Meinungsbildung. Verbunden mit dem Ziel der Europäischen Union, erneuerbare Energien verstärkt zu fördern, wird deshalb ein weiterer Zubau der Windenergie stattfinden. Neben Kernenergie, Kohle und Erdgas wird sie mittelfristig zur vierten Kraft in der Stromerzeugung aufsteigen. Vielleicht rückt sie statistisch auf den dritten Platz vor, wenn die Kernenergie in zwei Jahrzehnten ausgelaufen sein sollte.

Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef WAGNER
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE)
Gebäude IB, 4
Universitätsstraße 150
44801 Bochum
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 234 3228044
Fax: +49 234 3214158
E-Mail: lee@lee.ruhr-uni-bochum.de
Internet: www.lee.ruhr-uni-bochum.de

Das Aufwindkraftwerk – Wasserkraftwerk der Wüste

Gerhard WEINREBE (Stuttgart)

Mit 20 Abbildungen und 3 Tabellen



Zusammenfassung

Das Aufwindkraftwerk ist ein solares Großkraftwerk für die sonnenreichen Gegenden der Erde. Aufwindkraftwerke erzeugen Strom aus der Sonnenstrahlung: Durch die Sonne wird Luft unter einem großen transluzenten Kollektordach erwärmt. Auf Grund des dabei entstehenden Dichteunterschiedes zwischen der warmen Luft im Kollektor und der kälteren Luft in der Umgebung strömt die Luft radial einer in der Mitte des Kollektordachs angeordneten vertikalen, unten und oben offenen Röhre zu und steigt in dieser auf. Durch die Luftströmung werden am Fuß der Röhre eingebaute Turbinen angetrieben und elektrische Energie bereitgestellt.

Eine erste Prototypanlage mit einer Turmhöhe von rund 200 m und einer Kollektorfläche von 44000 m² wurde zu Beginn der 80er Jahre im Auftrag des deutschen Bundesforschungsministeriums in Manzanares in Spanien errichtet und über mehrere Jahre erfolgreich im Dauerbetrieb erprobt. Ziel des Forschungsvorhabens war es, die thermodynamischen Zusammenhänge detailliert zu erarbeiten, um damit über eine qualifizierte Grundlage für die Planung großer Anlagen zu verfügen. Danach wird nun intensiv an der Planung und Realisierung eines ersten großen Aufwindkraftwerks im Multi-Megawatt-Maßstab gearbeitet.

Im Beitrag wird das Funktionsprinzip des Aufwindkraftwerks erläutert, vom Bau und Betrieb des Prototyps berichtet und auf Konstruktionsprinzipien, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit großer Anlagen eingegangen.

Abstract

A solar tower (often also called *solar chimney*) is a solar thermal power plant for the sunny regions of the earth. Solar towers generate electricity from solar radiation: Air is heated by solar radiation under a circular translucent roof. Due to the density difference between the warm air inside and the colder ambient, the air rises up a hollow tower tube situated in the centre of the collector. Using turbines, the energy contained in the updraft is converted into electrical energy.

In Manzanares, Spain, a first prototype with a tower height of 200 m and a collector area of 44.000 m² was erected in the early 1980s with funds provided by the German Ministry of Research and Technology (BMFT). It was successfully operated for several years.

The aim of this research project was to verify the performance projected from calculations based on theory to lay reliable foundations for the planning of large solar towers. Since then there have been strong efforts to design and realize a first large solar tower in the Megawatt scale.

In the paper the functional principle of the solar tower is outlined, construction and operation of the prototype are described, and design principles, economic and environmental aspects of large scale solar tower power plants are explained.

1. Einleitung

Unsere heutige Energieerzeugung aus Kohle und Öl ist umweltschädlich und erschöpflich. In vielen Entwicklungsländern kann man sich diese Energiequellen nicht leisten. Auch die wohlhabenden Länder werden zusehends unter steigenden Preisen für fossile Energieträger infolge zunehmender Verknappung leiden. Abbildung 1 zeigt den Verlauf der Produktionsrate fossiler Kohlenwasserstoffe in der Vergangenheit und eine Extrapolation in die Zukunft. Deutlich ist eine Abnahme der Produktion in naher Zukunft zu erkennen. Experten streiten sich noch um die genaue Lage des Peaks, aber nicht mehr um seine Existenz. Fakt ist, daß in manchen Ölfeldern, so z. B. auch in der Nordsee, die Förderung bereits abnimmt (CAMPBELL 2002a).

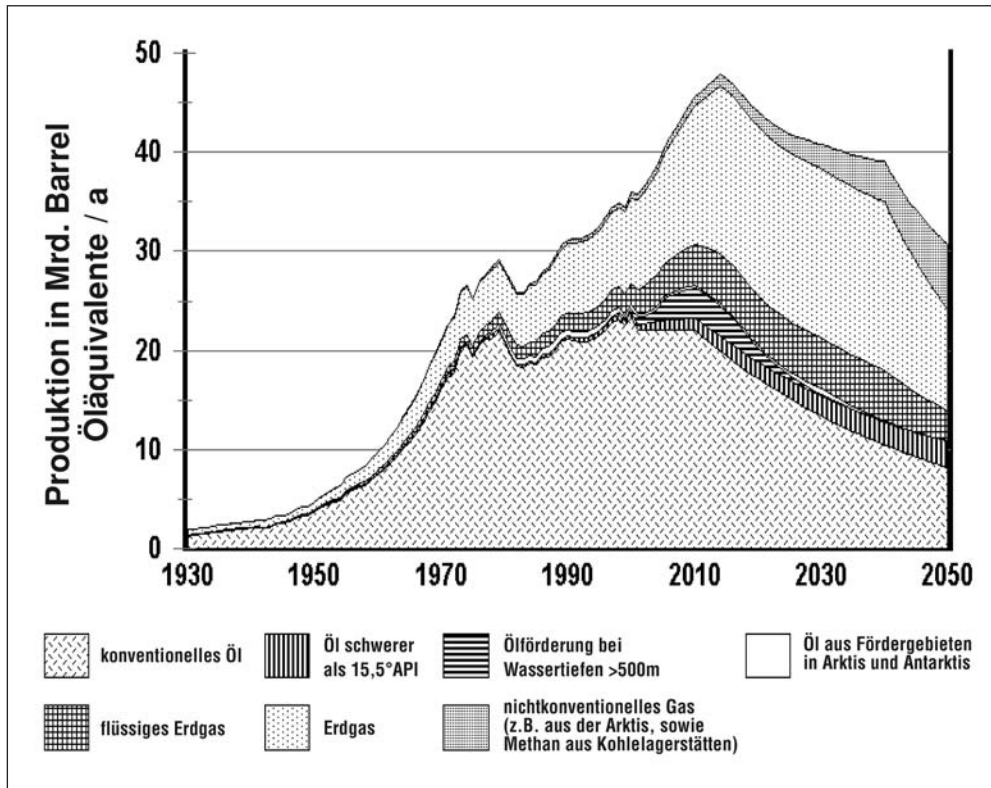


Abb. 1 Verlauf der Produktionsrate von Kohlenwasserstoffen in der Vergangenheit und Extrapolation in die Zukunft (nach CAMPBELL 2002b)

Armut, Bevölkerungsexplosion und Migration sind nicht zuletzt die Folgen unzureichender Energieversorgung bzw. zu hoher Energiekosten. Nach einer Studie der Internationalen Energie Agentur haben etwa 1,6 Mrd. Menschen keinen Zugang zu elektrischer Energie, rund 2,4 Mrd. sind auf Biomasse zum Kochen und Heizen angewiesen, mit steigender Tendenz (*International Energy Agency* 2002). Auch diese Menschen wollen und sollen in Zukunft Elektrizität nutzen. Die Nachfrage nach elektrischer Energie wird also insbesondere in den Schwell-

len- und Entwicklungsländern stark ansteigen. Es wäre kurzsichtig, hier auf Kohle oder Öl zu setzen. Eine saubere, unerschöpfliche Energiequelle ist gefordert: die Sonne.

Eine allen Menschen in ausreichendem Maße verfügbare saubere und sichere Energiequelle ist erforderlich! Die großtechnische Sonnenenergienutzung könnte dazu einen entscheidenden Beitrag leisten:

- Nachhaltige Ressourcenschonung statt Umweltzerstörung.
- Hebung des Lebensstandards durch eine unerschöpfliche Energiequelle als Maßnahme gegen die Bevölkerungsexplosion und menschenunwürdige Armut in den Ländern der dritten Welt.
- Neue Arbeitsplätze durch Bau und Betrieb der Solarkraftwerke in globaler Partnerschaft gegen sozial bedingte Konflikte, kurz: die Umsetzung der Agenda 21.

Eine sinnvolle Technologie zur Sonnenenergienutzung muß

- einfach und zuverlässig sein,
- ohne Kühlwasser auskommen,
- selbst aus unerschöpflichen Rohstoffen umweltneutral und
- mit den Mitteln der sonnenreichen und meist zugleich rohstoffarmen und technologisch weniger entwickelten Ländern herstellbar sein.

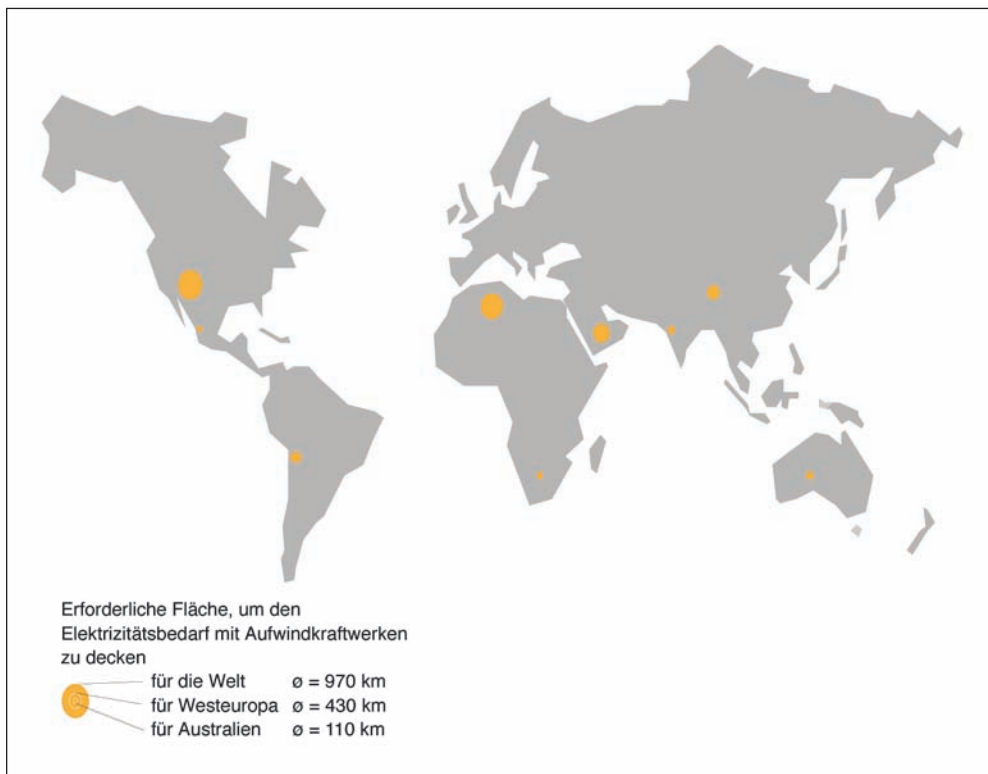


Abb. 2 Flächenbedarf, um den gesamten Elektrizitätsbedarf der Erde mit Aufwindkraftwerken in den jeweils benachbarten Wüsten mit hohem Solarstrahlungsangebot zu decken.

Das Aufwindkraftwerk erfüllt diese Bedingungen und macht den entscheidenden Schritt hin zu einer globalen Solarenergiewirtschaft möglich. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und die bisher gesammelten Erfahrungen zeigen, daß große Aufwindkraftwerke (≥ 100 MW) im Stande sind, elektrische Energie zu Kosten vergleichbar denen einer konventionellen Elektrizitätsbereitstellung zu liefern. Auch die erforderlichen Flächen stehen grundsätzlich zur Verfügung (Abb. 2). Das ist Grund genug, diese Form der Solarenergienutzung mit dem Ziel großer wirtschaftlich darstellbarer Anlagen weiterzuentwickeln. In einer zukünftigen Energiewirtschaft könnten Aufwindkraftwerke daher eine wirtschaftliche und umweltverträgliche Strombereitstellung im Sonnengürtel der Erde gewährleisten (SCHLAICH et al. 2003).

Für Australien wird derzeit ein 200MW-Aufwindkraftwerk geplant. Die Bedingungen in Australien sind für diese Art der solarthermischen Stromerzeugung sehr günstig: Die verfügbare Solarstrahlung ist hoch, große ebene Flächen stehen zur Verfügung, die Nachfrage nach elektrischer Energie steigt, und das australische »Mandatory Renewable Energy Target« verpflichtet alle australischen Stromhändler, einen gewissen Anteil von Strom aus erneuerbaren Quellen zu verkaufen.

2. Funktionsprinzip

Schon früh verstand es der Mensch, die Solarenergie aktiv zu nutzen: Gewächshäuser halfen beim Anbau von Nahrungsmitteln, der Kaminsoff beim Lüften und Kühlen von Gebäuden und das Windrad beim Mahlen von Getreide und beim Wasserpumpen. Die drei wesentlichen Bauteile des Aufwindkraftwerkes – Glasdachkollektor, Kamin, Windturbinen – sind also schon von alters her bekannt. Bei einem solarthermischen Aufwindkraftwerk werden sie lediglich in neuartiger Weise kombiniert. Die Kombination zur Stromerzeugung wurde von GÜNTHER (1931) bereits vor über 70 Jahren beschrieben.

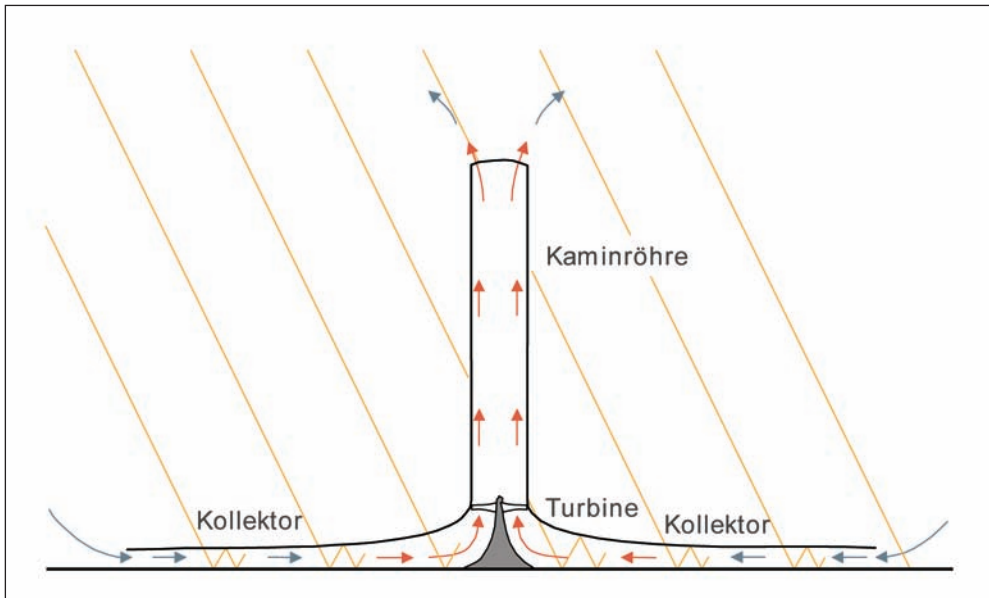


Abb. 3 Funktionsprinzip des Aufwindkraftwerks

Das Prinzip ist in Abbildung 3 dargestellt. Unter einem flachen kreisförmigen, am Umfang offenen Glasdach, das zusammen mit dem darunter liegenden natürlichen Boden einen Warmluftkollector bildet, wird Luft durch die Sonnenstrahlung erwärmt. In der Mitte des Dachs steht senkrecht eine Kaminröhre mit großen Zuluftöffnungen am Fuß. Das Dach ist luftdicht an den Kaminfuß angeschlossen. Da warme Luft eine geringere Dichte als kalte Luft hat, steigt sie im Kamin auf. Durch den Kaminsog wird gleichzeitig warme Luft aus dem Kollektor nachgesaugt, und von außen strömt kalte Luft zu. So bewirkt die Sonnenstrahlung einen kontinuierlichen Aufwind im Kamin. Die in der Luftströmung enthaltene Energie wird mit Hilfe druckgestufter Windturbinen, die am Fuß des Kamins stehen, in mechanische und über Generatoren in elektrische Energie umgewandelt.

Das Aufwindkraftwerk ist technologisch dem Wasserkraftwerk – dem bisher erfolgreichsten Kraftwerkstyp zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen – sehr ähnlich: Dem Kollektordach entspricht der Stausee, dem Kamin die Druckröhre. Beide Kraftwerkstypen arbeiten mit druckgestuften Turbinen, und beide kommen über ihre extrem lange Lebensdauer und ihre niedrigen Betriebskosten zu geringen Stromgestehungskosten. Auch die erforderlichen Kollektordach- und Stauseeflächen haben bei gleicher elektrischer Leistung vergleichbare Größen. Das Kollektordach kann jedoch in trockenen Wüsten gebaut und problemlos wieder beseitigt werden, während für Stauseen in der Regel belebtes (und oft sogar besiedeltes) Land überflutet wird.

Kontinuierlicher 24-Stunden-Betrieb kann durch auf dem Boden ausgelegte wassergefüllte Schläuche erreicht werden. Das Wasser erwärmt sich während des Tages und gibt die Wärme nachts wieder ab (Abb. 4, KREETZ 1997). Die Schläuche müssen nur einmal gefüllt werden, es besteht kein weiterer Wasserbedarf. So erzeugt die Solarstrahlung einen kontinuierlichen Aufwind im Turm (SCHLAICH und SCHIEL 2001).

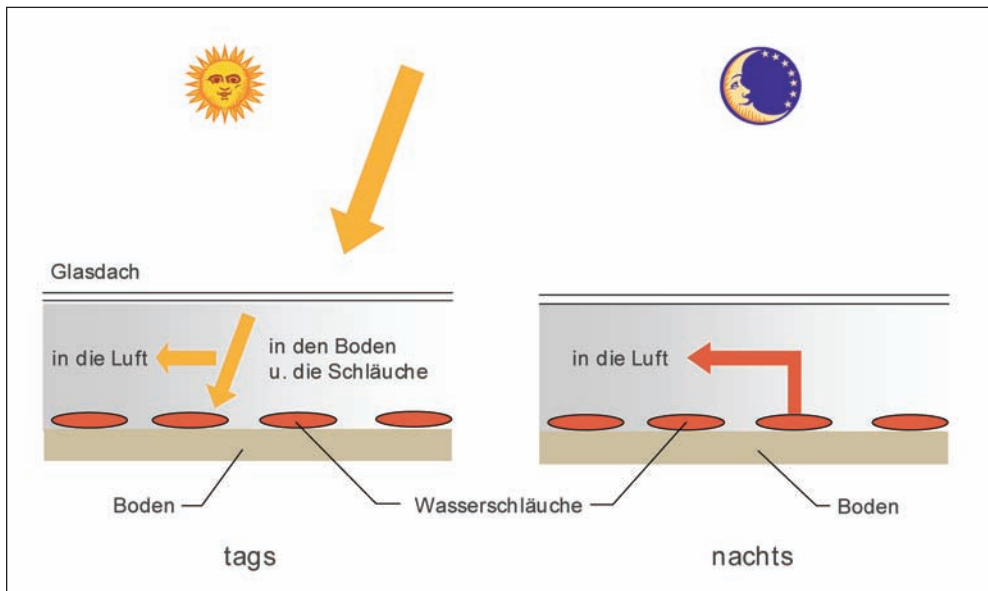


Abb. 4 Wärmespeicherung mit wassergefüllten Schläuchen

3. Physikalisches Modell

Zur präzisen Beschreibung der zeitabhängigen Elektrizitätsbereitstellung eines Aufwindkraftwerks mit gegebenen Dimensionen ist ein umfangreiches thermodynamisches und fluid-dynamisches Simulationsprogramm erforderlich (DOS SANTOS BERNARDES et al. 2004). Eine gute Darstellung der Thermodynamik des Aufwindkraftwerks als Kreisprozeß ist bei GANNON und VON BACKSTRÖM (2000) zu finden. Hier werden lediglich die grundlegenden Zusammenhänge in vereinfachter Form dargestellt.

Allgemein gesprochen kann die Ausgangsleistung P eines Aufwindkraftwerks berechnet werden als die zugeführte Solarenergie \dot{Q}_{solar} multipliziert mit den jeweiligen Wirkungsgraden von Kollektor, Kamin und Turbine(n):

$$P = \dot{Q}_{solar} \cdot \eta_{Kraftwerk} = \dot{Q}_{solar} \cdot \eta_{Koll} \cdot \eta_{Kamin} \cdot \eta_{Turbine} \quad [1]$$

Die dem System zugeführte Solarenergie kann als Produkt aus der Globalstrahlung G_h auf eine horizontale Fläche und der Kollektorfläche $A_{Kollektor}$ geschrieben werden.

$$\dot{Q}_{solar} = G_h \cdot A_{Kollektor} \quad [2]$$

Der Turm (Kamin) wandelt den vom Kollektor gelieferten Wärmestrom in kinetische Energie (Konvektionsströmung) und potentielle Energie um (Druckabfall an der Turbine). So wirkt die Dichtedifferenz der Luft als treibende Kraft. Die leichtere Luftsäule im Turm ist mit der umgebenden Atmosphäre am Turmfuß (Kollektorausgang) und an der Turmspitze verbunden, und erfährt daher einen Auftrieb.

Eine Druckdifferenz Δp_{tot} zwischen dem Turmfuß und der Umgebung stellt sich ein:

$$\Delta p_{tot} = g \cdot \int_0^{H_t} (\rho_a - \rho) \cdot dH \quad [3]$$

mit g : Erdbeschleunigung, H_t : Turmhöhe, ρ_a : Luftdichte der Außenluft, ρ_t : Luftdichte im Turm.

So nimmt Δp_{tot} proportional zur Turmhöhe zu. Die Druckdifferenz Δp_{tot} kann in eine statische Komponente Δp_s und eine dynamische Komponente Δp_d aufgeteilt werden; Reibungsdruckverluste sind hier vernachlässigt:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d \quad [4]$$

Die statische Druckdifferenz fällt an der Turbine ab, die dynamische Komponente beschreibt die kinetische Energie der Strömung. Mit der Gesamtdruckdifferenz und dem Volumenstrom der Luft ist nun die in der Strömung enthaltene Leistung zu beschreiben:

$$P_{ges} = \Delta p_{tot} \cdot v_{Turm} \cdot A_{Turm} \quad [5]$$

woraus schließlich der Wirkungsgrad des Turmes gebildet werden kann:

$$\eta_{Turm} = \frac{P_{ges}}{\dot{Q}} \quad [6]$$

Die tatsächlich erfolgende Aufteilung in eine statische und eine dynamische Komponente hängt davon ab, wie viel Energie die Turbine der Strömung entzieht. Ohne Turbine stellt sich eine maximale Strömungsgeschwindigkeit $v_{Turm,max}$ ein und die gesamte Druckdifferenz wird in kinetische Energie umgesetzt, d. h. die Strömung beschleunigt.

$$P_{ges} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v_{Turm,max}^2 \quad [7]$$

Unter der vereinfachenden Annahme, daß die Temperaturprofile im Turm und in der Umgebung parallel verlaufen, kann die Strömungsgeschwindigkeit, die sich bei freier Konvektion einstellt, mit der (temperatur-)modifizierten Torricelli-Gleichung ausgedrückt werden:

$$v_{Turm,max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{Turm} \cdot \frac{\Delta T}{T_0}} \quad [8]$$

mit \dot{m} : Luftmassenstrom, T_0 : Umgebungstemperatur in Bodenhöhe, ΔT : Temperaturanstieg von der Umgebungstemperatur zur Temperatur am Kollektorausritt (= Turmeintritt).

Mit Gleichung [6] und der Beziehung $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$ für den stationären Zustand, sowie [7] und [8], ergibt sich der Turmwirkungsgrad:

$$\eta_{Turm} = \frac{g \cdot H}{c_p \cdot T_0} \quad [9]$$

Diese vereinfachte Darstellung verdeutlicht eine der grundlegenden Eigenschaften des Aufwindkraftwerks, nämlich daß der Turmwirkungsgrad nur von der Turmhöhe abhängt.

Die Gleichungen [2] und [9] zeigen, daß die Ausgangsleistung des Aufwindkraftwerks proportional zur Kollektorfläche und zur Turmhöhe ist, d. h. proportional zum Volumen des in Abbildung 2 dargestellten Zylinders.

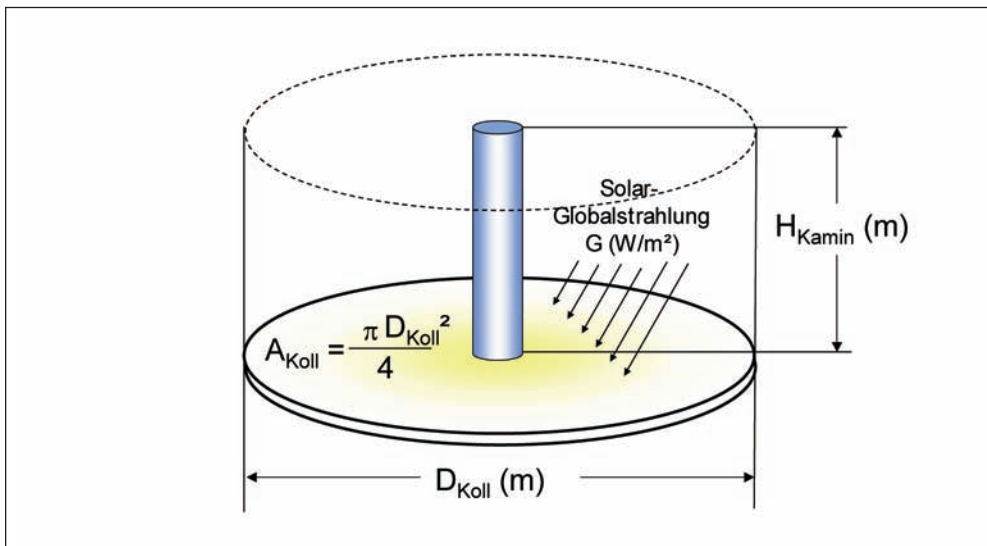


Abb. 5 Die Ausgangsleistung des Aufwindkraftwerks ist proportional zur Kollektorfläche und zur Turmhöhe.

Da die elektrische Ausgangsleistung des Aufwindkraftwerks proportional zum Volumen des von der Turmhöhe und der Kollektorfläche aufgespannten Zylinders ist, kann eine bestimmte Leistung entweder mit einem hohen Turm in Kombination mit einem kleineren Kollektor oder mit einem großen Kollektor und kleineren Turm erzielt werden. Diese allgemeine Abhängigkeit ist auch Abbildung 6 zu entnehmen. Da die Abbildung auf detaillierten Simulationsrechnungen beruht, Reibungsdruckverluste im Kollektor also berücksichtigt sind, ist insbesondere bei größeren Kollektordurchmessern die lineare Abhängigkeit zwischen der Leistung und dem Produkt ‘Kollektorfläche \times Turmhöhe’ nicht mehr streng gültig. Dennoch ist es eine gute Faustregel.

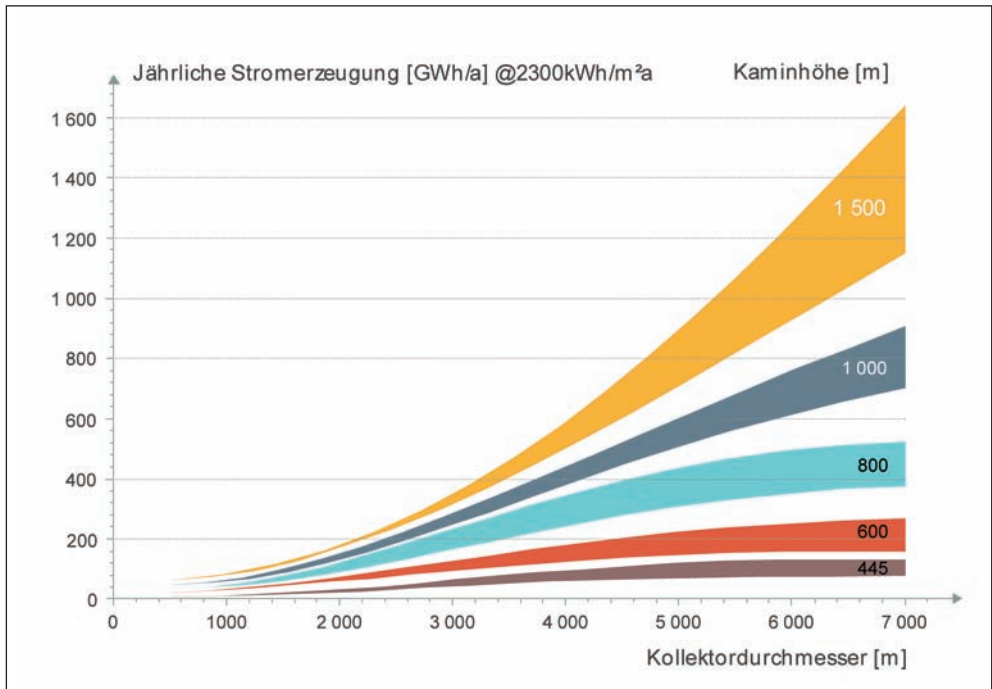


Abb. 6 Jährliche Strombereitstellung eines Aufwindkraftwerks in Abhängigkeit von Kollektordurchmesser und Turmhöhe (Globalstrahlungssumme 2300 kWh/(m²a))

4. Komponenten

Nach diesem ersten Überblick wird nun etwas näher auf die einzelnen Komponenten eines Aufwindkraftwerks eingegangen.

4.1 Kollektor

Warmluft für das Aufwindkraftwerk wird durch den Treibhauseffekt in einem einfachen Luftkollektor erzeugt. Dieser besteht aus einem horizontalen transluzenten Glas- oder Kunststoffdach in etwa zwei bis sechs Meter Höhe über dem Boden.

Die Höhe des Luftkollektors steigt zum Turm hin an, so daß einerseits die Strömungsgeschwindigkeit nicht zu sehr ansteigt, um die Reibungsverluste niedrig zu halten, und andererseits die Luft bei minimalen Verlusten in die Vertikale umgelenkt wird. Das transluzente Dach ist durchlässig für die Solarstrahlung, aber undurchlässig für die vom durch die Sonne aufgeheizten Kollektorboden emittierte langwellige Wärmestrahlung. Dadurch erwärmt sich der Boden unter dem Dach stark und gibt diese Wärme an die radial von außen zum Turm strömende Luft ab.

4.2 Speicher

Wenn eine weniger ausgeprägte Leistungsspitze um die frühe Nachmittagszeit und eine höhere Stromerzeugung am Abend und in der Nacht gewünscht wird, können wassergefüllte Wasserschläuche oder -kissen auf dem Kollektorboden ausgelegt werden, um damit das Wärmespeichervermögen deutlich zu vergrößern.

Die Schläuche werden einmalig zu Beginn mit Wasser gefüllt und bleiben dann verschlossen, so daß kein Wasser verdunsten kann (Abb. 4). Die Menge des Wassers in den Schläuchen wird so gewählt, daß sie einer mittleren Wassertiefe von 5 cm bis 20 cm entspricht, je nach gewünschter Leistungscharakteristik (Abb. 7)

Da bereits bei sehr geringen Wasserströmungsgeschwindigkeiten infolge natürlicher Konvektion der Wärmeübergang zwischen den Schläuchen und dem Wasser wesentlich höher ist als zwischen der strahlungsabsorbierenden Erdboden-Oberfläche und den darunter liegenden

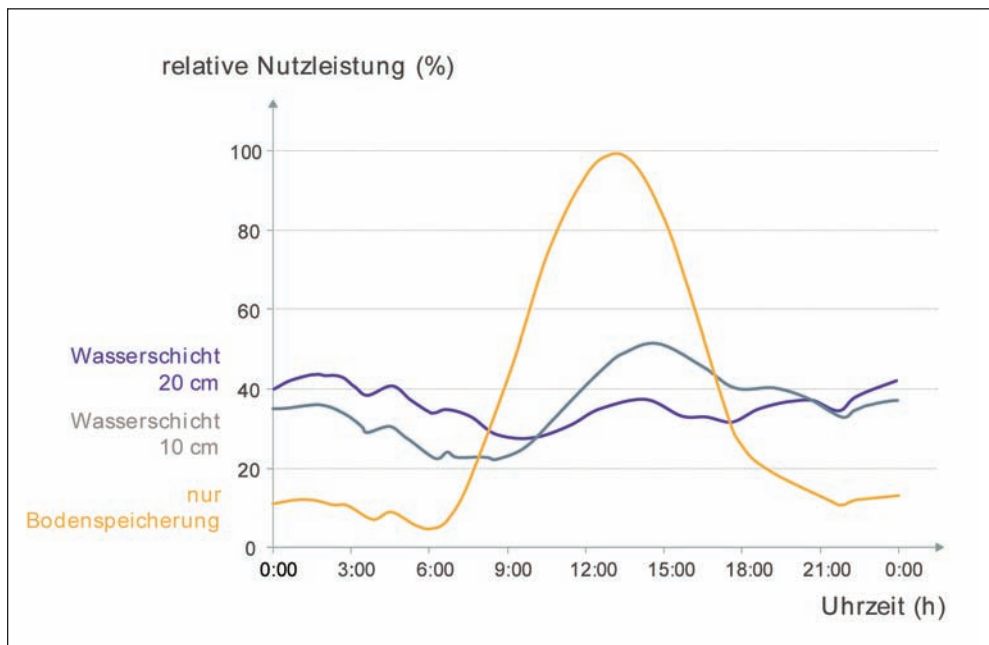


Abb. 7 Auswirkung von wärmespeichernden Wasserschläuchen unter dem Kollektordach auf den zeitlichen Verlauf der Strombereitstellung

Bodenschichten, und da die Wärmekapazität von Wasser rund fünfmal höher ist als die von Erdboden, speichert das Wasser in den Schläuchen einen Teil der Sonnenwärme und gibt sie erst nachts wieder ab, wenn die Lufttemperaturen im Kollektor niedriger sind. Dadurch ist es möglich, daß die Anlage rund um die Uhr – allein von der Sonne getrieben – arbeitet.

Der Kamin ist die eigentliche Wärmekraftmaschine des Aufwindkraftwerks. Der Auftrieb der im Kollektor erwärmten Luft ist in erster Näherung proportional zur im Kollektor erzielten Temperaturerhöhung ΔT der Luft und dem Volumen des Kamins, also der Höhe und dem Durchmesser des Kamins. In einem großen Aufwindkraftwerk erhöht der Kollektor die Temperatur der Außenluft um typischerweise $\Delta T = 35$ K. Dadurch entsteht im Kamin eine Aufwindgeschwindigkeit von etwa $v = 15$ m/s. Man kann also ein laufendes Aufwindkraftwerk ohne weiteres begehen und warten.

Die Untersuchung der unterschiedlichen möglichen Turmbauweisen wie Stahlfachwerk oder Kabelnetzurm – mit Trapezblech oder Membranen verkleidet – ergab, daß für alle in Frage kommenden Standorte die Stahlbetonröhre die langlebigste und kostengünstigste Lösung darstellt.

Technologisch gesehen handelt es sich bei den Kaminen der Aufwindkraftwerke um nichts anderes als sehr große Naturzugkühltürme. Die Wandstärke nimmt bei einem 1000 m Turm von gut 1 m am Fuß auf 0,3 m bei halber Höhe ab und bleibt dann konstant. Derartige dünne Röhren verformen sich unter Windlast zu einem ovalen Querschnitt („ovalisieren“), insbesondere durch die in Abbildung 8 dargestellten Sogflanken. Dadurch werden die Meridianspannungen sehr hoch. Der resultierende Verlust an Steifigkeit durch Ribbildung im Beton und die Beulgefahr begrenzen die Höhe von Naturzugkühltürmen auf rund 200 m.

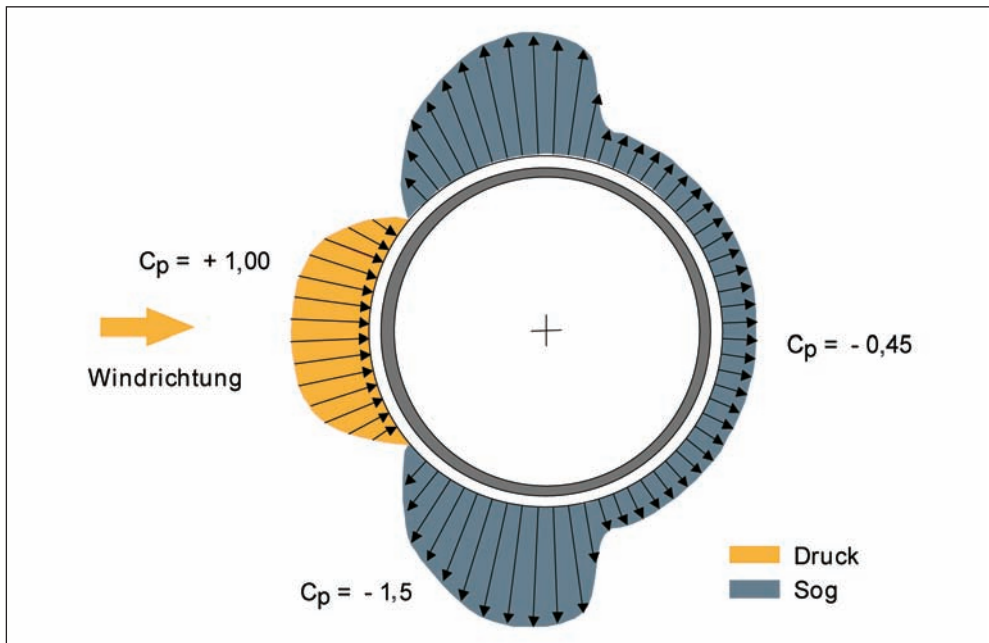


Abb. 8 Typische Druck-Sogverteilung bei der Umströmung eines Kreiszyinders

Glücklicherweise kann dem Ovalisieren sehr effektiv durch Speichenräder entgegengewirkt werden (Abb. 9). Diese haben dieselbe aussteifende Wirkung wie Schotte, allerdings bremsen sie den Aufwind nur minimal.



Abb. 9 Speichenrad mit Speichen aus Litzenbündeln an der Turmspitze eines 5MW-Aufwindkraftwerks (Computervisualisierung)

Ein Speichenrad ganz oben und drei weitere geschickt über die Höhe verteilt reduzieren die Meridianspannungen soweit, daß wegen der vom Eigengewicht der Kaminröhre herrührenden überlagernden größeren Druckspannungen keine Zugspannungen mehr resultieren (Abb. 10). In erster Näherung ist das Volumen unter den in Abbildung 10 dargestellten Flächen proportional zum Bedarf an Beton und Bewehrungsstahl für den Turm. Daraus kann man schließen, daß durch die Speichenräder Kaminröhren für Aufwindkraftwerke wirtschaftlich darstellbar werden.

4.3 Turbinen

Mit Turbinen kann der Luftströmung mechanische Energie entzogen werden. Die Turbinen eines Aufwindkraftwerks arbeiten nicht geschwindigkeitsgestuft wie ein freilaufender Windenergiekonverter, sondern als ummantelter druckgestufter Windturbogeneratorsatz, bei dem,

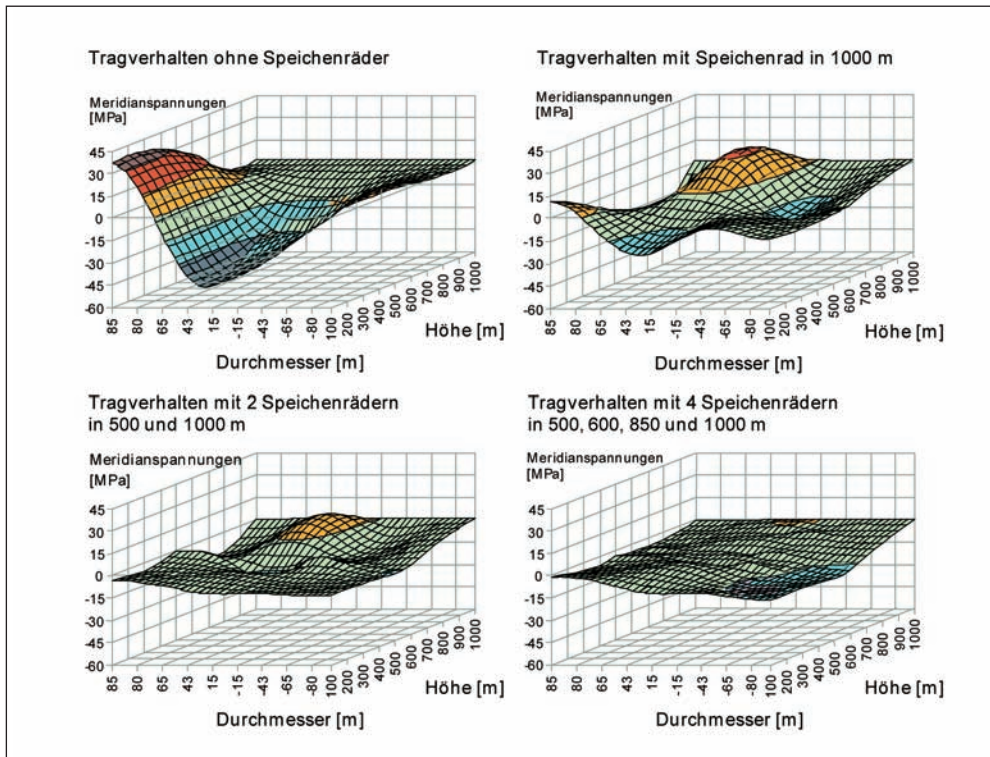


Abb. 10 Meridianspannungen im Turm entlang des Umfangs (auf Durchmesser projiziert) und entlang der Höhe in Abhängigkeit von der Anzahl der verwendeten aussteifenden Speichenräder (Turm hier exemplarisch mit 170 m Durchmesser und 1000 m Höhe).

ähnlich wie bei einem Wasserkraftwerk, der statische Druck abgebaut wird. Die Leistungsdichte (Leistung je vom Rotor überstrichener Fläche) einer solchen ummantelten druckgestuften Turbine ist rund eine Größenordnung höher als die einer geschwindigkeitsgestuften Freiland-Turbine, d. h., bei gleichem Durchmesser kann rund die 10-fache Leistung entnommen werden. Auch die erzielbaren Wirkungsgrade sind höher.

Die Luftgeschwindigkeit vor und hinter der Turbine ist etwa gleich. Die entzogene Leistung ist proportional zum Produkt aus dem Volumenstrom und dem Druckabfall an der Turbine. Im Hinblick auf eine maximale Energieausbeute ist es Ziel der Turbinenregelung, dieses Produkt in allen Betriebszuständen zu maximieren.

Über die Blattverstellung regelt die Turbine den Druckabfall und damit die Luftgeschwindigkeit und den Luftstrom in der Anlage. Stehen die Blätter senkrecht zur Anströmung, dreht sich die Turbine nicht. Stehen die Blätter parallel zur Strömung und lassen den Luftstrom ungestört durch, ist der Druckabfall an der Turbine Null, und es wird auch keine elektrische Leistung erzeugt. Zwischen diesen beiden Stellungen gibt es eine optimale Blattstellung. Die Leistungsausbeute ist dann maximal, wenn der Druckabfall an der Turbine rund 80 % der gesamten zur Verfügung stehenden Druckdifferenz beträgt.

5. Prototyp

Nach detaillierten theoretischen Voruntersuchungen und umfangreichen Experimenten im Windkanal wurde in den Jahren 1981/82 mit Mitteln des deutschen Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) in Manzanares (ca. 150 km südlich von Madrid) auf einem von dem spanischen Energieversorgungsunternehmen Union Electrica Fenosa zur Verfügung gestellten Gelände eine Experimentieranlage mit 50 kW Spitzenleistung errichtet (Abb. 11) (HAAF et al. 1983, SCHLAICH et al. 1990).

Ziel dieses Forschungsvorhabens war, die inzwischen erarbeiteten theoretischen Ansätze meßtechnisch zu verifizieren und den Einfluß einzelner Komponenten auf Leistung und Wirkungsgrad des Kraftwerks unter realistischen bautechnischen und meteorologischen Bedingungen zu untersuchen. Hierzu wurde ein Kamin mit 195 m Höhe und 10 m Durchmesser gebaut, umgeben von einem Kollektor mit 240 m Durchmesser. Die Anlage war mit einer umfangreichen Meßdatenerfassung ausgerüstet. Über 180 Sensoren registrierten im Sekundenrhythmus das gesamte Anlagenverhalten. Die Hauptabmessungen und technischen Daten der Anlage sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tab. 1 Hauptabmessungen und technische Daten des Prototyps in Manzanares

| | |
|---|-------------------------------|
| Turmhöhe: | 194,6 m |
| Turmradius: | 5,08 m |
| mittlerer Kollektorradius: | 122,0 m |
| mittlere Dachhöhe: | 1,85 m |
| Anzahl Turbinenblätter: | 4 |
| Turbinenblattprofil: | FX W-151-A |
| Schnellaufzahl: | 10 |
| Betriebsarten: | Inselbetrieb oder Netzbetrieb |
| typischer Temperaturanstieg im Kollektor: | $\Delta T = 20 \text{ K}$ |
| Nennleistung: | 50 kW |
| Kunststoffmembran-Kollektor-Fläche: | 40000 m ² |
| Glasdach-Kollektor-Fläche: | 6000 m ² |

Der Prototyp in Manzanares war für eine Versuchsdauer von etwa drei Jahren ausgelegt und sollte danach wieder beseitigt werden. Deshalb wurde sein Kamin als abgespannte Trapezblechröhre konzipiert, die nach Beendigung des Experiments wiederverwertbar sein sollte. Die Blechstärke betrug nur 1,25 mm (!), die Sickentiefe 150 mm; die Bleche waren in vertikaler Richtung im Abstand von 8,6 m gestoßen und alle 4 m durch außenliegende Fachwerkträger ausgesteift. Die Röhre lagerte 10 m über Grund auf einem Ring, der so von acht dünnen Rohrstützen unterstützt war, daß die warme Luft am Kaminfuß fast ungestört einströmen konnte. Als strömungsgünstig geformter Übergang zwischen dem Vordach und dem Kamin diente ein vorgespannter Membranmantel aus kunststoffbeschichtetem Gewebe (Abb. 12).

Der Kamin war in der Höhe vierfach und in drei Richtungen mit preisgünstigen dünnen Stahlstangen zu Fundamenten hin abgespannt. Die für solche Bauweisen sonst üblichen Abspannseile oder gar eine frei stehende Betonröhre waren in dem vorgegebenen Kostenrahmen nicht unterzubringen.



Abb. 11 Aufwindkraftwerk Prototyp bei Manzanares, Spanien



Abb. 12 Turbine der Prototypanlage in Manzanares

Die Montage der Blechröhre des Prototyps wurde mit einem eigens dafür entwickelten Takthebeverfahren ausschließlich vom Boden aus durchgeführt. Die Röhre wurde abschnittsweise mit hydraulischen Pressen angehoben, und gleichzeitig wurden die Abspannungen nachgezogen. Damit sollte gezeigt werden, daß auch hohe Türme mit wenigen Fachkräften gebaut werden können.

Natürlich kommt für ein großes, auf lange Lebensdauer ausgelegtes Aufwindkraftwerk diese bewußt temporäre Bauweise nicht in Frage. Unter realistischen Bedingungen wird der Kamin in aller Regel aus Stahlbeton hergestellt werden.

Das Kollektordach eines Aufwindkraftwerks muß nicht nur transluzent sein, es muß auch langlebig und dabei kostengünstig sein. Verschiedene Kunststoffolien und Glas wurden für den Kollektor ausgewählt, um experimentell zu ermitteln, welches Material am besten und langfristig am kostengünstigsten ist (Abb. 13 und Abb. 14). Glas widerstand auch schweren Stürmen während vieler Jahre ohne Schäden und erwies sich als selbstreinigend; gelegentliche Regenschauer reichen aus.



Abb. 13 Glaskollektor des Prototyps in Manzanares, Spanien

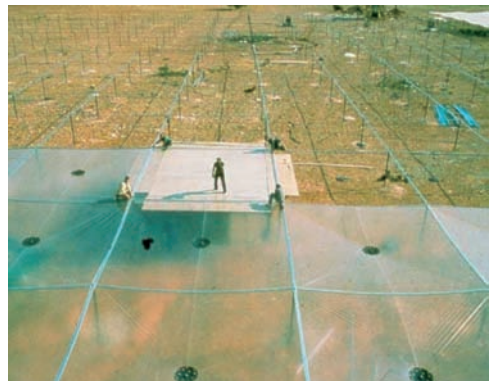


Abb. 14 Montage des Kunststoffmembran-Kollektordachs

Die Plastikmembranen sind in Profilen geklemmt und in der Mitte zum Boden mittels einer Kunststoffplatte mit Drainageöffnung abgespannt. Die Investitionskosten für einen Folienkollektor sind niedriger als für einen Glaskollektor; allerdings versprödeten die Membranen im Lauf der Zeit und neigten zur Reißbildung. In den letzten Jahren erzielte Materialverbesserungen reichen wahrscheinlich aus, diese Nachteile zu beseitigen.

Nach dem Abschluß der Bauphase 1982 begann die Experimentierphase, deren Zielsetzung es war, das Funktionsprinzip des Aufwindkraftwerks zu demonstrieren. Die Ziele waren im einzelnen

- Daten über den Wirkungsgrad der neu entwickelten Technologie zu erhalten,
- den vollautomatischen Kraftwerksbetrieb bei hoher Zuverlässigkeit zu demonstrieren und
- das Betriebsverhalten und die physikalischen Zusammenhänge basierend auf Langzeit-Meßreihen aufzuzeichnen und zu analysieren.

In Abbildung 15 sind die wesentlichen Betriebsdaten, d. h. Solarstrahlung, Aufwindgeschwindigkeit und elektrische Leistung, für einen typischen Tag dargestellt. Auf zwei Dinge soll hier hingewiesen werden: *Erstens*, daß für diese kleine Anlage ohne zusätzlichen thermischen Speicher die elektrische Leistung während des Tages eng mit der Solarstrahlung korreliert (Abb. 16), und *zweitens*, daß dennoch während der Nacht ein Auftrieb herrscht, der zur Stromerzeugung während einiger Nachtstunden genutzt werden kann (Abb. 15).

Mit zunehmender Anlagen- und damit Kollektorgröße, d. h. mit zunehmender thermischer Trägheit des Systems, nimmt dieser Effekt zu, wie anhand der Simulationsergebnisse für Großanlagen zu sehen ist.

1987 war die Anlage für insgesamt 3 197 h in Betrieb, was einer mittleren täglichen Betriebszeit von 8,8 h entspricht. Sobald die Strömungsgeschwindigkeit einen bestimmten Wert,

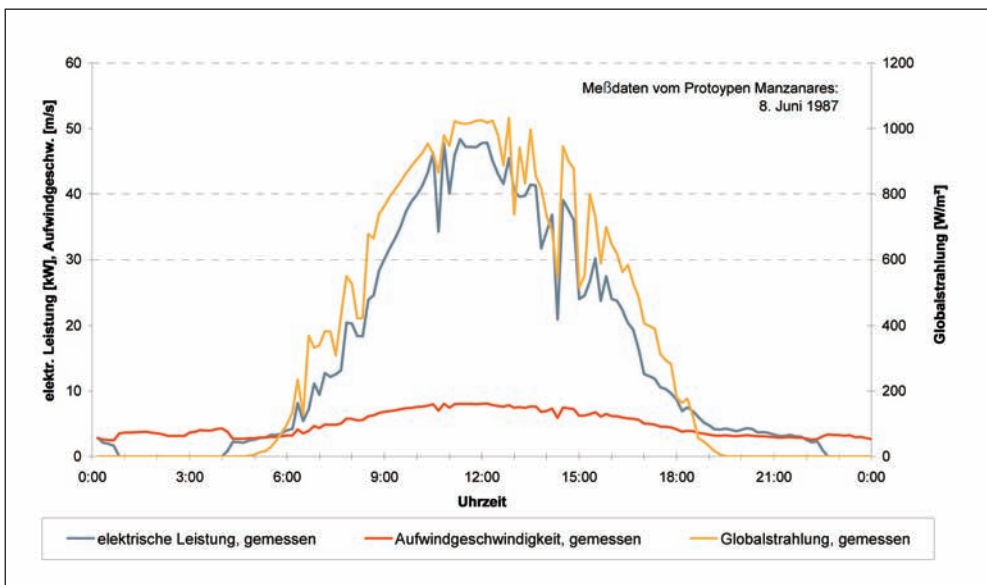


Abb. 15 Meßergebnisse aus Manzanares: Aufwindgeschwindigkeit und elektrische Leistung für einen typischen Tag

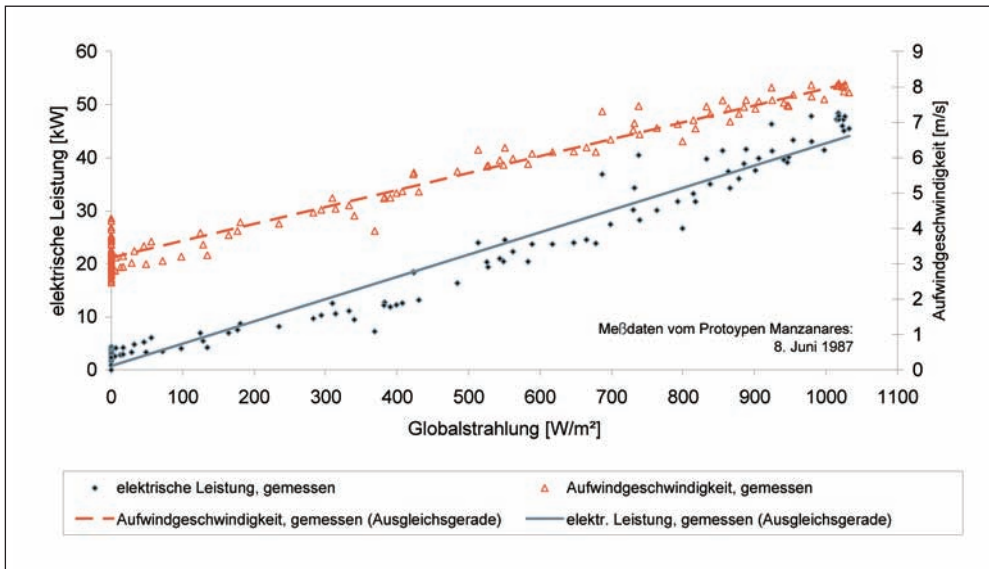


Abb. 16 Zusammenhang zwischen Solarstrahlung und Leistung für den Prototypen in Manzanares

typischerweise 2,5 m/s überschritt, startete die Anlage automatisch und synchronisierte sich mit dem Stromnetz.

Diese Ergebnisse zeigen, daß das System und seine Komponenten verläßlich sind und die Gesamtanlage zu einem sehr zuverlässigen Betrieb in der Lage ist.

Um zu einem soliden Verständnis der physikalischen Beziehungen und Sensitivitäten zu gelangen sowie mögliche Ansatzpunkte zur Verbesserung zu identifizieren, wurde ein Computersimulationsmodell entwickelt, das die einzelnen Komponenten, ihr Leistungsverhalten und ihre dynamische Wechselwirkung beschreibt. Es basiert auf der Finite-Volumen-Methode und berücksichtigt die Erhaltungsgleichungen für Energie, Impuls und Masse. Das Simulationsprogramm beinhaltet eine Abbildung des Kollektorverhaltens gemäß der bewährten Solarkollektor-Theorie (DUFFIE und BECKMAN 1991), die um die Berücksichtigung der Wärmespeicherung im Boden – und falls erforderlich in Wasserschläuchen – erweitert wurde. Die Strömungsverhältnisse in Kollektor, Turbine und Turm werden unter Berücksichtigung der Reibungsdruckverluste berechnet. Für diese Rechnungen werden etablierte Verfahren verwendet (Verein Deutscher Ingenieure 1998), und wo dies als nicht ausreichend oder anwendbar erscheint, werden experimentelle Ergebnisse und Windkanalmessungen verwendet. Das Turbinenverhalten wird basierend auf den Computer-Fluiddynamikrechnungen (CFD) des Instituts für Fluiddynamik und Hydraulische Strömungsmaschinen der Universität Stuttgart abgebildet.

Das Simulationsmodell wurde anhand der Meßergebnisse verifiziert und seine Genauigkeit überprüft. Heute ist es ein Entwicklungswerkzeug, das alle bekannten relevanten physikalischen Effekte berücksichtigt und mit dessen Hilfe das thermodynamische Verhalten großer Aufwindkraftwerke unter gegebenen Wetterbedingungen abgebildet werden kann (HAAF 1984, WEINREBE und SCHIEL 2001).

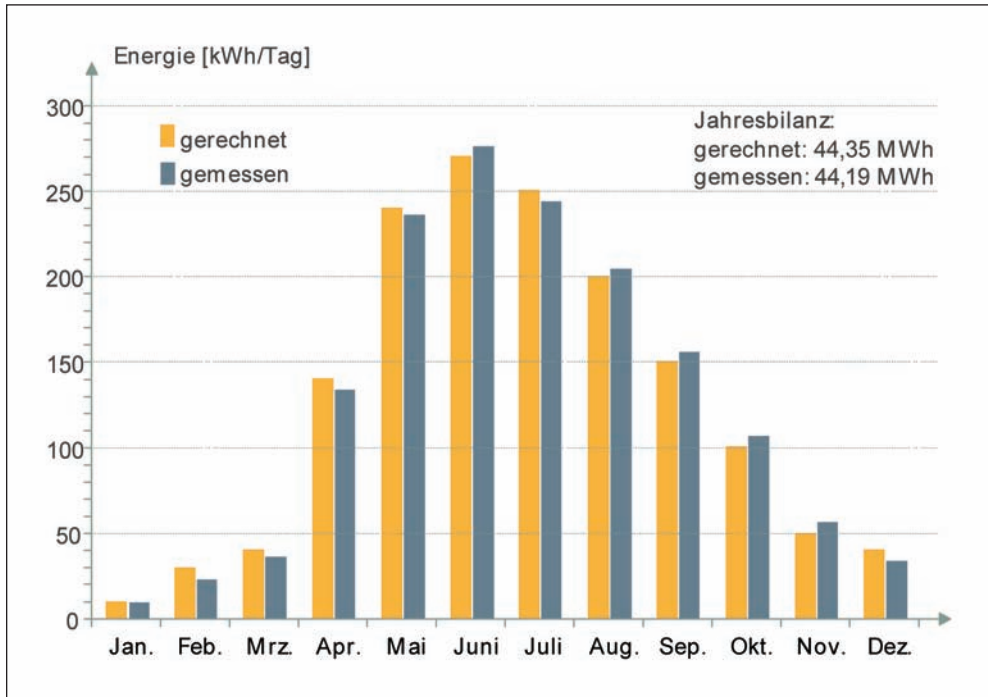


Abb. 17 Vergleich von gemessener und berechneter monatlicher Stromerzeugung für Manzanares

Abbildung 17 zeigt einen Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem durchschnittlichen monatlichen Energieertrag. Die gute Übereinstimmung zwischen theoretischen und gemessenen Werten ist deutlich.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die thermodynamischen Prozesse in einem Aufwindkraftwerk gut verstanden sind und die Rechenmodelle einen Reifegrad erlangt haben, der die präzise Abbildung des Anlagenverhaltens unter gegebenen meteorologischen Bedingungen erlaubt.

6. Große Aufwindkraftwerke

Detaillierte Untersuchungen unterstützt von umfangreichen Windkanalexperimenten zeigen, daß die thermodynamischen Berechnungen für Kollektor, Turm und Turbine auch zuverlässig auf Großanlagen übertragbar sind.

6.1 Übertragbarkeit auf Großanlagen

Trotz großer Unterschiede zwischen der Pilotanlage in Manzanares und z. B. der projektieren 200MW-Anlage hinsichtlich Fläche und Volumen sind dennoch die thermodynamischen Kenngrößen in beiden Fällen erstaunlich ähnlich: Zieht man den Temperaturanstieg und die

Strömungsgeschwindigkeit im Kollektor als Beispiel heran, so ergeben sich für Manzanares ein gemessener Temperaturanstieg von bis zu 17 K und eine Windgeschwindigkeit von bis zu 12 m/s, während die berechneten Durchschnittswerte für eine 200MW-Anlage 18 K bzw. 11 m/s betragen.

Deshalb werden Meßergebnisse aus Manzanares und Aufwindkraftwerk-Simulationsprogramme (WEINREBE 2000) herangezogen, um Großanlagen mit Ausgangsleistungen bis 200 MW auszulegen. In Abbildung 18 sind die Ergebnisse einer derartigen Simulationsrechnung dargestellt. Zu sehen ist für jede Jahreszeit ein Zeitraum von vier Tagen. Diese Anlage ohne zusätzlichen Wärmespeicher arbeitet rund um die Uhr, wenn auch bei reduzierter Ausgangsleistung in der Nacht, insbesondere im Winter.

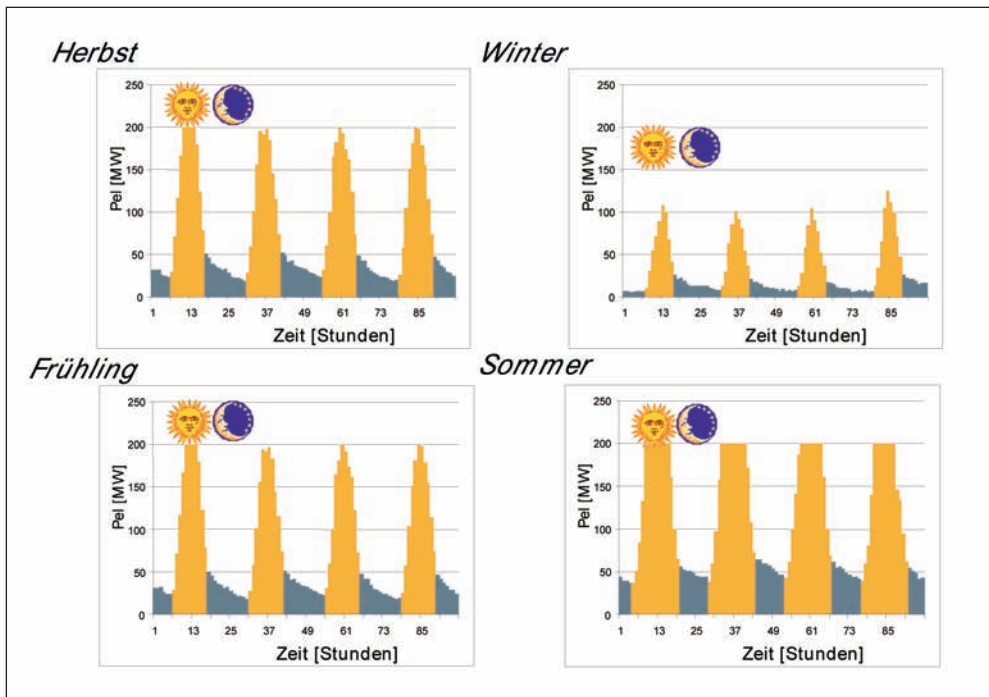


Abb. 18 Simulationsergebnisse für die Strombereitstellung eines 200MW-Aufwindkraftwerks zur Spitzenlast-Strombereitstellung ohne zusätzlichen thermischen Speicher (z. B. um den Energiebedarf für Klimatisierung zu decken). Es handelt sich um einen Standort mit sehr ausgeprägten Jahreszeiten.

6.2 Technologie

Die Bauweise mit Hängebändern, die sich in Manzanares bewährt hatte, ist auch für Großanlagen verwendbar. Der Windsog kann allerdings das Eigengewicht der leichten Hängekonstruktion ausgleichen, so daß sie nach oben durchschlägt (was sie in Manzanares, ohne Schaden zu nehmen, auch tat). Insbesondere an Standorten mit hohen Lohn- und relativ dazu niedrigen Stahlkosten kann es deshalb richtig sein, statt Hängebändern einfache Biegeträger einzusetzen.

Türme mit einer Höhe von 1 000 m stellen eine Herausforderung dar, sie können aber heute gebaut werden. Der CN Tower in Toronto ist knapp 600 m hoch, das Teipei-101-Hochhaus in Taiwan über 500 m, und es gibt ernsthafte Pläne für 2 000 m hohe Wolkenkratzer im erdbebengeplagten Japan. Für ein Aufwindkraftwerk ist lediglich ein einfacher Hohlzylinder erforderlich. Er ist nicht sonderlich schlank, und die Anforderungen sind gegenüber bewohnten Gebäuden deutlich reduziert.

Es gibt verschiedene Bauweisen, einen derartigen Turm zu bauen: Freistehende Stahlbetonröhren, abgespannte Stahlblechröhren oder Kabelnetzbauweisen mit einer Verkleidung aus Blechen oder Membranen. Die Berechnungsverfahren hierfür sind alle bekannt und wurden für Kühltürme bereits verwendet. Es sind keine Neuentwicklungen erforderlich.

Detaillierte statische/strukturmechanische Untersuchungen ergaben, daß es sinnvoll ist, den Turm in mehreren Ebenen mit Litzenbündeln in der Form von Speichenrädern auszusteißen, so daß kleinere Wandstärken ausreichen. Dies stellt vielleicht die einzige wirkliche Neuerung von Aufwindkraftwerken gegenüber bestehenden Bauwerken dar.

Im Bereich der mechanischen Auslegung konnte in weiten Teilen auf Erfahrungen aus dem Bereich der Wasserkraftwerke und Windkraftanlagen, Kühlturmtechnologie, Windkanalventilatoren und des Betriebs der Anlage in Manzanares zurückgegriffen werden. Wenn auch zunächst eine einzelne Vertikalachsentrurbine in der Turmröhre als die naheliegendste Lösung erscheint, gehen doch die aktuellen Kostenabschätzungen von einer größeren Anzahl von Horizontalachsentrurbinen aus, die am Übergang zwischen Kollektor und Turm konzentrisch um den Turm angeordnet sind. Dadurch können Turbinen üblicher Abmessungen verwendet werden.

6.3 Optimierung

Der Energieertrag eines Aufwindkraftwerks ist proportional zur Globalstrahlung, der Kollektorfläche und der Turmhöhe. Es gibt kein physikalisches Optimum. Die optimalen Abmessungen können nur errechnet werden, wenn spezifische Komponentenkosten (Kollektor, Turm, Turbine) für den jeweiligen Standort bekannt sind. So werden also Anlagen unterschiedlicher Abmessungen für unterschiedliche Standorte gebaut werden – jeweils zu minimalen Kosten: Ist die Kollektorfläche billig und Stahlbeton teuer, dann wird man einen großen Kollektor und einen vergleichsweise kleinen Turm bauen, und wenn der Kollektor teuer ist, wird man einen kleineren Kollektor und einen großen Turm bauen.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die typischen Abmessungen von Aufwindkraftwerken. Die Zahlen basieren auf international üblichen Material- und Baukosten. Die Kosten für ungelernete Arbeitskräfte sind mit 5 Euro/h angesetzt.

Tab. 2 Typische Abmessungen und Strombereitstellung ausgewählter Aufwindkraftwerke

| | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nennleistung | MW | 5 | 30 | 100 | 200 |
| Turmhöhe | m | 550 | 750 | 1000 | 1000 |
| Turmdurchmesser | m | 45 | 70 | 110 | 120 |
| Kollektordurchmesser | m | 1 200 | 2 900 | 4 300 | 7 000 |
| Strombereitstellung ^[1] A | GWh/a | 14 | 99 | 320 | 680 |

[1] an einem Standort mit einer Globalstrahlungssumme von 2 300 kWh/(m²a)

6.4 Wirtschaftlichkeit

Basierend auf spezifischen Kosten und den Abmessungen aus Tabelle 2 wurden die Investitionskosten ermittelt. Zusammen mit den errechneten Jahresenergieerträgen aus Simulationsrechnungen werden damit finanzmathematisch gemittelte Stromgestehungskosten (im folgenden kurz als »Stromgestehungskosten« bezeichnet) errechnet, zunächst für einen Kapitalzinsfuß von 6 % und eine Abschreibungsdauer von 30 Jahren (Tab. 3).

Aus Tabelle 3 geht klar hervor, daß die Stromgestehungskosten für ein kleines Aufwindkraftwerk mit 5 MW Nennleistung vergleichsweise hoch sind, vergleichbar etwa denen einer Photovoltaikanlage. Mit zunehmender Anlagengröße geht eine signifikante Reduktion der Stromgestehungskosten einher, im angeführten Beispiel auf 0,07 Euro/kWh für die 200 MW-Anlage, wieder bei einem Kapitalzinsfuß von 6 % und 30 Jahren Abschreibungsdauer.

Tab. 3 Investitions- und Stromgestehungskosten

| | | | | | |
|--------------------------------------|-------------|------|------|------|------|
| Nennleistung | MW | 5 | 30 | 100 | 200 |
| Turmkosten | Mio. Euro | 19 | 49 | 156 | 170 |
| Kollektorkosten ^[1] | Mio. Euro | 10 | 52 | 117 | 273 |
| Turbinenkosten | Mio. Euro | 8 | 32 | 70 | 123 |
| Engineering, Tests, Verschiedenes | Mio. Euro | 4 | 16 | 40 | 40 |
| Summe | Mio. Euro | 42 | 149 | 383 | 606 |
| Annuität auf Investitionskosten | Mio. Euro/a | 3,0 | 10,8 | 27,8 | 44,0 |
| Betriebs- und Wartungskosten | Mio. Euro/a | 0,2 | 0,7 | 1,9 | 3,0 |
| Stromgestehungskosten ^[2] | Euro/kWh | 0,24 | 0,12 | 0,09 | 0,07 |

[1] Kostenansatz für ungelernete Arbeiter 5 Euro/h.

[2] Bei einem Zinssatz von 6 % und einer Abschreibungsdauer von 30 Jahren.

Um den Einfluß der Finanzierungsparameter Zinsfuß und Abschreibungsdauer zu verdeutlichen, wird für sie eine Parametervariation durchgeführt (Abb. 19). Die obere Grenze mit den höheren Stromgestehungskosten entspricht einer Abschreibungsdauer von 20 Jahren, die untere Grenze einer Abschreibungsdauer von 30 Jahren.

Wie erwartet werden die Stromgestehungskosten des kapitalintensiven Aufwindkraftwerks vom Zinsfuß dominiert. Auch die Abschreibungsdauer hat einen signifikanten Einfluß. Mit einem Zinsfuß von 12 % und einer Abschreibungsdauer von 20 Jahren ergeben sich für die 200MW-Anlage Stromgestehungskosten von 0,12 Euro/kWh. Kann die Finanzierung mit einem Zinsfuß von 6 % und 40 Jahren Abschreibungsdauer realisiert werden, so halbieren sich die Stromgestehungskosten auf 0,06 Euro/kWh.

In Abbildung 20 ist nun ein allgemeinerer, eher prinzipieller Vergleich der Stromgestehungskosten von Aufwindkraftwerk und Kohlekraftwerk dargestellt. Zu sehen ist der zeitliche Verlauf über rund 50 Jahre der jeweiligen Annuitäten der Investitionskosten, der Verlauf der Betriebskosten sowie der resultierenden Stromgestehungskosten. Der Darstellung liegt die berechnete Annahme zu Grunde, daß die Brennstoffkosten für das Kohlekraftwerk im Zeitverlauf steigen.

Im ausgewählten Beispiel sind während der ersten Betriebsjahre die Stromgestehungskosten des Aufwindkraftwerks höher als die des Kohlekraftwerks. Die Lücke zwischen den

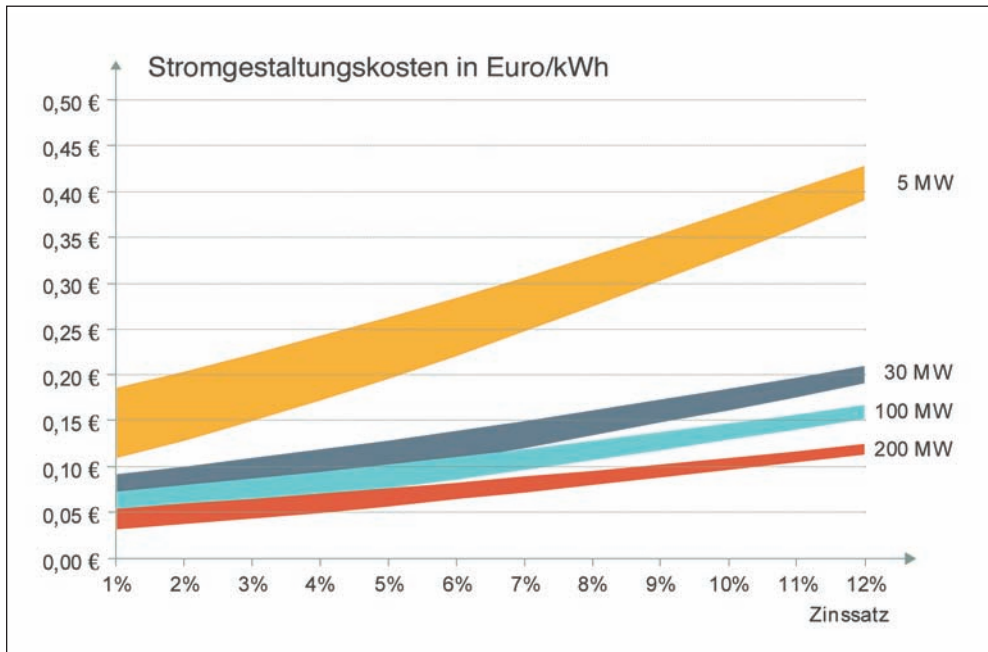


Abb. 19 Stromgestehungskosten in Abhängigkeit vom Zinsfuß. Obere Grenze: Abschreibungsdauer 20 Jahre, untere Grenze: Abschreibungsdauer 40 Jahre.

Stromgestehungskosten wird im Zeitverlauf mit zunehmenden Brennstoffkosten kleiner. Nach 20 Jahren sind die Stromgestehungskosten gleich hoch. Dann sind in diesem Beispiel beide Kraftwerke bezahlt, es müssen also keine Annuitäten mehr bezahlt werden. Von diesem Zeitpunkt an erzeugt das Aufwindkraftwerk Strom zu sehr niedrigen Kosten, da nur noch Betriebskosten zu bezahlen sind. Im Gegensatz dazu sind die Stromgestehungskosten des Kohlekraftwerks immer noch relativ hoch, da Brennstoffkosten anfallen.

In unserem Beispiel muß nach 30 Jahren ein neues Kohlekraftwerk gebaut werden, während das Aufwindkraftwerk nach wie vor in seiner ursprünglichen Konfiguration betrieben werden kann. Dadurch nimmt die Stromgestehungskostendifferenz zwischen Kohlekraftwerk und Aufwindkraftwerk weiter zu.

Die Stromgestehungskosten des Aufwindkraftwerks werden von der Kredittilgung dominiert, während sie bei fossil gefeuerten Kraftwerken von den Brennstoffkosten bestimmt werden.

Für das in Abbildung 20 dargestellte Beispiel wurden der Zinssatz und die Teuerung des Kohlepreises gezielt so gewählt, daß die berechneten Stromgestehungskosten nach der Abschreibungsdauer identisch sind. In Wirklichkeit kann es aber – je nach tatsächlichen Brennstoffkosten und Finanzierungsparametern – länger dauern, bis Kostenparität erreicht ist. Es kann aber auch bereits früher geschehen.

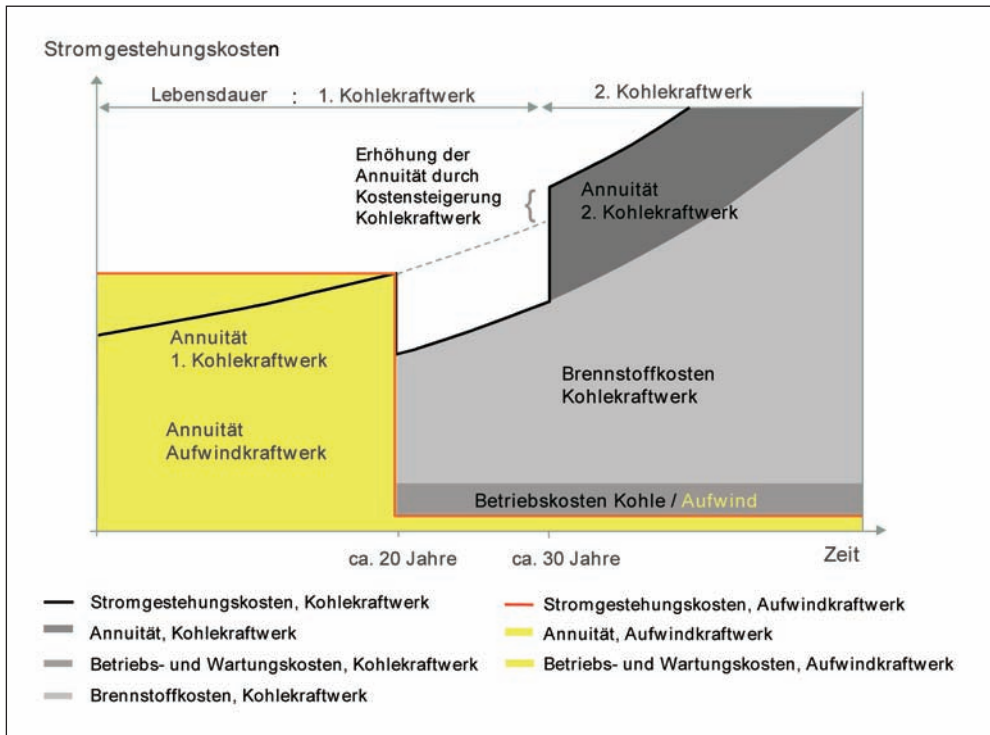


Abb. 20 Grundsätzlicher Vergleich der Stromgestehungskosten für ein Aufwindkraftwerk und für ein Kohlekraftwerk

6.5 Ökologische Kenngrößen

Die beiden hier am meisten interessierenden Größen sind die Treibhausgasemissionen, ausgedrückt in CO_2 -Äquivalenten, und die energetische Amortisationszeit (*energy payback time*).

Da kein Brennstoff verbrannt wird, gibt es auch keine Treibhausgasemissionen während des Betriebs des Aufwindkraftwerks. Allerdings müssen der Stromerzeugung mit Aufwindkraftwerken wegen des Baus der Anlage (auf Grund der Bereitstellung von Baumaterialien und des Betriebs der Baumaschinen) dennoch Treibhausgasemissionen angerechnet werden. Daher muß für einen fairen Vergleich verschiedener Kraftwerkstypen eine Lebenszyklusanalyse (*life cycle assessment*) durchgeführt werden, die alle mit Bau, Betrieb und Rückbau des Kraftwerks verbundenen Stoff- und Energieströme berücksichtigt ('von der Wiege bis zur Bahre'). Dann werden die resultierenden Gesamtsummen durch die während der Betriebszeit vom Kraftwerk bereitgestellte elektrische Energie dividiert, um so zu spezifischen Kenngrößen, z. B. Gramm Treibhausgasemissionen je Kilowattstunde, zu gelangen (*European Committee for Standardization 1997*).

Die Ergebnisse einer derartigen Lebenszyklusanalyse zeigen, daß die spezifischen Treibhausgasemissionen eines größeren Aufwindkraftwerks rund $60 \text{ g/kWh}_{\text{el}}$ betragen (DOS SANTOS BERNARDES 2004), verglichen mit den rund $1000 \text{ g/kWh}_{\text{el}}$ eines Kohlekraftwerks (MARHEINEKE 1998) also etwa 94 % weniger!

Auch die Ergebnisse für die energetische Amortisationszeit oder *energy payback time*¹, definiert als die Zeitdauer, die ein Kraftwerk im Betrieb sein muß, um soviel Primärenergie einzusparen wie für Kraftwerksbau und Betrieb bis zu diesem Zeitpunkt eingesetzt wurden, sind sehr positiv: Nach rund drei Jahren hat sich ein Aufwindkraftwerk energetisch amortisiert. Ab dann, also für mindestens 50 weitere Jahre, ist es eine Nettoenergiequelle sauberer Elektrizität.

7. Zusammenfassung

Aufwindkraftwerke erzeugen aus direktem und diffusem Sonnenlicht elektrische Energie. Das Aufwindkraftwerk basiert auf einfachen physikalischen Prinzipien, seine Physik ist gut verstanden. Da der thermodynamische Wirkungsgrad der Anlage mit der Turmhöhe zunimmt, müssen solche Anlagen groß sein, um wettbewerbsfähige Stromgestehungskosten zu erzielen. Große Kraftwerke bedeuten hohe Investitionskosten, dies zu einem wesentlichen Teil wegen der Lohnkosten. Das wiederum schafft Arbeitsplätze, also eine hohe Wertschöpfung im Standortland, und vermeidet die umweltschädigende Verwendung schwindender fossiler Ressourcen. Es bedeutet auch den Wegfall devisenzehrender Importe von Kohle, Öl, Gas, was insbesondere den Entwicklungsländern hilft, indem Devisen freigesetzt werden.

Der Bau von Aufwindkraftwerken bedeutet keinen Ressourcenverbrauch, lediglich eine Ressourcenbindung. Aufwindkraftwerke bestehen im wesentlichen aus Beton und Glas, das ist Sand und (selbsterzeugte) Energie; Aufwindkraftwerke können sich also in Wüsten selbst reproduzieren – eine wahrhaftig nachhaltige Energiequelle.

Dank

Besonderer Dank gilt dem damaligen deutschen Bundesministerium für Forschung und Technologie für die Förderung des Prototyps in Manzanares und den Investoren und Mitarbeitern von SolarMillennium und EnviroMission für ihren Einsatz, große Aufwindkraftwerke endlich zur Realität werden zu lassen, und nicht zuletzt den Kollegen im Büro von Schlaich Bergermann und Partner für die kontinuierliche Unterstützung der Solarenergiegruppe.

Literatur

- CAMPBELL, C. J.: Ölwechsel. München: Deutscher Taschenbuch Verlag 2002a
CAMPBELL, C. J.: Forecasting Global Oil Supply 2000–2050. Hubbert Center Newsletter #2002/3, M. King Hubbert Center, Colorado School of Mines, Colorado, USA (2002b)
DOS SANTOS BERNARDES, M. A.: Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken. Forschungsbericht Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart (2004)
DOS SANTOS BERNARDES, M. A., VOSS, A., and WEINREBE, G.: Thermal and technical analyses of solar chimneys. *Solar Energy* 75(6), 511–524 (2004)
DUFFIE J. A., and BECKMAN W. A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd Ed. New York: Wiley Interscience 1991

1 Die Verwendung des Indikators »energy payback time« ist nur in Verbindung mit erneuerbaren Energien sinnvoll, da es nur mit diesen möglich ist, weniger erschöpfliche Energie aufzuwenden als elektrische Energie bereitgestellt wird. Fossile Kraftwerke (z. B. Kohle- und Kernkraftwerke) benötigen immer mehr erschöpfliche Primärenergie für Bau und Betrieb, als sie an elektrischer Energie bereitstellen können (sonst müßten sie ja einen Wirkungsgrad > 1 besitzen).

- European Committee for Standardization*: EN ISO 14040, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. Brüssel (1997)
- GANNON, A. J., and BACKSTRÖM, T. W. VON: Solar tower cycle analysis with system loss and solar collector performance. In: PACHECO J. E., and THORNBLOOM, M. D. (Eds.): Proceedings of Solar 2000: Solar Powers Life, Share the Energy. June 16–21 2000, Madison, USA. New York: ASME 2000
- GÜNTHER, H.: In hundert Jahren – Die künftige Energieversorgung der Welt. Kosmos, Gesellschaft der Naturfreunde. Stuttgart: Franckh'sche Verlagshandlung 1931
- HAAF, W.: Solar chimneys. Part II: Preliminary test results from the Manzanares pilot plant. *Solar Energy* 2, 141–161 (1984)
- HAAF, W., FRIEDRICH, K., MAYR, G., and SCHLAICH, J.: Solar chimneys. Part I: Principle and construction of the pilot plant in Manzanares. *Solar Energy* 2, 3–20 (1983)
- International Energy Agency*: World Energy Outlook 2002. Chapter 13: Energy and Poverty. Paris: International Energy Agency 2002
- KREETZ, H.: Theoretische Untersuchungen und Auslegung eines temporären Wasserspeichers für das Aufwindkraftwerk. Diplomarbeit TU Berlin. Berlin 1997
- MARHEINEKE, T., et al.: Total Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generating Systems Based on Fossil Fuels with Geographic Reference to Germany. Wien: International Atomic Energy Association (IAEA) 1998
- SCHLAICH, J., BERGERMANN, R., SCHIEL, W., and WEINREBE, G.: Design of Commercial Solar Tower Systems. Proceedings of ISEC 2003, March 15–18 2003, Hawaii. 2003
- SCHLAICH, J., and SCHIEL, W.: Solar Chimneys. Encyclopedia of Physical Science and Technology. 3rd Ed. London: Academic Press 2001
- SCHLAICH, J., SCHIEL, W., FRIEDRICH, K., SCHWARZ, G., WEHOWSKY, P., MEINECKE, W., and KIERA, M.: Abschlußbericht Aufwindkraftwerk, Übertragbarkeit der Ergebnisse von Manzanares auf größere Anlagen. BMFT-Förderkennzeichen 0324249D. Stuttgart 1990
- Verein Deutscher Ingenieure*, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC): VDI-Wärmeatlas. Berlin: Springer 1998
- WEINREBE, G.: Solar Chimney Simulation. Proceedings of the IEA SolarPACES Task III Simulation of Solar Thermal Power Systems Workshop, 28th and 29th Sept. 2000. Cologne 2000
- WEINREBE, G., and SCHIEL, W.: Up-Draught Solar Tower and Down-Draught Energy Tower – A Comparison. Proceedings of the ISES Solar World Congress 2001. Adelaide (Australia) 2001

Dr.-Ing. Gerhard WEINREBE
Schlaich, Bergermann und Partner
Beratende Ingenieure im Bauwesen
Hohenzollernstraße 1
70178 Stuttgart
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 771 648710
Fax: +49 771 6487166
E-Mail: g.weinrebe@sbp.de

Kernfusion: Eine nachhaltige Energiequelle der Zukunft

Alexander M. BRADSHAW, Mitglied der Akademie, und Thomas HAMACHER
(Garching)

Mit 13 Abbildungen



Zusammenfassung

Die Kernfusion ist die Energiequelle der Sonne und der anderen Sterne. Die Fusionsforschung verfolgt weltweit das langfristige Ziel, diesen Prozeß der Energieerzeugung auf der Erde nachzuvollziehen. Um die abstoßenden Kräfte zwischen den positiv geladenen leichten Kernen zu überwinden und damit Fusionsreaktionen zu initiieren, wird ein genügend dichtes Gas auf sehr hohe Temperaturen – es wird dann Plasma genannt – erhitzt und in einem Magnetfeldkäfig eingeschlossen. Im Fall der Deuterium-Tritium-Reaktion (die optimale Reaktion für die Energieerzeugung) sind Temperaturen von mehr als 100 Millionen Grad notwendig, und diese wurden in den letzten Jahren auch routinemäßig erreicht. Es ist außerdem jedoch erforderlich, die Leistungsverluste minimal zu halten, indem das Plasma so gut wie möglich von seiner Umgebung thermisch isoliert wird. Diese Plasmaeigenschaft wird mit der Energieeinschlußzeit gemessen: Sie ist die Zeit, die das Plasma nach Abschalten aller externen Heizquellen zum Abkühlen benötigt. In einem zukünftigen Fusionskraftwerk muß das "Fusionsprodukt" aus Dichte, Temperatur und Energieeinschlußzeit den Wert von $3 \cdot 10^{22} \text{ Ksm}^{-3}$ überschreiten. Der Wert des Fusionsprodukts ist von den ersten Experimenten in den 50er Jahren bis zu den größten Tokamakexperimenten heute kontinuierlich um mehr als fünf Größenordnungen gesteigert worden. In dem gemeinsamen europäischen Experiment JET liegt das Fusionsprodukt nur noch um einen Faktor fünf unterhalb des Zielwertes für ein Kraftwerk. Tatsächlich wurde in Experimenten an JET eine Fusionsleistung von 12 MW für eine Zeit von einer Sekunde mit einem Spitzenwert von 16 MW erzielt. Der Leistungsverstärkungsfaktor Q (das Verhältnis von erzeugter Fusionsleistung zu notwendiger Heizleistung) lag bei 0,65, d. h. der "break even"-Punkt wurde nahezu erreicht. Q = 1 entspricht der Zündung des Plasmas, bei der es selbständig ohne äußere Heizung weiter brennt. Der kritische Schritt zur Herstellung eines Plasmas, das für längere Zeit Energie liefert, soll mit dem "nächsten Schritt", dem ITER-Projekt, gegangen werden. Das Experiment soll das Prinzip der Kernfusion mit magnetischem Einschluß zur Energieerzeugung unter Kraftwerksbedingungen demonstrieren und die Machbarkeit einiger der notwendigen Schlüsseltechnologien testen. Eine Vereinbarung zwischen Europa, Japan, Rußland, den USA, Kanada, China und Südkorea über Bau und Betrieb von ITER wird für spätestens 2004 erwartet. Standorte sind von Frankreich und Japan angeboten worden.

Die sogenannte Trägheitsfusion stellt einen alternativen Weg zur Realisierung der kontrollierten Kernfusion dar, obwohl die technologische Umsetzung für die Energieerzeugung noch viele Fragen offen läßt. Die Grundidee ist es, ein kleines D-T-Kügelchen durch Beschuß mit Hochleistungslasern oder Ionenstrahlen gleichzeitig zu erhitzen und zu komprimieren, um die Zündung zu erreichen. Das heiße Plasma wird dabei alleine aufgrund seiner Massenträgheit zusammengehalten.

Die Forschungsarbeiten zur Realisierung der Kernfusion haben zur Etablierung eines neuen Gebietes der Grundlagenphysik geführt, nämlich der Hochtemperaturplasmaphysik.

Abstract

A restructuring of the energy system is a necessary prerequisite for achieving sustainable development. At present, the world energy supply relies to more than 80 % on fossil fuels, a situation which is not expected to change in the next few decades. New and more sustainable energy carriers and conversion technologies need to be developed. Nuclear fusion belongs in this category. Progress in fusion research has made it possible to design the ITER experiment, which will demonstrate the physical and technical viability of fusion as an energy source. Moreover, it will qualify most of the key technologies to construct and operate a demonstration power plant. Investigations based on physics arguments have shown that the safety and environmental aspects of fusion are very positive and are well in line with most concepts of sustainable development. Present cost estimates show that fusion power plants could be economical, provided of course that »external« aspects such as greenhouse gas emissions are included in the calculations.

1. Einführung

Das Jahr 2003 hat ein Feuerwerk von Ereignissen produziert, die alle im engeren oder weiteren Sinne mit Energie zusammenhängen. Das Jahr fing an mit dem Krieg im Irak, einem Land mit sehr reichen Erdölvorkommen. Dann brachte ein Jahrhundertsommer in Europa das Thema Klimaveränderung kurzzeitig wieder auf die Agenda, und zum Schluß wurde in Rußland, von dem Deutschland immerhin 29 % des Rohöls und 31 % des Erdgases bezieht, der Chef des Jukos-Ölkonzerns, CHODORKOWSKI, unter zweifelhaften Gründen festgenommen. Als Begleitmusik gab es Stromausfälle in den USA und Europa und immer wiederkehrende Diskussionen über den Emissionshandel. In Deutschland wird intensiv über den Ersatz veralteter Kraftwerkskapazität gestritten, man spricht dabei von einem Bedarf von 40 GW in den nächsten zwanzig Jahren. Dabei fällt das Wort Kohle überraschend oft. Trotz dieser zahlreichen Warnungen ist der politische Wille schwach, das Thema Energie wieder zu einem zentralen Thema werden zu lassen. Die Haushaltspläne im Bereich der Energieforschung zeigen zumindest keine Trendwende. Doch all die Probleme, die oben nur kurz angerissen wurden, scheinen kleine Probleme zu sein, wenn unser Blick auf die ganze Welt fällt und auf die weite Zukunft, d. h. die nächsten fünfzig bis hundert Jahre.

Der Versuch, wachsenden Wohlstand, der in der Vergangenheit stets mit steigendem Energieverbrauch einherging, mit einer nachhaltigen Entwicklung in Einklang zu bringen, wurde bislang nur von Umweltschützern und wenigen Politikern ernsthaft diskutiert. Es wird jedoch in den nächsten Jahrzehnten notwendig, eine realistische Lösung für das Energieproblem zu finden, die sowohl ein weiteres Wachstum der Energienachfrage berücksichtigt wie auch die Tatsache, daß die *Erneuerbaren Energien* das Problem alleine wohl nicht lösen werden. Die jüngsten Fortschritte in der Hochtemperatur-Plasmaphysik zeigen, daß die Kernfusion – die Energiequelle von Sonne und Sternen – ein Pfeiler in einem nachhaltigen Energiesystem werden könnte. Fusionskraftwerke versprechen einen hohen Sicherheitsstandard sowie hohe Umweltverträglichkeit und Versorgungssicherheit.

Die Fusionsforschung ist aber noch unter einem anderen Aspekt von zentraler Bedeutung. In vorher nie gesehener Zusammenarbeit wird zur Zeit das ITER-Experiment, der nächste Schritt im internationalen Fusionsprogramm, entwickelt und bald gebaut. Die Organisationsform von ITER kann dabei als Musterbeispiel für andere Projekte gesehen werden, die zentrale Herausforderungen der Menschheit bearbeiten. Nur eine solche Organisationsform erlaubt es einer großen Zahl von Ländern, Zugang zu Schlüsseltechnologien der Zukunft zu finden.

2. Energie: ihre Bereitstellung und Nutzung

In Publikationen über globale Ressourcen wird häufig festgestellt, daß die letzten vier Jahrzehnte des zwanzigsten Jahrhunderts geprägt waren von wachsendem Bewußtsein über zunehmende Umweltzerstörung und Raubbau an den natürlichen Ressourcen. Der tatsächliche Fortschritt auf dem Weg zu dem, was als "nachhaltige Entwicklung" beschrieben wird, ist jedoch sehr bescheiden. Entsprechend der allgemein akzeptierten Definition dieses Begriffs, der zum ersten Mal im Brundtland-Bericht (1987) formuliert wurde, ist Nachhaltigkeit eine hypothetische Situation, in der die Bedürfnisse der lebenden Generation befriedigt werden, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden.

Nirgendwo wird dies deutlicher als im Energiebereich. Tatsächlich ist »nachhaltige Entwicklung« hauptsächlich ein Energieproblem. Der Göttinger Physiker Friedrich HUND hat in seinem Essay »Die physikalischen Grundlagen unseres Daseins« (1975) als einer der ersten – zumindest soweit es den Autoren bekannt ist – die physikalische Basis der Energieversorgung und -nutzung diskutiert. Sein Argument ist einfach: Materie und Energie unterliegen Erhaltungssätzen. In natürlichen Prozessen bleibt, mit Ausnahme von Kernprozessen, die Zahl der Atome konstant. Ein Stoff kann zwar durch die Umwandlung in eine weniger wertvolle chemische Verbindung an Wert verlieren, der Prozeß ist jedoch reversibel.

Energie wird dagegen – völlig unabhängig von ihrem solaren, fossilen oder nuklearen Ursprung – durch den Gebrauch irreversibel entwertet. Dies manifestiert sich im zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Die Menge der Energie bleibt zwar erhalten, aber bei jedem Wandlungsprozeß (sei es zur Stromproduktion, zur Heizung oder zum Transport) wird arbeitsfähige, wertvolle Energie in wertlose Umweltwärme umgewandelt. So erzeugt zum Beispiel Benzin im Auto Wärme und mechanische Energie, die das Auto antreibt. Die bei der Bewegung des Autos wirkenden Reibungskräfte – z. B. der Reifen auf der Straße und der Karosserie mit der Luft – führen zu einer Erwärmung der Umwelt. Diese Energie ist für die weitere Nutzung unwiderruflich verloren.

Dagegen kann die Entwertung von Stoffen wieder rückgängig gemacht werden, wenn ausreichend Energie vorhanden ist. So können oxydierte oder korrodierte Metalle wiederhergestellt werden, Wasser kann gereinigt oder entsalzt werden, Verbrauchsprodukte können recycelt werden. Stets jedoch ist der entscheidende Faktor beim Schließen von Materialkreisläufen die Zufuhr von Energie. Selbst eine so genannte »weiche« Nachhaltigkeit wird wohl mehr Energie verbrauchen, als in vielen Projektionen des Weltenergieverbrauches unterstellt wird, insbesondere wenn Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum weiterhin anhalten. Energie und Energiequellen verdienen deswegen in einer nachhaltigen Wirtschaft besondere Aufmerksamkeit.

Der Energiesektor ist heute unglücklicherweise weit davon entfernt, auch nur im vagsten Sinne nachhaltig zu sein (NAKICENOVIC et al. 1998). Wie Abbildung 1 zeigt, werden heute 90 % des weltweiten Primärenergieverbrauches von rund 400 EJ durch die Verbrennung fossiler Energieträger gedeckt. In diesen Brennstoffen – in Kohle, Öl und Gas – ist ein geringer Teil der Sonnenstrahlung gespeichert, die über viele Millionen Jahre auf die Erde auftraf. Im gesamten 20. Jahrhundert wurden etwa 14700 EJ Primärenergie verbraucht. Mit 36 % nimmt Kohle auch im 20. Jahrhundert die Spitzenrolle ein, gefolgt von Erdöl mit 31 %, Gas 17 %, Biomasse (traditionell) 8 %, Wasser 5 % und Kernenergie 3 %. Die Menschheit ist dabei, diese natürlichen Ressourcen innerhalb weniger Jahrzehnte zu verschwenden. Wissenschaftler der *University of Utah* haben herausgefunden, daß zur Produktion eines Liters Benzin etwa 23 t Pflanzenmasse notwendig waren. Zudem wird durch die ungehemmte Nutzung fossiler Energieträger die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf alarmierende Weise in die Höhe getrieben. Eine daraus folgende globale Erwärmung und drastische Veränderungen des Klimas werden befürchtet. Hinzu kommt, daß die bekannten Ölreserven bei gleichbleibendem Verbrauch nur noch fünfzig Jahre reichen; unkonventionelle Lagerstätten, wie Ölsande und Ölschiefer, und auch Gas wird es noch länger geben. Zudem finden sich die größten Öl- und Gaslagerstätten in Regionen, die als politisch instabil gelten. Die Abschätzungen der *International Energy Agency* (IEA) in Paris gehen davon aus, daß der überwiegende Anteil der steigenden Erdölnachfrage durch Öl aus OPEC-Ländern gedeckt werden muß (Abb. 2). Die weltweiten Kohlevorkommen sind dagegen gleichmäßiger über die Erde verteilt und können den

Bedarf der nächsten zwei bis drei Jahrhunderte decken. Das gleiche gilt für den Brennstoff Uran, mit dem konventionelle Kernkraftwerke gespeist werden. Obwohl letztere kein CO₂ erzeugen, werden sie doch in vielen Ländern aus Sicherheitsgründen und wegen der Nachhaltigkeitsprobleme, die durch den langlebigen radioaktiven Abfall erzeugt werden, kritisch betrachtet.

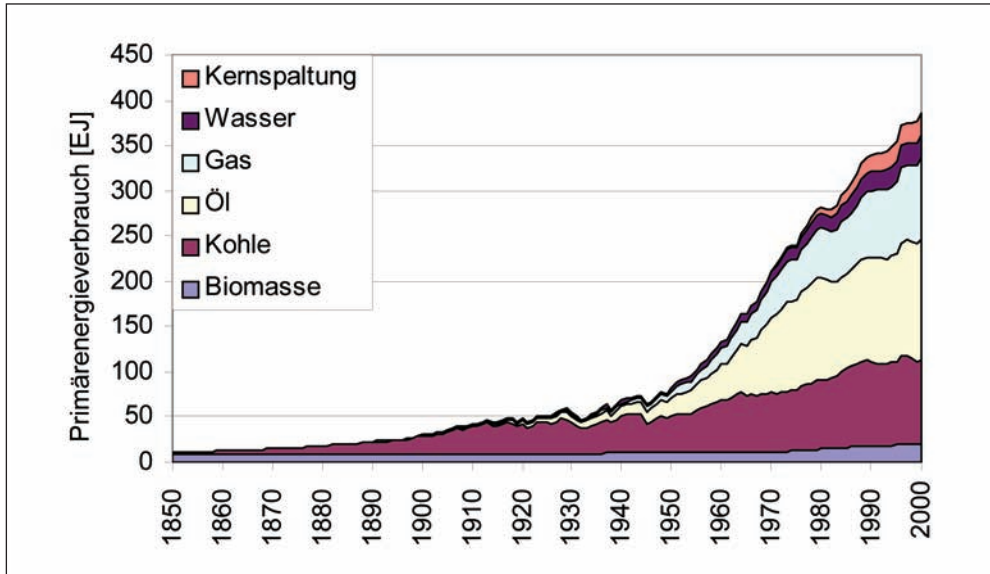


Abb. 1 Die Entwicklung der Bereitstellung von Primärenergie in den letzten 150 Jahren. (Quelle: A. GRÜBLER, Technology and Global Change, IIASA 1998, BP-Statistical Review of World Energy, June 2002, eigene Berechnungen)

Es ist zu befürchten, daß die weltweite Nachfrage nach Energie noch einmal deutlich steigen wird: Die heutige Weltbevölkerung von sechs Milliarden Menschen kann sich bis zum Jahr 2100 verdoppeln. Darüber hinaus werden die heutigen Entwicklungsländer in Zukunft von den Früchten eines starken Wirtschaftswachstums profitieren wollen; auch damit wird eine steigende Energienachfrage verbunden sein. Die Abschätzungen für die Entwicklung des weltweiten Energieverbrauchs während dieses Jahrhunderts – und sie können in der Tat lediglich Abschätzungen sein – reichen von Gleichstand mit dem heutigen Verbrauch bis zu einem Anstieg um den Faktor acht (NAKICENOVIC et al. 2001), was unter anderem davon abhängig ist, welche Maßnahmen zur Reduktion der Nachfrage ergriffen werden *und welcher Lebensstil sich weltweit durchsetzen wird*.

Die teure und energieintensive Sequestrierung von CO₂, zum Beispiel durch die Umwandlung in ein klimaneutrales Karbonat, könnte die Emissionsprobleme reduzieren. Der bessere Ansatz wäre es jedoch, die Nutzung fossiler Brennstoffe drastisch einzuschränken. Wie kann dies geschehen? Dazu ist es zunächst notwendig, die Nutzung der im großen und ganzen nachhaltigen erneuerbaren Energieträger zu verstärken. Zweitens wäre ein insgesamt rationellerer Umgang mit Energie nötig, drittens die Steigerung der Wandlungswirkungsgrade und viertens die Erschließung aller Zukunftsoptionen, selbst wenn sie nicht alle Nachhal-

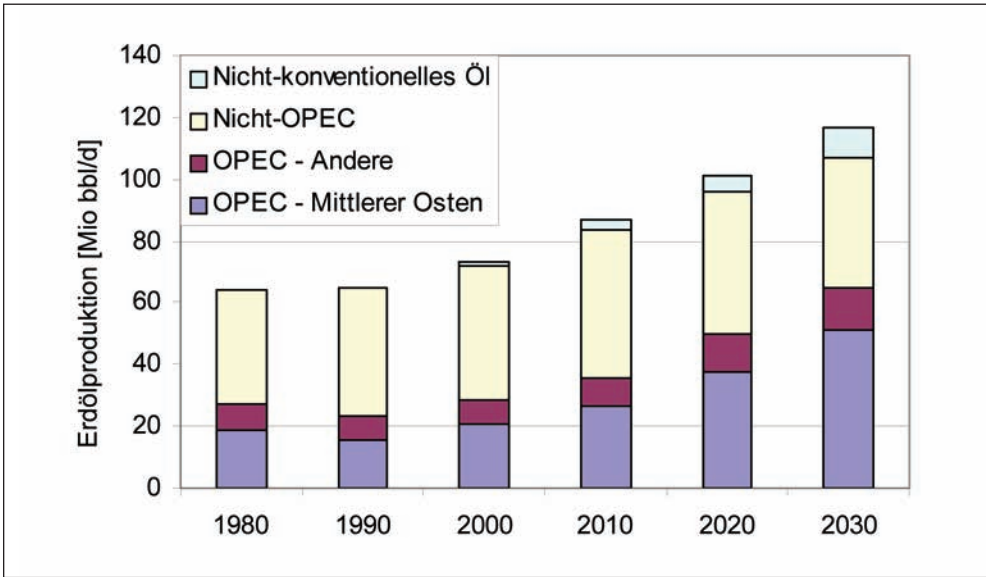


Abb. 2 Mögliche Entwicklung der weltweiten Erdölproduktion (Quelle: World Energy Investment Outlook, IEA, Paris 2003)

tigkeitskriterien erfüllen. Alle vier Maßnahmen sind kostenintensiv und werden wohl zu einem ansteigenden Energiepreis führen – ein Preis, der jedoch ohnehin steigen wird, wenn die Reserven fossiler Brennstoffe in der zweiten Jahrhunderthälfte auslaufen werden. Bis dahin werden jedoch Milliarden von Tonnen wertvoller Rohmaterialien aufgebraucht und irreparable Umweltschäden entstanden sein.

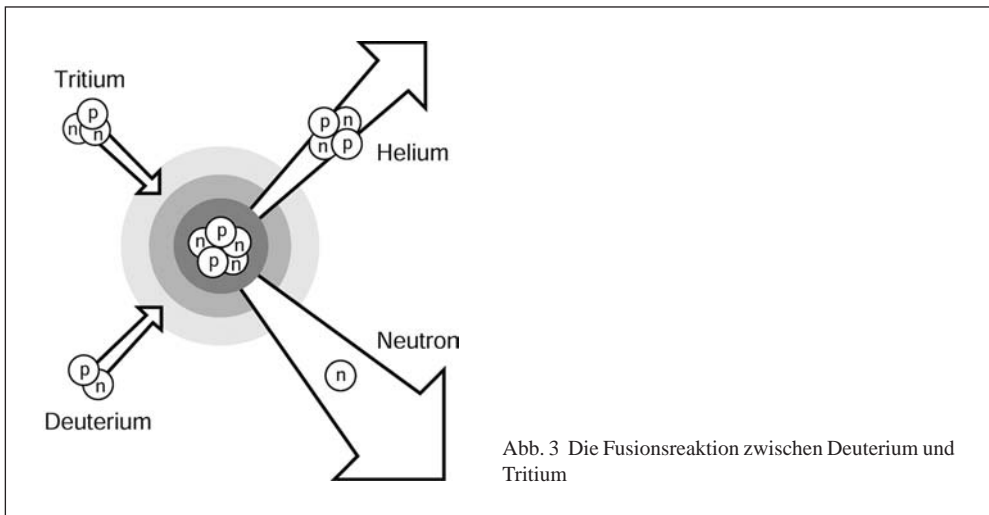
Ein kurzer Blick auf Punkt eins, die erneuerbaren Energien: Die Kosten des Solarstroms aus Photovoltaikanlagen liegen heute pro Kilowattstunde etwa um einen Faktor 20 über den Kosten konventioneller Kraftwerke. Windenergieanlagen, insbesondere im Küsten- und *Offshore*-Bereich, sowie solarthermische Kraftwerke in Südeuropa stellen sich deutlich günstiger dar. Aber auch dort bleibt, wie bei der Photovoltaik, das Problem der stochastischen Erzeugung des Stromes, was große Stromspeicher verlangt, für die es bis heute keine überzeugende Technologie gibt. Darüber hinaus gibt es berechtigte Zweifel daran, daß die Kapazität der erneuerbaren Energieträger ausreichen wird, die gesamte Nachfrage nach Strom, Wärme und Treibstoffen abzudecken: Die Kapitalkosten dieser Anlagen sind hoch, wie ihre momentanen Energiekosten belegen. Selbst in Ländern mit starker Sonneneinstrahlung, wie Indien, wird billige und »schmutzige« Kohle für die kommenden Jahrzehnte die Energieform der Wahl bleiben.

Die Punkte zwei und drei auf der Liste sind so selbstverständlich, daß sie hier nicht weiter diskutiert werden sollen. Es ist ebenso unnötig zu erwähnen, daß nur wenige Regierungen ihnen die Aufmerksamkeit widmen, die sie verdienen. Im folgenden werden wir uns dem vierten Punkt zuwenden und hier insbesondere der Kernfusion. Die jüngsten Ergebnisse der Hochtemperatur-Plasmaphysik belegen, daß die Kernverschmelzung – die Energiequelle von Sonne und Sternen – Pfeiler einer zukünftigen nachhaltigen oder nahezu nachhaltigen Energieversorgung sein könnte: Fusionskraftwerke könnten einen fast unbegrenzten Brennstoffvor-

rat erschließen und überall in der Welt aufgestellt werden. Darüber hinaus wären sie sicher und umweltfreundlich. Insbesondere würden sie die Möglichkeit einer unkontrollierten Kettenreaktion vermeiden – ein Problem der Spaltreaktoren; ebenso wäre die Bedeutung des radioaktiven Abfalls um viele Größenordnungen geringer. Die Fusion befindet sich heute jedoch noch im Entwicklungsstadium; kommerzielle Kraftwerke werden wohl kaum vor der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts verfügbar sein.

3. Fusionsforschung

Wenn sich zwei leichte Atomkerne dicht aneinander annähern, dann kommt es mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu einer Fusionsreaktion (WILHELMSSON 2000). Abbildung 3 zeigt die Verschmelzung von Deuterium und Tritium – bzw. von schwerem und überschwerem Wasserstoff – zu einem Heliumkern (α -Teilchen) und einem Neutron. Bei diesem Prozeß wird Energie in Form der Bewegungsenergie der Reaktionsprodukte, des Heliumkerns und des Neutrons, gewonnen. Gleichzeitig geht Masse verloren: Die Gesamtmasse der Reaktionsprodukte ist niedriger als die Massensumme der Ausgangsteilchen. Dabei liegt der Energiegewinn im Vergleich zu einer normalen Kohlenstoffverbrennung um mehr als sechs Größenordnungen höher. Im Prinzip könnten viele Kerne als Brennstoff in einem Fusionskraftwerk dienen; die Reaktion von Deuterium und Tritium besitzt jedoch die höchste Reaktionswahrscheinlichkeit bei vergleichsweise niedriger Temperatur.



Fusionsreaktionen treten in heißen ionisierten Gasen auf, sogenannten Plasmen. Durch Aufheizen des Plasmas erreichen die Teilchen ausreichende kinetische Energie, um die zwischen ihnen wirkenden elektromagnetischen Abstoßungskräfte zu überwinden. Dabei hängt die Anzahl der ausgelösten Fusionsreaktionen von der Temperatur und der Dichte des Plasmas ab. In einem späteren Kraftwerk muß die erzeugte Fusionsenergie deutlich höher sein als die Energie, die verbraucht wird, um das Plasma zu erzeugen und aufzuheizen. Dieses Verhältnis

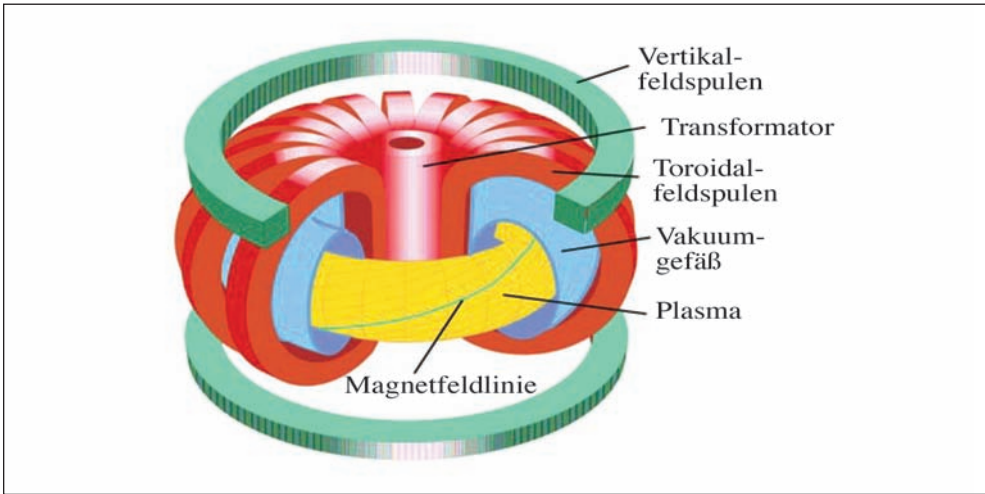


Abb. 4 Der Tokamak ist bisher das erfolgreichste magnetische Einschlußkonzept für heiße Fusionsplasmen. Der Magnetfeldkäfig, der zum Einschluß der Teilchen benötigt wird, wird aus einer Überlagerung von toroidalen und poloidalen Magnetfeldern hergestellt; letztere werden von einem Strom im Plasma erzeugt.

aus erzeugter zu aufgewandter Energie – die Energieverstärkung – wird auch Q-Wert genannt. Zu Anfang wird das Plasma durch verschiedene externe Quellen, z. B. Mikrowellen, geheizt. Mit steigender Temperatur wächst die Zahl der ausgelösten Fusionsreaktionen und vermittelt der Bewegungsenergie der erzeugten Heliumkerne heizt sich das Plasma nun in wachsendem Maße von innen. Wird schließlich keine äußere Heizung mehr benötigt, d. h. wird der Q-Wert unendlich, ist die »Zündung« erreicht. In der Praxis werden Kraftwerke jedoch bei Q-Werten zwischen 20 und 40 betrieben werden.

Zum Zünden des Plasmas sind Temperaturen von 100 bis 200 Millionen Grad erforderlich. Auf den ersten Blick könnte man meinen, daß mit solchen Temperaturen für das einschließende Gefäß unüberwindbare Materialprobleme verbunden seien. Da aber alle Plasmatteilchen eine elektrische Ladung tragen, können sie durch ein Magnetfeld beeinflusst und »berührungsfrei« eingeschlossen werden. Da die geladenen Teilchen um die magnetischen Feldlinien kreisen, sind hierfür in sich geschlossene, d. h. ringförmige magnetische Käfige geeignet. Tatsächlich sind die Verhältnisse etwas komplizierter: Die magnetischen Feldlinien müssen nicht nur einen Torus formen, sie brauchen auch noch eine schraubenförmige, d. h. helikale Verdrehung.

Unter den zahlreichen Vorschlägen, ringförmige Magnetkäfige mit helikaler Verdrillung der Feldlinien zu erzeugen, hat sich der Tokamak am erfolgreichsten erwiesen, der zuerst in Rußland verwirklicht wurde (ARTSIMOVICH 1972, WESSON 1997). Der magnetische Käfig entsteht hier aus der Überlagerung des toroidalen Feldes, das durch äußere Spulen erzeugt wird, und dem magnetischen Feld, das von dem Plasmastrom erzeugt wird. Dieser Strom wiederum wird durch eine im Zentrum des Torus stehende Spule im Plasma »induziert« (siehe Abb. 4): Solange der Strom in dieser Spule hochgefahren wird, wird ein ansteigendes Magnetfeld erzeugt, was wiederum eine Spannung im Plasma hervorruft. Diese Spannung kann aber nur für eine begrenzte Zeit aufrecht erhalten werden – höchstens ein bis zwei Stunden. Da Grund-

lastkraftwerke jedoch kontinuierlich Strom erzeugen sollten, werden für den Stromtrieb im Plasma Alternativen – Stromtrieb mit Hilfe von Mikrowellenheizungen oder Teilcheninjektoren – untersucht oder aber Einschlußkonzepte wie der Stellarator weiterentwickelt (siehe unten), der keinen Plasmastrom benötigt.

4. Wo steht die Fusionsforschung? Was sind die nächsten Schritte?

Der Zustand eines heißen Plasmas und seine Nähe zur Zündung können durch das Produkt aus Plasmatemperatur, Plasmadichte und der sogenannten Energieeinschlußzeit charakterisiert werden. Die Energieeinschlußzeit ist dabei ein Maß für die Wärmeisolation des Plasmas. Zündung wird erreicht, wenn das Produkt der drei Größen einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Wie Abbildung 5 zeigt, wurde das Zündprodukt im Lauf der Forschung um fünf Größenordnungen gesteigert; bis zur Zündung fehlt nur noch ein Faktor 5 bis 6. Das Europäische Fusionsexperiment JET (*Joint European Torus*) in Culham in Großbritannien konnte bereits erhebliche Leistungen – rund 16 MW Fusionsleistung für eine Sekunde – erzeugen (KEILHACKER *and the JET Team* 1999) (Abb. 6). Während dieser Zeit wurde 65 % der aufgewandten externen Heizenergie durch Fusion zurückgewonnen, was einem Q-Wert von 0,65 entspricht. Der sogenannte "break-even"-Punkt mit $Q = 1$ wurde somit nahezu erreicht – ein großer Erfolg. Zugleich wurde auch das Prinzip der Selbstheizung des Plasmas durch die Heliumteilchen bewiesen.

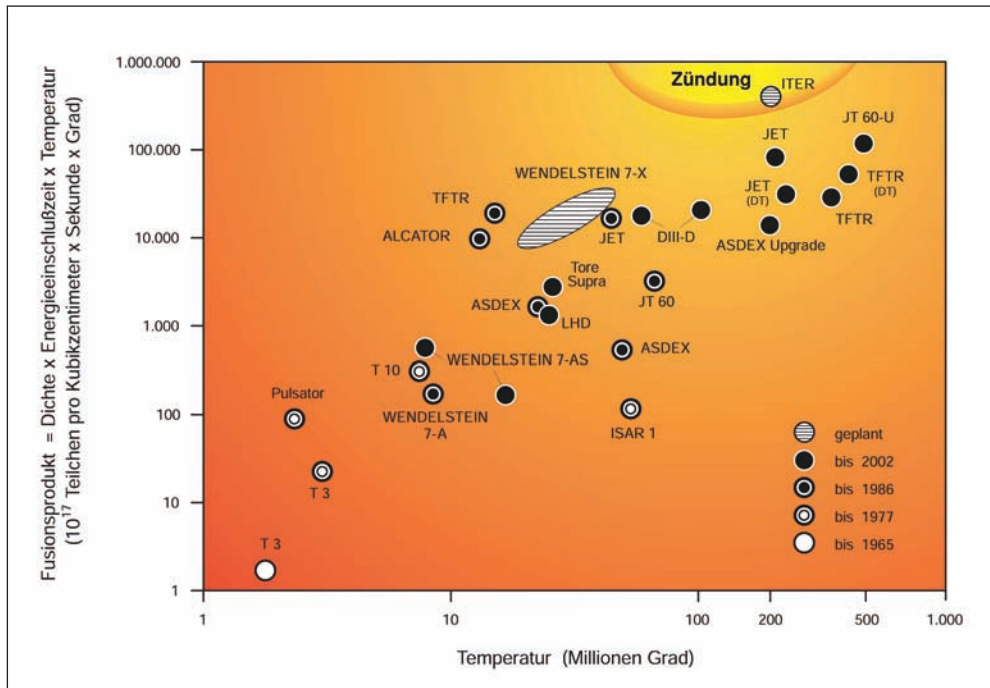


Abb. 5 Die Entwicklung des Fusionsproduktes aus Plasmatemperatur, Plasmadichte und Energieeinschlußzeit in den letzten drei Jahrzehnten

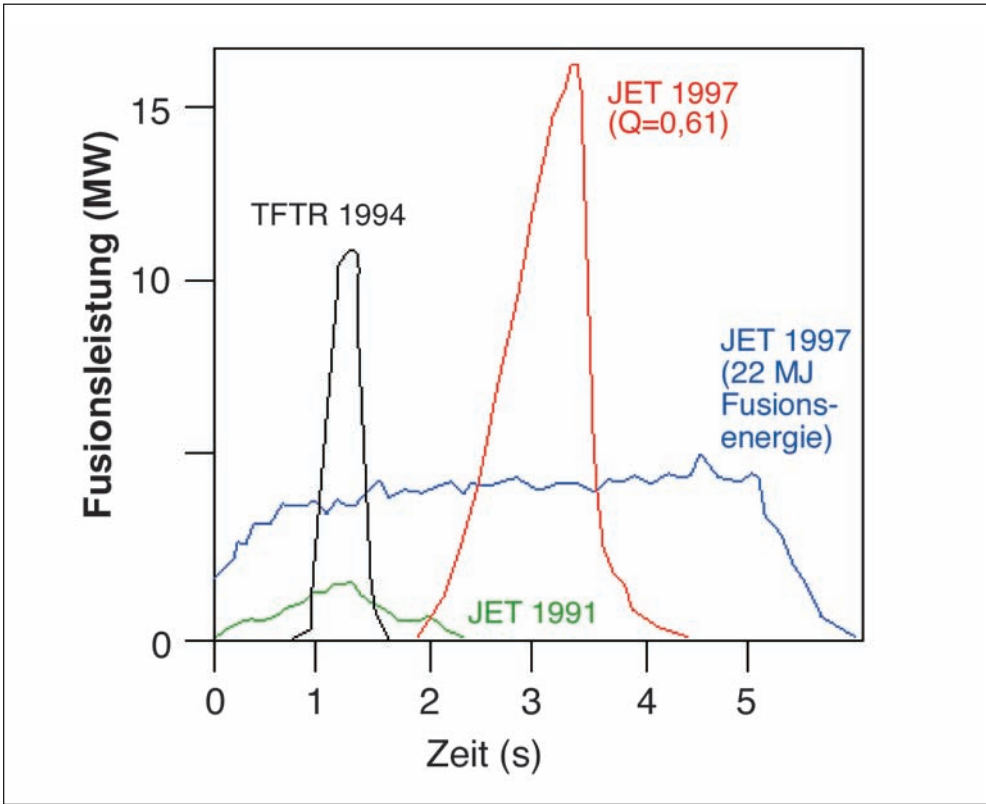


Abb. 6 Bei Experimenten im europäischen Gemeinschaftsexperiment JET in England mit Deuterium-Tritium-Plasmen konnten erhebliche Fusionsleistungen erzeugt werden.

Da die Wärmeisolation stark von den Dimensionen des Plasmas abhängt, besitzen größere Maschinen längere Energieeinschlußzeiten: Ein größeres Volumen kann den Plasmakern besser isolieren als ein kleines. Der nächste Schritt im internationalen Fusionsprogramm, der internationale Testreaktor ITER, ist deswegen als Großanlage geplant und soll die prinzipielle Machbarkeit der Fusion als Energiequelle unter Beweis stellen (Abb. 7) (ITER EDA 2001). ITER wird mit einem großen Plasmaradius von 6,5 m und einem kleinen Plasmaradius von 2,4 m linear etwa doppelt so groß sein wie JET mit 2,95 m für den großen und 1,25 m für den kleinen Plasmaradius. Der Testreaktor soll einen Q-Wert von mindestens 10 und Entladungsdauern von 500 s erreichen. Die Fortschritte in den letzten Jahren, z. B. bei den Bemühungen, die Abhängigkeit vom induktiven Stromtrieb zu reduzieren, lassen erwarten, daß ITER diese Planziele im Betrieb sogar übertreffen kann. 1994 wurde zudem ein Technologieprogramm gestartet, um die Schlüsseltechnologien von ITER zu untersuchen. In sieben Projekten wurden in internationaler Kooperation Prototypen für die wichtigsten ITER-Komponenten entwickelt, gebaut und getestet (Abb. 8). Dazu zählten zwei Magnet-Modelle, Divertorkassette, Blanketmodul, ein Teil des Plasmagefäßes und Fernhandierungsroboter zum Austausch der

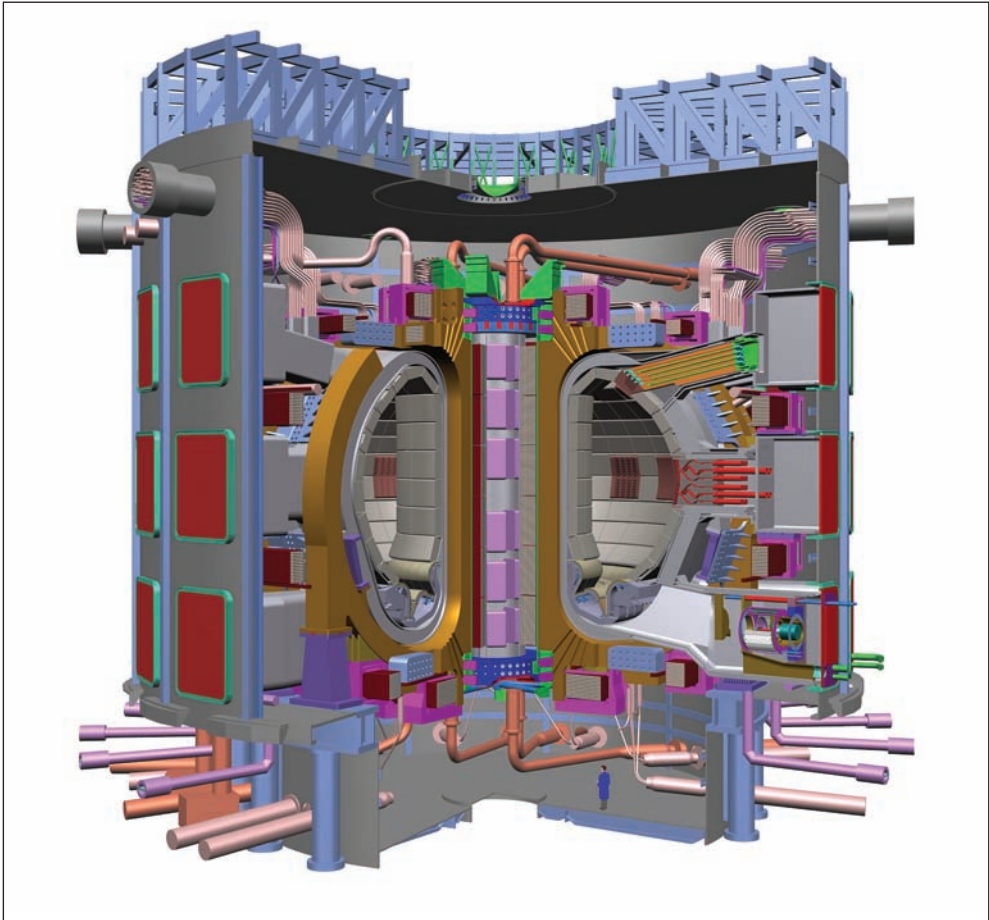


Abb. 7 Ein Computerbild des geplanten internationalen Testreaktors ITER (Grafik: ITER).

Divertor- und Blanket-Bauteile. Alle Aufgaben wurden erfolgreich abgeschlossen, wobei der Zentralmagnet die Erwartungen sogar übertroffen hat. Die entwickelten Module des Divertors – eine Komponente, welche die Wechselwirkung des heißen Plasmas mit den materiellen Wänden kontrolliert – konnten Wärmeflüssen von mehr als 10 MW/m^2 standhalten.

Parallel zu dem Betrieb von ITER ist die Erforschung und Entwicklung der Fusionstechnologie weiterzuführen, insbesondere im Bereich der Materialforschung: Materialien für Fusionskraftwerke müssen ihre mechanischen Eigenschaften auch unter der Bestrahlung mit intensiven Neutronenflüssen beibehalten; zudem darf das Material durch die Neutronenstrahlung möglichst nicht zu langlebigem radioaktivem Abfall umgewandelt werden. Eine Reihe von Materialien wurden bereits als Kandidaten für künftige Kraftwerke identifiziert. Sie konnten jedoch noch nicht vollständig experimentell qualifiziert werden, da eine Neutronenquelle fehlt, deren Neutronenfluß in Intensität und Spektrum der eines Fusionskraftwerks gleich-



Abb. 8 Darstellung zweier Sektoren des Prototypvakuumgefäßes für ITER, die bereits gefertigt und erfolgreich verschweißt wurden.

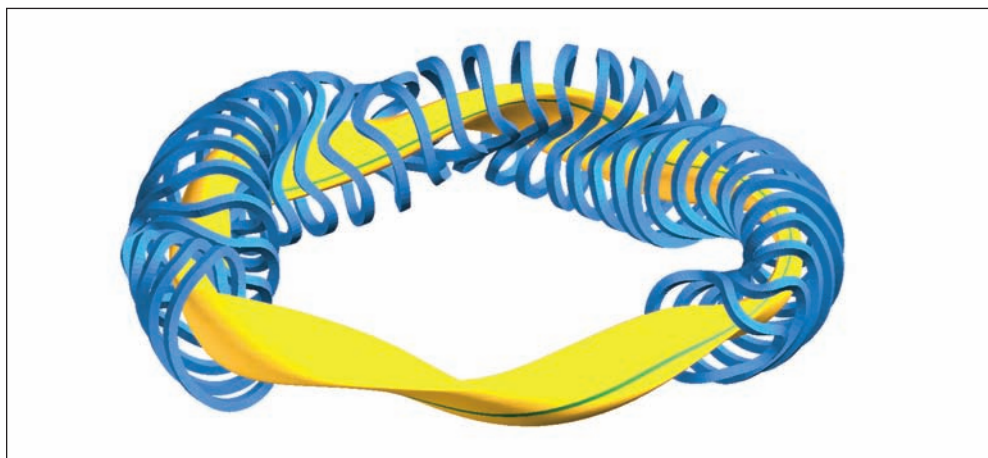


Abb. 9 Der Stellarator WENDELSTEIN 7-X wird zur Zeit in Greifswald, Deutschland, gebaut. Das magnetische Feld der supraleitenden, modularen Spulen wurde mit Hilfe numerischer Methoden optimiert.

kommt. Eine solche Neutronenquelle – die ‘International Fusion Material Irradiation Facility (IFMIF)’ – wurde inzwischen in internationaler Zusammenarbeit unter der Schirmherrschaft der IEA entworfen.

Zur Zeit laufen Verhandlungen zur Schaffung einer ITER-Organisation unter internationalem Recht. Zudem müssen die ITER-Partner China, Europa, Japan, Rußland, Südkorea und USA über den Bau von ITER in Cadarache in Frankreich oder in Rokkascho in Japan entscheiden.

Die Arbeiten mit ITER werden zusammen mit der Weiterentwicklung der Tokamakphysik und der Fusionstechnologie die Basis für ein erstes Demonstrationskraftwerk, DEMO, bereitstellen. Etwa fünf Jahre nach Betriebsbeginn von ITER kann mit dem detaillierten Entwurf von DEMO begonnen werden.

Eine Alternative dazu, das Problem des Stromtriebs im Tokamak ohne Induktion durch sogenannte *Advanced Scenarios* zu lösen, bietet eine andersartige Magnetfeldkonfiguration: Werden wie im Stellarator nur noch äußere Magnetfelder genutzt, ist kein Plasmastrom mehr nötig (WAGNER 1996). Zwei große Stellaratorprojekte werden zur Zeit verfolgt: Der japanische Stellarator LHD (*Large Helical Device*) hat 1998 seinen Betrieb aufgenommen; WENDELSTEIN 7-X in Deutschland wird voraussichtlich 2010 in Betrieb gehen (Abb. 9). Der kleinere Stellarator TJII wird seit einigen Jahren in Spanien betrieben.

Die ‘Roadmap’ (Abb. 10), der Weg hin zu einem kommerziellen Fusionskraftwerk, wird ein Physik- und ein Technologieprogramm umfassen. Für beide Fragestellungen werden zentral die in internationaler Zusammenarbeit betriebenen Großexperimente ITER und IFMIF sein.

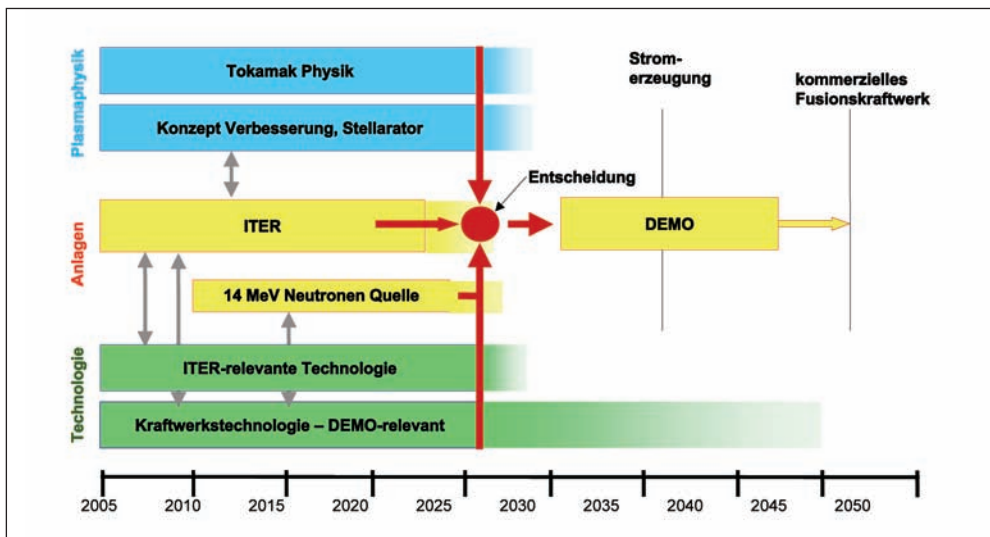


Abb. 10 Der geplante Weg (Roadmap) zu einem kommerziellen Fusionskraftwerk

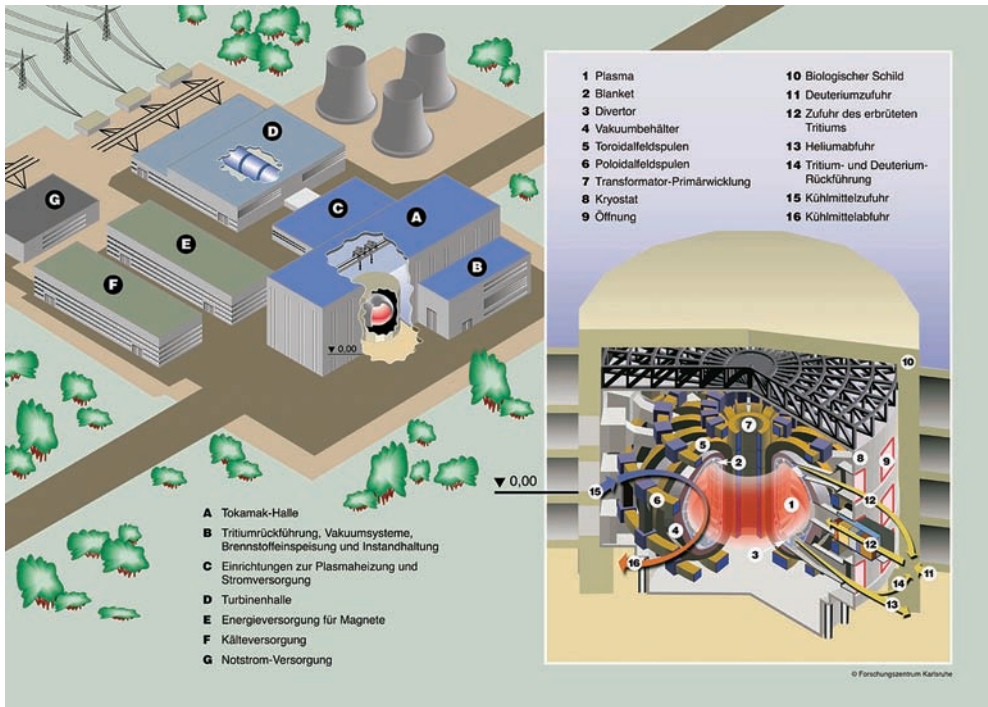


Abb. 11 Schematische Zeichnung eines künftigen Fusionskraftwerkes (Grafik: FZK)

5. Das Fusionskraftwerk

Die konventionellen Teile eines Fusionskraftwerkes wie Dampferzeuger, Turbine und Generator unterscheiden sich nicht wesentlich von ähnlichen Komponenten in Kohle- oder Kernkraftwerken (siehe Abb. 11). Der Kern eines Fusionskraftwerkes ist schalenförmig wie eine Zwiebel aufgebaut: Das Plasma im Zentrum ist umgeben von der ersten Wand, dem Blanket und dem Vakuumgefäß, auf das die Magnetfeldspulen aufgefädelt sind. Wegen der bei tiefen Temperaturen arbeitenden supraleitenden Magnete wird der gesamte Kern in einem Kryostaten eingeschlossen.

Der Brennstoff – Deuterium und Tritium – wird in Form gefrorener Kügelchen tief in das Plasma hineingeschossen. Die bei der Fusion entstehenden Neutronen verlassen das Plasma ungehindert und werden im sogenannten Blanket, der inneren Verkleidung der Gefäßwand, abgebremst. Dort geben sie ihre gesamte kinetische Energie in Form von Wärme ab. Im Blanket erzeugen die Neutronen zudem aus Lithium den Brennstoffbestandteil Tritium, das mit Hilfe eines Spülgases – voraussichtlich Helium – aus dem Blanket transportiert und dem Brennstoffkreislauf zugeführt wird. Die ‘Asche’ der Fusionsreaktion – das Helium – wird

durch den Divertor abgeführt. Da nur ein kleiner Teil des Brennstoffs verbrannt wird, befindet sich auch ein großer Anteil an Deuterium und Tritium im Abgas, das entsprechend recycelt wird. Die Wärme, die in Blanket und Divertor erzeugt wird, wird durch ein Kühlmittel – Helium oder Wasser – zum Dampferzeuger transportiert, um Strom zu erzeugen, der dann an das Netz abgegeben wird. Ausgenommen hiervon ist der kleine Anteil, den das Kraftwerk selbst verbraucht, hauptsächlich im Kryosystem zur Abkühlung von Helium, für die Magneten, den Stromtrieb und die Plasmaheizung.

6. Ist Fusion eine nachhaltige Energiequelle?

Bevor im folgenden insbesondere die Nachhaltigkeit der Fusion unter dem Aspekt der Umweltverträglichkeit betrachtet werden soll, sei angemerkt, daß Nachhaltigkeit auf drei Säulen ruht: Umweltverträglichkeit, Sozialverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit. Sollte es nicht gelingen, in den nächsten Jahrzehnten ausreichende Energiequellen zu erschließen, dann werden insbesondere die armen und schwachen Länder darunter leiden. Dies wäre sicherlich nicht nachhaltig. Auch eine Situation, in der die reichen Länder zunehmend mit allen politischen Mitteln um die verbleibenden Ressourcen streiten, kann nicht als nachhaltig angesehen werden.

Wie oben beschrieben, wird der Fusionsbrennstoff Tritium im Kraftwerk aus Lithium erbrütet. Die Lithium-Vorräte im Meerwasser und in der Erdkruste reichen für Millionen von Jahren aus; noch wesentlich länger ist die Reichweite der Deuterium-Vorräte im Wasser. Gelänge es, die Energieeinschlußzeit weiter zu verbessern und anstelle der Deuterium-Tritium-Reaktion die Verschmelzung von Deuterium mit Deuterium zu nutzen, dann würden die vorhandenen Brennstoffvorräte sogar für Jahrmilliarden ausreichen – länger als die verbleibende Lebensdauer der Sonne.

Der radioaktive Abfall in einem Fusionskraftwerk entsteht durch den Neutronenbeschuß der Gefäßwände. Detaillierte Untersuchungen von Menge und Zusammensetzung des Abfalls lassen ein schnelles Abnehmen der Radiotoxizität erwarten, nachdem das Kraftwerk abgeschaltet wurde (RAEDER et al. 1995, COOK et al. 2004). Nach etwa fünfhundert Jahren erreicht die Radiotoxizität des Fusionsabfalls Werte, die auch die gesamte Kohleasche eines Kohlekraftwerkes zeigt, mit dem die gleiche Menge an Strom erzeugt wurde. Die Abfälle aus Fusionskraftwerken stellen daher keine erhebliche Belastung für künftige Generationen dar; neueste Berechnungen zeigen, daß mit der Rezyklierung des Abfalls eine Endlagerung überflüssig wird. Ingegnen liegt die Radiotoxizität der Abfälle aus Kernspaltungskraftwerken um viele Größenordnungen höher und ändert sich innerhalb einiger hundert Jahre kaum (Abb. 12).

Insbesondere für ITER wurden mögliche Unfallszenarien detailliert analysiert. Obwohl ITER noch nicht in voller Hinsicht mit einem späteren Kraftwerk verglichen werden kann, sind dennoch viele Eigenschaften ähnlich. Verschiedenste Methoden wurden angewandt, um eine weitgehend vollständige Liste der Unfallsequenzen zu erstellen (RAEDER et al. 1995, COOK et al. 2004). Reaktivitätsexkursionen sind aus verschiedenen Gründen in einem Fusionskraftwerk nicht denkbar. Die schwerwiegendsten Unfälle – Stromausfälle oder Brüche von Leitungen – hängen mit einem Versagen des Kühlsystems zusammen. Dann würden jedoch von den Wänden verdampfte Verunreinigungen sofort das Energiegleichgewicht des

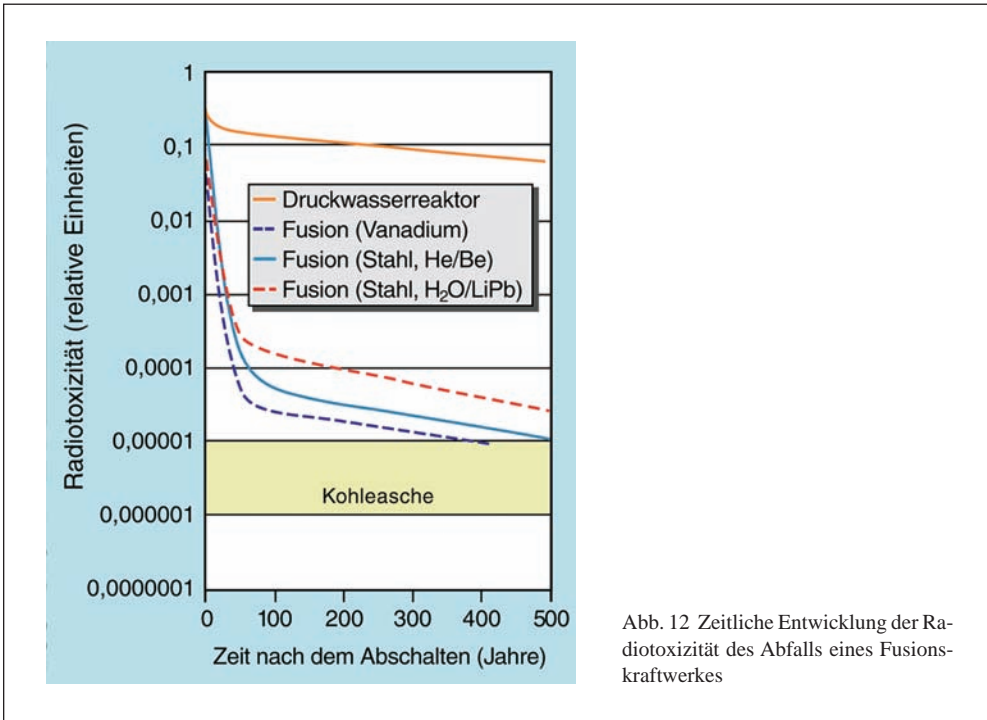


Abb. 12 Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität des Abfalls eines Fusionskraftwerkes

Plasmas stören: Die Verunreinigungen würden vermehrt Energie aus dem Plasma abstrahlen – die Plasmareaktionen würden erlöschen. Auch die Temperaturen der Strukturmaterialien blieben deutlich unter dem Schmelzpunkt, so daß alle Barrieren intakt blieben. Selbst bei komplettem Ausfall der Kühlung würden nur kleine Mengen an Tritium aus dem Kraftwerk entweichen können. Die Dosis für die Bevölkerung würde den Wert von 1 mSv nicht überschreiten. Als schlimmstes Szenario wurde die Freisetzung des gesamten Tritiuminventars von etwa einem Kilogramm unterstellt – dies ist etwa die Größenordnung an Tritium, die insgesamt in einem späteren Fusionskraftwerk vorliegen wird, ein Unfall, der ausschließlich durch eine externe Ursache hervorgerufen werden könnte. Aber selbst bei ungünstigsten Wetterbedingungen müßte dann nur ein kleines Gebiet, etwa in der Ausdehnung des Kraftwerksgeländes, evakuiert werden.

Erste Abschätzung darüber liegen vor, ob die Fusion erfolgreich mit anderen Energiequellen in Wettbewerb treten können wird: Für ein Kraftwerk setzen sich die Kosten zusammen aus den Kapitalkosten für den Fusionskern (39 %), für den konventionellen Teil des Kraftwerkes (23 %), für den Ersatz von Divertor- und Blanketmodulen während des Betriebes (30 %), den Brennstoff, für Betrieb und Wartung sowie für den Abbau der Anlage (zusammen 8 %). Für die Berechnungen der Stromkosten werden eine elektrische Leistung von einem GW, eine jährliche Verfügbarkeit der Anlage von 75 % bei 30 Jahren Vollastbetrieb und ein inflationsbereinigter Zinssatz von 5 % angenommen. Ebenso werden sich im Laufe der Zeit einstellende Lerneffekte genutzt, die einen Zusammenhang zwischen Kostenreduktionen und installierter Kapazität herstellen. Weitere Kostensenkungen können durch den Bau grö-

berer Kraftwerke oder den Bau von zwei Kraftwerken an einem Standort erreicht werden. Das Ergebnis: Wenn die Fusion im Jahr 2100 eine etablierte Technologie ist, dann werden Kosten von 7 bis 10 Eurocent/kWh erwartet – Kosten, die zwar etwas höher liegen als die Stromkosten heutiger konventioneller Kohle- und Kernkraftwerke, aber dennoch gut mit ihnen vergleichbar sind.

Detaillierte Untersuchungen mit Energiewirtschaftsmodellen haben ergeben, daß die Fusion sehr wohl in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts Eingang in die Energiewirtschaft finden kann. Die Untersuchungen zeigen insbesondere, daß erneuerbare Energietechniken wie Wind und Sonne nicht als Konkurrenten, sondern eher als komplementäre Ergänzung zur Fusion anzusehen sind (Abb. 13).

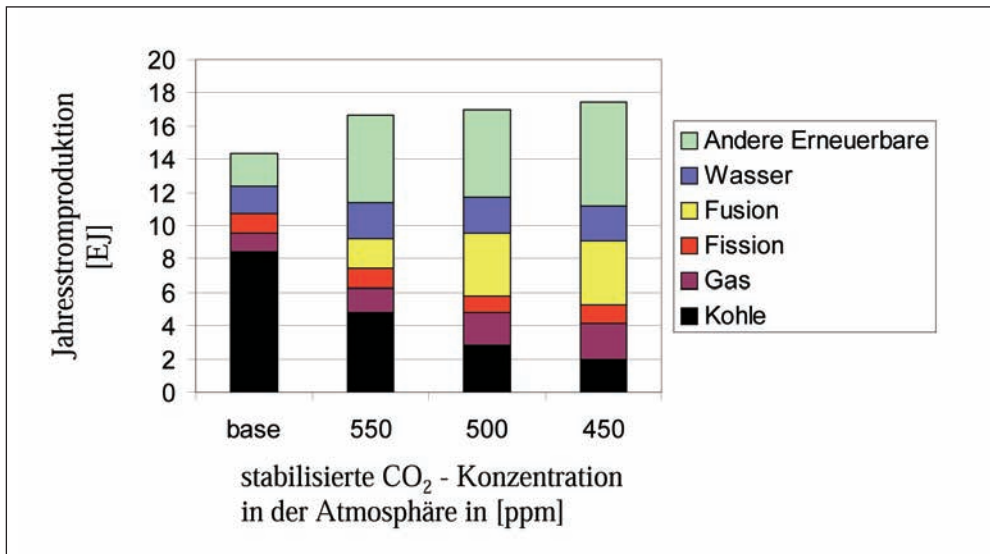


Abb. 13 Ergebnisse der detaillierten Untersuchungen über die Entwicklung des Europäischen Strommarktes für das Jahr 2100 aus LAKO et al. Sollte sich Europa weiterhin verpflichten, die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren, dann kann Fusion einen erheblichen Anteil an der Stromerzeugung abdecken.

In Anbetracht der drohenden Energiekrise ist es erstaunlich, daß die Finanzierung der Fusionsforschung unter einem ständigen Angriff grüner Politiker steht. Dahinter steht die Überzeugung, daß im Jahr 2050 die gesamte europäische Energieversorgung von erneuerbaren Energieträgern gedeckt werden könne, was die Fusionsforschung überflüssig mache. Die Beweisführung basiert dabei meist auf Energieszenarien, die dieses Wunschergebnis produzieren. Dabei wird fast immer übersehen, daß die Ergebnisse der von Computermodellen erzeugten Energieszenarien stark von den angenommenen Randbedingungen und den gewählten Eingabedaten abhängen. Darüber hinaus unterstellen die meisten dieser Szenarien einen radikalen Wandel im Umgang der Bevölkerung mit Energie. Es gibt jedoch kaum Hinweise darauf, daß die Bevölkerung Westeuropas oder der USA bereit wäre, Einschränkungen des Lebensstandards hinzunehmen, wie sie von diesen Szenarien vorausgesetzt werden.

Unsere Gesellschaft muß sich aller mit dem Energieproblem verbundenen Fragen annehmen. Dabei glauben die Autoren, daß insbesondere Physiker und Ingenieure eine besondere Verantwortung tragen, die Option »Fusion« bis zu dem Punkt zu entwickeln, daß künftige Generationen eine auf ökonomischen, sozialen oder anderen dann wichtigen Faktoren basierende Entscheidung fällen können. Die Kosten für fossile Brennstoffe werden dabei eine wichtige Rolle spielen, vielleicht wird aber auch der Wunsch nach einer nachhaltigen Entwicklung ein bedeutender Faktor sein.

Literatur

- ARTSIMOVICH, L. A.: Tokamak devices. *Nuclear Fusion* 12, 215–252 (1972)
- Brundtland-Bericht*: World Commission on Environment and Development (Chairman: Gro Harlem BRUNDTLAND): Our Common Future. Oxford u. a.: Oxford University Press 1987
- COOK, I., et al.: The Safety and Environmental Impact of Commercial Fusion Power Stations (SEIF), European Commission DG Research, Brussels, to be published (2004)
- Final Report of the ITER engineering Design Activity (EDA), ITER EDA Documentation Series No. 21, International Atomic Energy Agency, Vienna (2001)
- HUND, F.: Die physikalischen Grundlagen unseres Daseins. Unveröffentlichter Essay. Göttingen (1975)
- KEILHACKER, M., and *the JET Team*: High fusion performance from deuterium-tritium plasmas in JET. *Nuclear Fusion* 39, 209 (1999)
- LAKO, P., YBEMA, J. R., SEEBREGTS, A. J., GILLI, P. V., KURZ, R., KOLB, G., MORTHORST, P. E., LEMMING, J., VILLENEUVE, B.: Long term scenarios and the role of fusion power. Synopsis of SEO studies, conclusions and recommendations. ECN-C-98-095
- NAKICENOVIC, N., ALCAMO, J., DAVIS, G., VRIES, B. DE, FENHANN, J., GAFFIN, S., GREGORY, K., GRÜBLER, A., et al.: Special Report on Emission Scenarios. IPCC, CUP. Cambridge (UK): Cambridge University Press 2001
- NAKICENOVIC, N., GRÜBLER, A., and McDONALD, A.: Global Energy Perspectives, IIASA, CUP. Cambridge: Cambridge University Press 1998
- RAEDER, J., COOK, I., MORGENSTERN, F. H., SALPIETRO, E., BÜNDE, R., and EBERT, E.: Safety and Environmental Assessment of Fusion Power (SEAFP). Brussels: European Commission DG XII 1995
- WAGNER, F.: Stellarators and optimized stellarators. *Trans. Fusion Technology* 29, 407–422 (1996)
- WESSON, J.: Tokamaks. Oxford: Clarendon Press 1997
- WILHELMSSON, H.: Fusion: A Voyage through the Plasma Universe. IOPP. Bristol: Institute of Physics Publ. 2000

Prof. Dr. Alexander BRADSHAW
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
Boltzmannstraße 2
85748 Garching
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 89 32991342
Fax: +49 89 32991001
E-Mail: Alex.Bradshaw@ipp.mpg.de

Erneuerbare Energien – energetisch ganzheitlich betrachtet

Hermann-Josef WAGNER (Bochum)

Mit 5 Abbildungen und 4 Tabellen



Zusammenfassung

Der sparsame Umgang mit Energie und der Ausbau erneuerbarer Energien sind wegen der Ressourcenknappheit und der Notwendigkeit, Luftschadstoffe und Klimagase zu vermindern, notwendig. Bei den erneuerbaren Energien wie Wind- und Sonnenenergie stellt sich die Frage, in welchem Verhältnis die erzeugte Energie zu der Energiemenge steht, die für die Herstellung der Anlagen benötigt wird. Um diesen Aufwand an Energie zu bestimmen, ist es notwendig, den gesamten Produktionsprozeß energetisch zu erfassen. Diese Betrachtungsweise nennt man Lebenszyklusanalyse oder ganzheitliche Betrachtung. Sie betrachtet den gesamten Weg einer Energietechnik, von der Herstellung des Materials für die Anlagen, über den Anlagenbau und die Nutzungsphase bis zum Abbau der Anlage und dem Recycling des eingesetzten Materials am Ende der Lebensdauer. Dabei werden alle relevanten Energie- und Emissionsströme, die in und aus der Anlage herausfließen, berücksichtigt.

Die Erläuterung dieser Vorgehensweise ist Gegenstand des Vortrages. Es werden Solaranlagen zur Warmwasserbereitung, Windenergieanlagen und Niedrigenergiehäuser behandelt. Dabei wird die Frage beantwortet, ob diese Anlagen unter dem Strich fossile Energieträger einsparen und damit auch CO₂-Emissionen vermeiden, wenn der nicht unerhebliche energetische Aufwand zu ihrer Produktion berücksichtigt wird.

Abstract

The rational use of energy and the market introduction of renewable energy technologies have advantages in respect to reduce greenhouse gases and air pollutants.

However, there is the question of balance of energy between the substituted fossil energy by using renewable energies and the need of energy for the manufacturing of the material intensive renewable energy technologies. Do make this balances it is necessary to analyze all steps of the manufacturing process, beginning from the raw material production to the assembling of components until the demolition of the equipment at the end of their technical lifetime. This procedure – from cradle to the grave – is part of Life Cycle Analysis. The method will also be helpful by setting up eco-balances. The following article describes the methodological approaches for energy balances and the results of studies of thermal solar collectors, wind energy converters, and low energy houses.

1. Kategorien der Nachhaltigkeit

Nachhaltige Entwicklung (*sustainable development*) ist zunehmend zum umfassenden Leitbild der internationalen umwelt-, wirtschafts- und entwicklungspolitischen Debatte geworden. Nachhaltige Entwicklung ist aber wohl ein stetiger Such- und Lernprozeß, der allen drei Dimensionen des Leitbildes

- Wirtschaftlichkeit,
- Umweltschutz,
- Soziale Verantwortung

genügen muß und die Bereitschaft zum Erkennen von Irrtümern und Irrwegen voraussetzt.

Der Begriff der Nachhaltigkeit wird ebenso vielfältig wie verwirrend interpretiert. Das Deutsche Nationale Komitee des Weltenergie Rates (DNK) läßt sich bei seiner Interpretation von der ursprünglichen Definition leiten, wie sie im Brundtland-Report von 1987 in *Our Common Future* gegeben wurde. Sie beschreibt Nachhaltigkeit als den Versuch, die Bedürfnisse der Gegenwart zu erfüllen, ohne die Möglichkeiten für zukünftige Generationen einzuschränken. Es beinhaltet zwei Schlüsselkonzepte: die Definition der »Grundbedürfnisse«, insbesondere der Dritten Welt, und der »Beschränkung«, die sich aus dem Stand der Technik und der Anpassungsfähigkeit der Gesellschaft ergibt.

Obwohl die Brundtland-Kommission sich sehr bemühte, den Begriff zu definieren, liegt doch das eigentlich Ansprechende erst in seiner vagen Aussage. Es sind zum einen vielzählige Interpretationen zur Unterstützung unterschiedlichster rivalisierender Interessen möglich, zum anderen ist der Begriff wieder so umfassend definiert, daß aus ihm »auf Arbeitsebene« nicht ohne weiteres direkt die Punkte abgeleitet werden können, die zur Bewertung der Technik untersucht werden müssen. Auch eine eindeutige Rangfolge der teilweise konkurrierenden Bewertungskriterien untereinander wird nicht gegeben.

2. Ganzheitliche Betrachtungen

Relativ gut quantifizierbare Bewertungskriterien der Nachhaltigkeit sind

- Materialverbrauch,
- Primärenergiebedarf,
- Emissionen,
- Flächenverbrauch und
- ökonomische Aspekte.

Aspekte wie Kosten, Emissionen, Materialaufwand und kumulierter Energieaufwand (KEA) können am besten über Prozeßkettenanalysen im Rahmen von Lebenszyklusanalysen ermittelt werden. Hierbei wird ein komplexer Produktionsprozeß sukzessiv in eine Vielzahl von Prozeßschritten zerlegt und das Produkt oder die Dienstleistung ganzheitlich über Herstellung, Nutzung und Entsorgung betrachtet (Abb. 1).

Eine ganze Reihe von Untersuchungen liegt hierzu vor, aus denen einige Beispiele erläutert werden sollen.

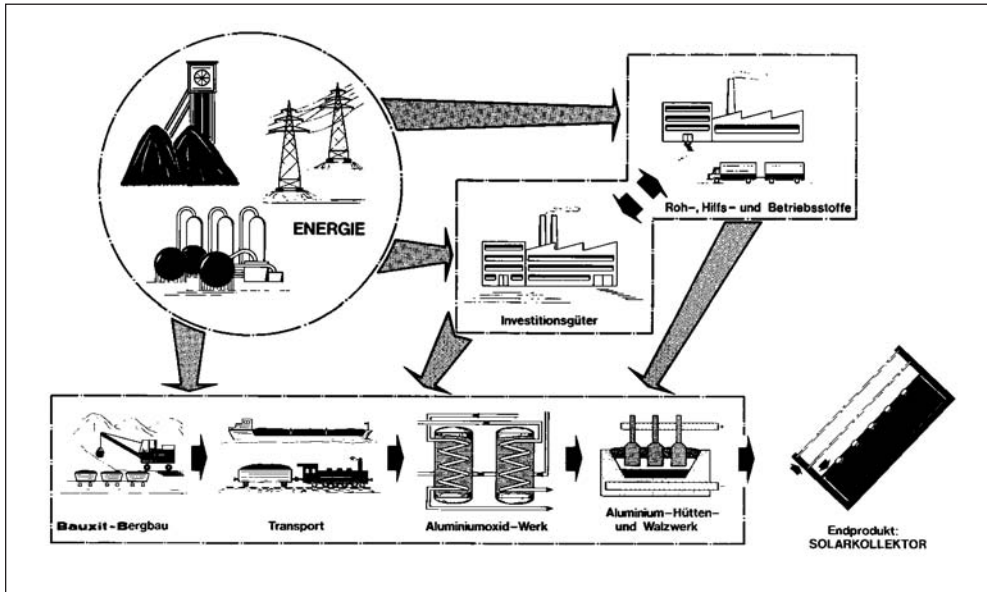


Abb. 1 Beispiel eines Teils einer Prozesskettenanalyse: Bilanzierung der kumulierten Energieaufwendungen für die Aluminiumbauteile eines solarthermischen Kollektors.

Eine wissenschaftliche Behandlung zahlreicher Aspekte der Nachhaltigkeit muß berücksichtigen, daß eine objektive Beurteilung nicht möglich ist, da jede Bewertung eine Verknüpfung von Sachinformationen und subjektiven Werturteilen darstellt. Werturteile sind aber keine feststehenden Größen, sie differieren je nach der persönlichen Einstellung oder gesellschaftlichen Gruppen, und sie sind darüber hinaus zeit- und situationsabhängig.

Die subjektiven Werturteile unterliegen daher einer ständigen und oft auch sprunghaften Veränderung. Eine vergleichende Bewertung vieler Aspekte im Hinblick auf Nachhaltigkeit wird deshalb außerordentlich problematisch. Dies um so mehr, als Wirkungsfaktoren von Schadstoffen keineswegs eindeutig erkannt und Gegenstand erheblicher Diskussionen sind. Der quantifizierte Vergleich zweier Schadstoffe entzieht sich einer objektiven Bewertung.

Vergleich von Energiesystemen hinsichtlich des Kriteriums Nachhaltigkeit basieren auf dem sparsamen und möglichst rationellen Umgang mit Energie und Rohstoffen.

Der wichtigste Indikator hierfür ist der sogenannte »kumulierte Energieaufwand«.

3. Energetische Bilanzierungsmethoden

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß prinzipiell zur Bilanzierung der kumulierten Energieaufwendungen (KEA_H) und der Schad- und Klimagasemissionen aus der Herstellung von Produkten drei Methoden herangezogen werden können, die sich jedoch in ihrem Aufwand und der erzielbaren Abbildungsdifferenzierung stark unterscheiden.

3.1 Energetische Input-/Output-Analyse

Bei dieser Methode werden die kumulierten Energieaufwendungen für ein Produkt über die Multiplikation der Energieintensitäten (auf den Geldwert bezogene Energieaufwendungen) der verschiedenen Wirtschaftssektoren mit den Ab-Werk-Preisen der Produkte ermittelt. Dabei werden, gestützt auf nationale volkswirtschaftliche Daten, auch die zwischen den Sektoren gehandelten Energie- und Vorproduktströme berücksichtigt. Diese Daten werden vom statistischen Bundesamt zu sogenannten Input/Output-Tabellen zusammengestellt.

Der Vorteil liegt hier in der Einfachheit des Verfahrens, welches eine schnelle Übersichtsrechnung der KEA_H ohne Kenntnis produkt- bzw. herstellungsspezifischer Größen zuläßt, wenn das betrachtete Produkt für den Wirtschaftssektor einigermaßen repräsentativ ist. Auch Emissionen lassen sich über diese Methode grob abschätzen. Jedoch ist ein Vergleich von verschiedenen Produkten innerhalb eines Wirtschaftssektors nur begrenzt möglich, da lediglich über den Sektor gemittelte Rechengrößen zur Verfügung stehen.

3.2 Prozeßkettenanalyse (PKA)

Die Untersuchung der Prozeßketten beinhaltet die Zurückverfolgung und primärenergetische Bewertung aller in das Produkt einfließenden Fertigungs-, Hilfs- und Betriebsstoffe über die verschiedenen Produktionsebenen bis hin zur Rohstoffgewinnung.

Durch diese spezifische Betrachtung des Produktes und die weit gezogenen Systemgrenzen stellt die Prozeßkettenanalyse die genaueste Bewertungsmethode hinsichtlich der KEA_H sowie auch der Emissionen dar. Ein praktisches Hindernis für die Anwendung ist jedoch der mit dem Verfahren verbundene Aufwand und die Tatsache, daß neben der Auswertung vorhandener Daten auch vielfach Messungen der Prozeßenergien vor Ort und während der Produktion durchgeführt werden müssen.

Häufig hilft man sich mit einer Vereinfachung der PKA, bei der die Bilanzierung der Materialmassen im Vordergrund steht. Diese soll im Folgenden »Materialbilanzen-Methode« genannt werden.

3.3 Materialbilanzen-Methode

Diese Methode ist aufgrund ihrer Einfachheit und ihrer schnellen Durchführbarkeit in erster Linie für die praktische Anwendung interessant. Sie stellt deshalb die am weitesten verbreitete Methode dar. Die Massen der in das Produkt einfließenden Materialien werden mit den massenspezifischen Materialdaten ($kea_{Material}$, spez. Emissionen $e_{i,Material}$; vgl. Tab. 1) aus im Vorfeld durchgeführten Prozeßkettenanalysen multipliziert. Als Ergebnis erhält man die kumulierten Energieaufwendungen aus der Herstellung mit

$$KEA_H = \sum_{Material} [kea_{Material} \cdot m_{Material} \cdot F_{Fertigung}] \cdot F_{Montage} \quad [1]$$

und, sofern die entsprechenden materialspezifischen Emissionsdaten zur Verfügung stehen, auch die Schad- und Klimagasemissionen

$$E_{i,H} = \sum_{Material} [e_{i,Material} \cdot m_{Material} \cdot F_{Fertigung}] \cdot F_{Montage} \quad [2]$$

Tab. 1 Größen bei der Berechnung der kumulierten Energieaufwendungen

| | | |
|-------------------|--|---------|
| KEA_H | = kumulierter Energieaufwand zur Herstellung des Produkts | [MJ] |
| $E_{i, H}$ | = kumulierte Emission des Stoffes i aus der Herstellung des Produkts | [g] |
| $kea_{Material}$ | = spezifischer Energieaufwand aus der Herstellung eines kg eines bestimmten Materials | [MJ/kg] |
| $e_{i, Material}$ | = spezifische Emission des Stoffes i aus der Herstellung eines Kilogramms eines bestimmten Materials | [g/kg] |
| $m_{Material}$ | = im Produkt enthaltene Masse eines Materials | [kg] |
| $F_{Fertigung}$ | = gegebenenfalls Faktor für Bauteilfertigung | [-] |
| $F_{Montage}$ | = gegebenenfalls Faktor für Montageaufwendungen | [-] |

Abgesehen von der Belastbarkeit der vorliegenden Daten ist bei diesem Verfahren die systematische Berücksichtigung der Energieaufwendungen (und Emissionen) für die einzelnen Prozessschritte der Weiterverarbeitung von Grundstoffen bzw. Halbzeugen zum Zielprodukt wichtig, denn meist beziehen sich die in der Literatur angegebenen Werte nur auf Grundstoffe bzw. Halbzeuge. Diese Zuschläge können bei einfachen Produkten abgeschätzt und als Zuschlagsfaktoren ($F_{Fertigung}$, $F_{Montage}$), auf die KEA_H der Materialien aufgeschlagen werden. Bei aufwendigeren Produkten, wie z. B. aus den Bereichen Feinmechanik, Mikroelektronik oder ähnliches, muß eine spezifische Betrachtung der Prozeßenergien herangezogen werden, da diese ein Vielfaches der materialbedingten Energieaufwendungen ausmachen können (HERFURTH 1983). Das heißt, in diesen Fällen ist eine detailliertere Analyse der Prozeßketten erforderlich.

Für die Vergleichbarkeit von Sachbilanzen für die Ökobilanzierung auf der Basis von sowohl Prozeßkettenanalysen als auch der vereinfachten Form, der Materialbilanzen-Methode, ist nicht nur die Verwendung des gleichen Stammdatensatzes für Materialien und Energieträger, sondern auch eine einheitliche Definition der Grenzen des Untersuchungsraumes erforderlich. Vor diesem Hintergrund wurde die VDI-Richtlinie »Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden« (VDI-Richtlinie 1997) erstellt.

Ein Kernelement der Richtlinie ist die Festlegung der Grenzen des Bilanzraumes.

Die ausdrückliche Nichtberücksichtigung von menschlicher Arbeit, metabolischer Energie aus den Lebensmitteln und Umweltenergien wie natürlicher Beleuchtung und Beheizung reduziert den Umfang des Bilanzraumes, ohne einen systematischen Fehler zu verursachen. Für die praktische Anwendung soll noch einmal betont werden, daß der Heizwert in den KEA berücksichtigt wird.

4. Methodische Probleme und Vereinbarungen

Auch eine Richtlinie kann die heutigen Bewertungsprobleme nicht allgemeingültig beantworten, zumal die Fragestellungen sehr heterogen sind. Einige Beispiele aus der Richtlinie sollen dies verdeutlichen.

4.1 Recycling-Material

Üblicherweise werden rezyklierbare Reststoffe für den ersten Lebenszyklus oder Bilanzraum als energiefrei (mit Ausnahme des Heizwertes) bewertet. Die Berücksichtigung des »stoff-

lichen Energieinhalts« aus der Herstellung des Primärmaterials erfolgt in dem Moment, in dem das Rücklauf-Material in die Herstellung von Sekundärrohstoffen, also in den zweiten Bilanzraum, einfließt, denn hier wird sein Energieinhalt aus der Vorgeschichte (mit Ausnahme des Heizwertes) ebenfalls zu null angenommen. Dies reduziert den KEA_H des Sekundärrohstoffes auf den Aufwand zum Sammeln, Aufbereiten und Einschmelzen des Altmaterials und dessen Heizwert.

Als alternative Methode wird die Wertung des Sekundärrohstoffes als Energieeintrag in den neuen Bilanzraum bei gleichzeitiger Gutschrift dieses Energiebetrages für den alten Bilanzraum in Betracht gezogen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, die zeitliche Entwicklung von Recycling-Quoten zu berücksichtigen, ist aber ungleich aufwendiger.

4.2 Koppelproduktion

Entstehen bei einem Herstellungsprozeß mehrere Produkte, stellt sich die Frage nach der Allokation der Energieaufwendungen und Emissionen. Die Richtlinie schreibt hier lediglich eine korrekte Ausführung der Gesamtenergiemengenbilanz und der Stoffmengenbilanz vor. Das Zuordnungsverfahren soll auf den jeweiligen Prozeß abgestimmt werden und kann die gesamten Energieverbräuche/Emissionen dem Zielprodukt zurechnen oder diese nach physischen, energetischen oder wirtschaftlichen Kriterien auf alle Ziel- und Koppelprodukte aufteilen.

4.3 Standortunterschiede beim Strommix

Eine weitere Schwierigkeit stellt die primärenergetische Bewertung von elektrischen Energiebedarfen in Produktionsprozessen dar, insofern es hier große Standortunterschiede gibt. Bei der kanadischen Aluminiumproduktion wird z. B. größtenteils Strom aus den dortigen Wasserkraftwerken eingesetzt. Dieser wird mit dem Bereitstellungsfaktor 1 auf Primärenergie umgerechnet und nicht wie bei Wärmekraftwerken mit einem Bereitstellungsfaktor um 3 (je nach Standort). Damit ergibt sich für den spezifischen KEA von kanadischem Aluminium ein um mehr als die Hälfte kleinerer Wert als für Aluminium, welches an Standorten mit überwiegend fossiler Stromerzeugung produziert wurde. Um den durchschnittlichen spezifischen KEA_H für in Deutschland bezogenes Aluminium ermitteln zu können, müssen demnach neben der Importstatistik für dieses Material auch die Strom-Bereitstellungsfaktoren in den Bezugsländern bekannt sein.

Tab. 2 Anhaltswerte für die spezifischen kumulierten Energieaufwendungen und CO₂-Emissionen von einigen ausgewählten Materialien (WAGNER und WENZEL 1997).

| Material | KEA (MJ/kg) | CO ₂ (g/kg) | Jahr der ersten Veröffentlichung |
|--|----------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Metalle | | | |
| Aluminium (primär, Deutschland-Mittelwert) | 239 | 14300 | 1991 |
| Aluminium (sekundär, Deutschland-Mittelwert) | 9,7 | 650 | 1991 |
| elektrolytisch verzinktes Blech | 22,9 | 1900 | 1994 |
| Kupfer (primär, nach Raffination) | 41,8 | 4820 | 1995 |
| Kupfer (sekundär, nach Raffination) | 20,55 | 1960 | 1995 |
| Stahlguß | 61,7 | 3580 | 1996 |
| Zink | 77 | 4650 | 1994 |
| Baustoffe | | | |
| Beton B25 | 1,53 | 174 | 1996 |
| Flachglas | 15,0 | 894 | 1991 |
| Kalksandstein | 0,73 | 110 | 1996 |
| Mineralfaser | 12,4 | 983 | 1991 |
| Portlandzement | 4,95 | 897 | 1996 |
| Chemische Grundstoffe | | | |
| Ammoniak | 33,7 | 1223 | 1985 |
| Ethylen (Mittelwert europäische Cracker) | 69,5 | 530 | 1993 |
| H ₂ SO ₄ | 4,3 | 249 | 1979 |
| Propylen | 69,5 | 1000 | 1993 |
| Kunststoffe | | | |
| Expandiertes Polystyrol, EPS | 96,2 | 1800 | 1993 |
| Keramik | 41,77 | 2353 | 1992 |
| Plexiglas (PMMA) | 91,0 | k. A. | 1980 |
| Polybutadien | 84,5 | 1300 | 1993 |
| PET | 83,81 | 2330 | 1995 |
| Polystyrol, General Purpose; GPPS | 101,4 | 1600 | 1993 |
| Halbzeuge, Zwischenprodukte | | | |
| Kupfer, Draht, 0,06 mm, blank (nur primär) | 59,6 | 3991 | 1995 |
| Kupfer, Rohr, Ø 15×1 mm (SP, nur primär) | 54,8 | 3751 | 1995 |

5. Ergebnisse

5.1 Beispiel: Solare Warmwassererwärmung

An einem Beispiel soll die Vorgehensweise bei der Erstellung einer Energiebilanz für eine solare Warmwasserbereitungsanlage verdeutlicht werden. Die Anlage kann etwa die Hälfte des jährlichen Warmwasserbedarfs eines Haushaltes decken. Es werden unterschiedliche Bauformen auf dem Markt angeboten. Sie unterscheiden sich von den verwendeten Baumaterialien, aber auch von den verwendeten Kollektortypen her. Um diesen Einfluß zu erfassen, werden drei Anlagentypen betrachtet:

- Bei der ersten Anlage handelt es sich um eine Anlage, die mit sogenannten Vakuumröhrenkollektoren arbeitet,
- die beiden anderen Anlagen sind mit Flachkollektoren mit unterschiedlicher Materialzusammensetzung ausgestattet: zum einen mit Kunststoffgehäuse und zum anderen mit Aluminiumgehäuse.

Die im Kollektor erzeugte Wärme wird in einem 400 l-Warmwasserspeicher gespeichert, der konventionell nachbeheizt werden kann. Pumpe und weitere Hilfseinrichtungen sind in einer sogenannten Kompaktstation, die unmittelbar am Speicher installiert ist, zusammengefaßt. Die Kollektorfläche auf dem Dach beträgt je nach Bauform etwa 5–6 m².



Abb. 2 Solare Kollektoranlage zur Erwärmung von Warmwasser. Eine Kollektoranlage zur Warmwassererwärmung ersetzt jährlich bis zu 400 l bzw. 400 m³ an Heizöl oder Erdgas. Sie spart des weiteren 100 bzw. 600 kg jährlich Kohlendioxid ein. Ihre Herstellung und Montage verursacht dagegen einen Energieverbrauch entsprechend 360 l Heizöl und einen Kohlendioxidausstoß bis zu 700 kg.

Die Grenzen bei der Betrachtung müssen so gezogen werden, daß eine Gutschrift in die spätere Rechnung eingebracht wird, die die Energieaufwendungen für den Bau eines 130 l-Warmwasserbehälters berücksichtigt, der ansonsten anstelle der Solaranlage hätte installiert werden müssen. Um ein Zahlengerüst für den erforderlichen Materialaufwand zu erhalten, wurden in der Praxis ausgeführte Anlagen ausgewertet. Zählt man alle Materialien zusammen, so ergibt sich eine Gesamtmasse von rund 200 kg.

Aus vorhergehenden Untersuchungen und Literaturanalysen liegen die spezifischen Primärenergieaufwendungen zur Herstellung der unterschiedlichen Werkstoffe vor. Mit ihrer

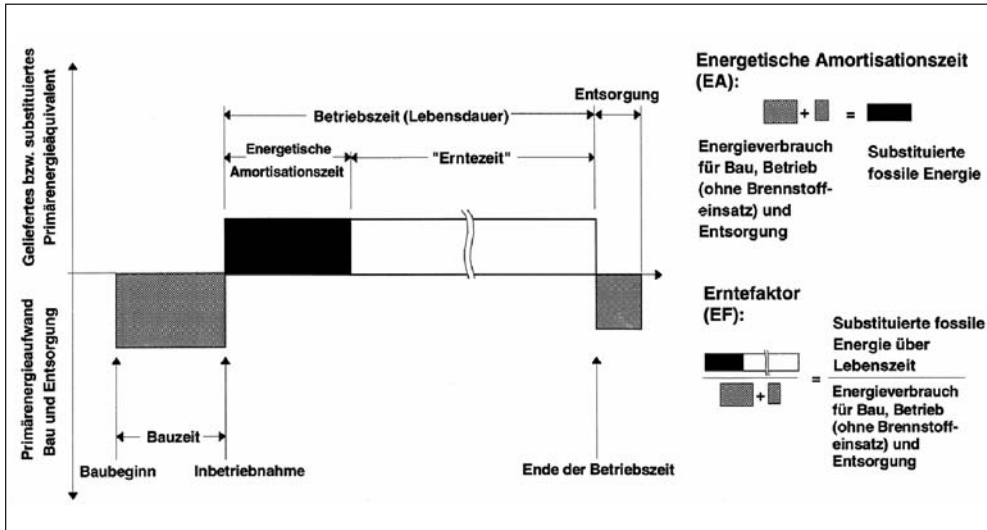


Abb. 3 Die »energetische Amortisationszeit« bzw. der »Erntefaktor« als Maßstab für die energetische Sinnhaftigkeit einer Energieanlage

Hilfe, den Fertigungsfaktoren und der ermittelten Materialmenge lassen sich dann die kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung der Solaranlage berechnen.

Es zeigt sich, daß insbesondere der Aluminiumkollektor einen großen kumulierten Energieaufwand benötigt, weil Aluminium das Material mit dem größten spezifischen Energieaufwand ist. Für die weitere energetische Betrachtung spielen die Energieverbräuche für den Betrieb der Solaranlage, z. B. Strom zum Antrieb der Pumpen, Regelung und Elektronik eine Rolle. Auch müßte fairer Weise der Energieaufwand zum Abriß und zur Entsorgung der Anlage einkalkuliert werden. Hier zeigt sich aber, daß in fast allen betrachteten Fällen noch keine detaillierten belastbaren Unterlagen über die zu erwartende Vorgehensweise und Verwendung der Altteile vorliegen. Grobe Abschätzungen lassen aber erkennen, daß im Falle der Solaranlage mit einem pauschalen Zuschlag von zehn Prozent der Energieaufwand ausreichend erfaßt werden dürfte. Es ist zu erwarten, daß das Material im wesentlichen wieder in den Recyclingprozeß eingegliedert wird, da es nach Abriß der Anlage in relativ guter Materialreinheit vorliegt.

Es stellt sich nun die Frage, welcher Bewertungsmaßstab für die energetische Sinnhaftigkeit der Solaranlage herangezogen werden kann. Hierfür haben sich die Begriffe »energetische Amortisationszeit« und der daraus ableitbare »Erntefaktor« herauskristallisiert. Abbildung 3 veranschaulicht die Denkweise.

Die energetische Amortisationszeit ist die Zeit, die die Anlage in Betrieb sein muß, um ihren kumulativen Energieaufwand wieder »hereingespielt« zu haben. Der Erntefaktor gibt das Vielfache der Mengen »hereingespielter« Energie zu der aufgewendeten Energiemenge an. »Hereingespielt« kann beispielsweise bedeuten, daß die Anlage nach dem Substitutionsprinzip bewertet wird. Dies besagt, daß der Solarwärme genau soviel Primärenergie zugeordnet wird, wie sonst für die Erzeugung der gleichen Wärmemenge an Primärenergie, beispiels-

weise an Rohöl, eingesetzt werden müßte. Somit hängen der Energieertrag und damit die Amortisationszeit vom zum Vergleich herangezogenen System ab. Handelt es sich um ein sehr schlechtes, veraltetes Heizungssystem, so liefert die Solaranlage einen größeren Output, ihre energetische Amortisationszeit ist kleiner, ihr Erntefaktor größer. Handelt es sich aber um ein hochmodernes System, beispielsweise um eine Brennwertheizanlage, so sind die energetischen Amortisationszeiten entsprechend länger, da eine kleinere Menge von konventionellen Energieträgern substituiert werden kann. Im Falle der oben vorgestellten und untersuchten Anlagen liegen die energetischen Amortisationszeiten, je nach jährlichem Sonnenenergieangebot, zwischen 1 und 2 Jahren. Dabei werden heute hochwertige konventionelle Heizanlagen zur Bewertung herangezogen. Die Anlage mit Vakuumröhrenkollektoren ist mit unter 1,1 Jahren am günstigsten, die Anlage mit Aluminiumflachkollektoren liegt dagegen mit bis zu 2 Jahren ungünstiger. Die Zahlenwerte besagen allerdings nicht, daß die eine Bauvariante doppelt so gut wie die zweite ist oder umgekehrt. Denn vor dem Hintergrund, daß mit der Nutzung der Sonnenenergie fossile Energieträger eingespart werden sollen, ist nicht so sehr die energetische Amortisationszeit maßgeblich, sondern eigentlich die Erntezeit (siehe auch Abb. 3). Bei einer unterstellten Lebensdauer von 20 Jahren wäre die Erntezeit bei den betrachteten Anlagen in dem einen Falle etwa 19 Jahre in dem anderen Falle etwa 18 Jahre, also nicht so sehr verschieden.

5.2 Beispiel: Strom aus Wind

Bei den untersuchten Windkraftanlagen handelt es sich um die Typen ENERCON-40 (E-40) und ENERCON-66 (E-66) mit Nennleistungen von 500 kW bzw. 1,5 MW. Diese Windenergiekonverter zeichnen sich insbesondere dadurch aus, daß sie kein Getriebe im Triebstrang enthalten. Die variable Drehzahl geht vom Rotor direkt auf den Generator über. Die Leistungsregelung erfolgt über eine *Pitch*-Verstellung, die jedes Blatt einzeln ansteuern kann. Die Anlagen werden mit Stahl- oder Betontürmen geliefert. In dieser Untersuchung wurden Stahltürme betrachtet, weil diese häufig verwendet werden. Dabei variieren die Turmhöhen aus Gründen der Windgeschwindigkeit und der damit verbundenen Wirtschaftlichkeit je nach Standort: Bei der Anlage E-40 liegt die Nabenhöhe je nach Standort zwischen 44 m an der Küste und 65 m im Binnenland. Für küstennahe Gebiete wurde ein Turm mit 55 m Nabenhöhe gewählt. Die Anlage E-66 wird zur Zeit für Stahltürme nur mit einer Nabenhöhe von 67 m geliefert. Mit den Aufstellungsorten ändern sich die kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung (KEA_H), da die Energieaufwendungen durch verschiedene Türme, Fundamente und Transporte vom Standort abhängig sind. Tabelle 3 stellt die wichtigsten technischen Daten der untersuchten Anlage zusammen.

Tab. 3 Technische Daten der untersuchten Windkraftanlagen

| Generelle Daten | | | |
|-------------------------------------|--|-----------------------------------|-------------------------|
| Rotor mit Blattverstellung | | | |
| Bauart: | Luvläufer mit aktiver Blattverstellung | | |
| Blattanzahl: | 3 | | |
| Blattmaterial: | GFK (Epoxidharz) | | |
| Blattverstellung: | je Rotorblatt ein autarkes Stellsystem | | |
| Antriebsstrang mit Generator | | | |
| Nabe: | starr | | |
| Generator: | direktgetriebener Ringgenerator (eigene Fertigung) | | |
| Netzspeisung: | Wechselrichter | | |
| Bremssysteme: | <ul style="list-style-type: none"> – drei autarke Blattverstellungssysteme mit Notstromversorgung – Rotorhaltebremse – Rotorarretierung (von Hand f. Service) | | |
| Windnachführung: | aktiv über Stellgetriebe, Dämpfung über Reibungslager | | |
| Einschaltgeschwindigkeit: | 2,5 m/s | | |
| Typ E-40 | | Typ E-66 | |
| Nennleistung: | 500 kW | Nennleistung: | 1,5 MW |
| Rotordurchmesser: | 40,3 | Rotordurchmesser: | 66 m |
| Nabenhöhe: | 44–65 m | Nabenhöhe: | 67–98 m |
| Nenngeschwindigkeit: | 12,5 m/s | Nenngeschwindigkeit: | 12,5 m/s |
| Rotor mit Blattverstellung | | Rotor mit Blattverstellung | |
| Blattlänge: | 18,9 m | Blattlänge: | 30,8 m |
| Überstrichene Fläche: | 1275 m ² | Überstrichene Fläche: | 3421 m ² |
| Drehzahl: | variabel; 18–38 U/min | Drehzahl: | variabel; 10–20,3 U/min |
| Tippgeschwindigkeit: | 38–80 m/s | Tippgeschwindigkeit: | 30–70 m/s |

Jahresenergieerträge der Anlagen

Da die energetische Amortisationszeit und der Erntefaktor einer Anlage maßgeblich vom Windenergieangebot abhängen, wurden drei verschiedene Referenzstandorte mit charakteristischen Kenngrößen definiert. Ein Standort befindet sich an der Küste, die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf 10 m Höhe liegt hier bei 5,5 m/s. Ein weiterer befindet sich in Küstennähe und besitzt eine mittlere Geschwindigkeit von 4,5 m/s. Der Standort im Binnenland wird schließlich durch eine mittlere Windgeschwindigkeit von 3,5 m/s charakterisiert. Für die folgende Ertragsrechnung wurde eine Weibull-Verteilung zugrunde gelegt. Die hierfür benötigte Datenbasis und die zuvor genannten Jahresmittel der Windgeschwindigkeit sind mit meteorologischen Karten und zusätzlich mit Daten aus Windgutachten abgestimmt (BENESCH et al. 1978, S. 9; ZELCK 1990). Tabelle 4 enthält auch die Nettoenergieerträge der Anlagen an den verschiedenen Standorten. Hierbei wurden die technische Verfügbarkeit und der Eigenstromverbrauch der Anlagen berücksichtigt.

Die Anlagen müssen während ihrer Lebensdauer, die kalkulatorisch mit 20 Jahren angenommen wurde, gewartet werden. Hierbei fallen Energieaufwendungen für Transporte und für die Herstellung von Verschleißteilen und Betriebsmitteln an. Verschleißteile und Be-

triebsmittel sind z. B. Getriebe für die *Pitch*-Verstellung, Komponenten der Steuerungs- und Regelungstechnik, Reib- und Gleitbeläge sowie Öle und Fette.

Hinsichtlich des Energieaufwandes zur Herstellung der Anlage ist der Generator ein wichtiger Bauteil. Er ist mit rund 20 % an den Gesamtaufwendungen beteiligt. In dieser Zahl kommt zum Ausdruck, daß es sich bei den untersuchten Anlagen um Anlagen ohne Getriebe handelt. Ihr Multipolgenerator hat aufgrund seines hohen Kupferanteils und seiner Elektroblechpakete hohe energetische Aufwendungen.

Weitere energieintensive Bauteile sind der Turm, die restliche Gondel, das Fundament und die Rotorblätter.

Energetische Kennzahlen

Mit den Jahresenergieerträgen der Anlagen können nun die energetischen Amortisationszeiten und Erntefaktoren an den verschiedenen Standorten für eine Lebensdauer der Anlagen von 20 Jahren berechnet werden (siehe Tab. 4). Dabei wird der erzeugte Windstrom durch einen Vergleich mit dem deutschen Kraftwerksmix primärenergetisch bewertet, indem ein Bereitstellungsfaktor von 2,97 MJ Primärenergie pro MJ Elektrizität angesetzt wird (*GEMIS* 1998, S. 29). Die energetischen Amortisationszeiten liegen demnach für beide Anlagen zwischen drei und sechs Monaten. Die Erntefaktoren der Anlagen bewegen sich dementsprechend zwischen 70 und 40.

Tab. 4 Energetische Kenngrößen der untersuchten Windanlagen

| Kenngröße | Anlage, Nabenhöhe, Standort | | | | | |
|--|-----------------------------|----------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
| | E-40, 44 m, Küste | E-40, 55m, küstennah | E-40, 65 m, Binnenland | E-66, 67 m, Küste | E-66, 67 m, küstennah | E-66, 67 m, Binnenland |
| Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe [m/s] | 6,87 | 6,33 | 5,91 | 7,32 | 6,58 | 5,96 |
| Jahresenergieertrag, netto [kWh/a] | 1 296 985 | 1 060 645 | 881 972 | 4 072 018 | 3 193 185 | 2 488 809 |
| kumulierter Energieaufwand für Herstellung und Betrieb [kWh/a] | 1 096 801 | 1 198 271 | 1 383 803 | 3 780 909 | 3 765 209 | 3 791 149 |
| energetische Amortisationszeit [Monate] | 3,3 | 4,5 | 6,2 | 3,7 | 4,7 | 6,1 |
| Erntefaktor | 70 | 53 | 38 | 64 | 50 | 39 |

5.3 Beispiel: Gebäude mit niedrigem Energieverbrauch

Mit der stetig abnehmenden Energie für die Wärmebereitstellung in Neubauten verschiebt sich das Verhältnis der Energieaufwendungen für den Bau des Hauses und der für die Beheizung notwendigen Wärmeenergie. War der Standard für die Beheizung von Wohngebäuden im Bestand schätzungsweise bei ca. 150 kWh/m²a bis 200 kWh/m²a festgesetzt, sanken mit Einführung der Energieeinsparverordnung im Jahr 2002 diese Werte auf ca. 50 kWh/m²a und damit in den Bereich der für die Erstellung eines Hauses notwendigen Energie.

Die Solarsiedlung Gelsenkirchen ist eine der ersten Siedlungen, die im Rahmen des Landesprogramms »50 Solarsiedlungen in Nordrhein-Westfalen« gefördert und gebaut wurden. Um Erkenntnisse für weitere Siedlungen zu gewinnen, wurden der Bau und die ersten Jahre der Siedlung wissenschaftlich durch verschiedene Projekte begleitet.

Die Siedlung (Abb. 4) besteht aus 71 Reihenhäusern mit Wohnflächen zwischen 110 m² und 140 m². Sie zeichnet sich durch einen hohen Dämmstandard und eine solare Energieversorgung aus. Der durchschnittliche Heizwärmebedarf der Häuser liegt rund 40 % unter den Anforderungen der Wärmeschutzverordnung 1995. Das Brauchwasser wird zu 60 % über solarthermische Kollektoren erzeugt. Photovoltaikanlagen decken 1/3 des in der Siedlung benötigten Stroms ab.

Die Solarsiedlung wurde von zwei Bauträgern errichtet. Im Nordteil der Siedlung wurden Massivhäuser in Reihenbauweise erstellt. Es wurden zwei verschiedene Haustypen gebaut, die nach ihrer Fassadenbreite als Plus 5,5 und Plus 6,4 Häuser bezeichnet wurden. Der Heizwärmebedarf, berechnet nach der Wärmeschutzverordnung 1995, liegt bei durchschnittlich 40 kWh/m²a.



Abb. 4 Solarsiedlung Gelsenkirchen

Im Südtteil der Siedlung wurden sowohl Holzständerbauten und Massivbauten erstellt. Die Holzhäuser »Trio« und »Quattro« wurden in Holzständerbauweise mit innenliegender Mineralwolldämmung erbaut.

Der berechnete Heizwärmebedarf der Gebäude liegt bei ebenfalls durchschnittlich 40 kWh/m²a. Die Häuser verfügen über eine fassadenintegrierte solarthermische Anlage, die im Sommer gleichzeitig als Verschattungselement eine Überhitzung des Gebäudes verhindert. Eine solarelektrische Anlage ist auf dem Dach und an der Fassade angebracht.

Betrachtet man den kumulierten Energieverbrauch für die Gebäude über eine Lebensdauer von 50 Jahren, so zeigt sich, daß die Holzständerbauten den geringsten kumulierten Energieverbrauch aufweisen. Dieses Ergebnis entstand unter der Randbedingung, daß die innere Energie des Hauses in Form des Heizwertes des Holzes bei der Entsorgung dem Haus zu 100 % gutgeschrieben wird. Eine Betrachtung unterschiedlicher Entsorgungswege kann hier auch zu einem anderen Ergebnis führen, insbesondere weil manche der Holzbaustoffe in Form der Heizwerte von Holz Verbundwerkstoffe sind, die sich nicht mehr vollständig regulieren lassen.

In dem Projekt wurde auch zum ersten Mal der kumulierte Energieverbrauch für die Infrastruktur betrachtet. Zur Infrastruktur wurden alle Verkehrsflächen inklusive der Garagenhöfe sowie die Ver- und Entsorgungsleitungen der Siedlung gerechnet. Der Anteil der Infrastruktur mit ca. 25 % an dem gesamten kumulierten Energieverbrauch der Siedlung ist überraschend hoch (Abb. 5). Der kumulierte Energieverbrauch der Infrastruktur wird dominiert von den Beton- und Gußstahlrohren für die Wasserführung. Beim Straßenbau wird der kumulierte Energieverbrauch von den Betonsteinen bestimmt, die für die Fuß- und Radwege sowie die Parkflächen verbaut wurden.

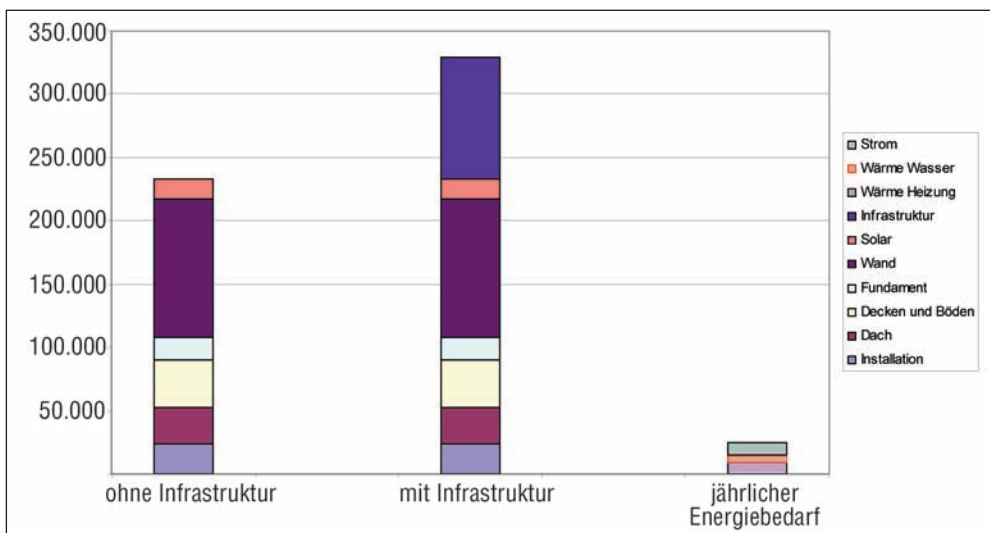


Abb. 5 Aufteilung des kumulierten Energieverbrauchs mit und ohne Infrastruktur für die Solarsiedlung Gelsenkirchen (alle Werte Primärenergieäquivalente)

Auffallend ist das Verhältnis des jährlichen Energieverbrauches des Gebäudes für Heizung, Warmwasser und für den kalkulatorisch angesetzten Stromverbrauch (rechter Balken in Abb. 5) zu den Energieaufwendungen für das Gebäude und die Infrastruktur. Anders ausgedrückt: Ins Gebäude selbst und anteilig in die Infrastruktur ist primärenergetisch betrachtet genau so viel Energie »investiert« worden, wie die Benutzer der Gebäude über 20 Jahre »verbrauchen«. Diese Zahlen belegen die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtung.

Die Untersuchung zeigt, daß im Bereich der Baustoffe und Bauelemente noch ein Energieeinsparungspotential liegt, das mit einfachen planerischen Mitteln zu erschließen ist. Der kumulierte Energieaufwand eignet sich als richtungssicherer Indikator für die Identifizierung und Bewertung der Einsparpotentiale. Durch Allokation von spezifischen Werten, wie z. B. Emissionen, kann die Aussagekraft dieses Indikators weiter erhöht werden.

6. Schlußfolgerung

Nachhaltigkeit ist der verantwortungsvolle schonende Umgang mit den Ressourcen, wie Rohstoffe und Energie. Um ihren Verbrauch zu erfassen, haben sich ganzheitliche Betrachtungen, wie beispielsweise die Lebenszyklusanalyse als Methode bewährt. Insbesondere hinsichtlich der Ressourcen Energieverbrauch und Luftschadstoffe sowie Klimagas kommt dem kumulierten Energieverbrauch als Indikator eine wesentliche Rolle zu. Zur Berechnung des kumulierten Energieverbrauchs wird häufig die Methode der Prozeßkettenanalyse angewendet. Alle Schritte der Herstellung der Anlage, beginnend bei der Gewinnung der Rohstoffe bis zum Zusammenbau der Komponenten, werden bilanziert. Des weiteren werden alle Energie- (und Stoffströme) während der Lebenszeit und bei der späteren Entsorgung bzw. dem Recycling der Anlagen mit berücksichtigt. Bei den Rechnungen zum kumulierten Energieaufwand handelt es sich nicht – genauso wie bei allen Ökobilanzierungsbetrachtungen – um »betriebswirtschaftliche Gewinn- und Verlustrechnungen«, bei denen die Nachkommastellen stimmen müssen. Der Genauigkeitsgrad darf für die daraus zu ziehenden Schlüsse durchaus etwas kleiner sein und reicht somit trotz der derzeit noch gegebenen Unsicherheiten in der Regel aus.

Die Ergebnisse der genannten Beispiele zeigen, daß in allen Fällen die Bilanz aus energetischer Sicht vernünftig ist. Sie zeigen aber auch, daß eine ganzheitliche Betrachtung notwendig ist. Es reicht nicht mehr aus, nur die Betriebsphase alleine zu berücksichtigen.

Es bedarf aber einer kritischen Interpretation der ermittelten Ergebnisse von ganzheitlichen Energie- und Ökobilanzierungen. Das reine Übermitteln von Zahlenwerten an die »politische Diskussion« führt hier nicht zum sachbetonten Erfolg.

Literatur

- BENESCH, W., et al.: Die Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf die Nutzung der Windkraft. Bericht des Deutschen Wetterdienstes Nr. 147, Teil I. Offenbach (Main) 1978, S. 9.
- GEMIS (Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme): Version 3.03. Öko-Institut Darmstadt, korrigierte Fassung vom 27. 2. 1998
- HERFURTH, K. : Energieaufwand bei spanender Teilefertigung. Fertigungstechnik und Betrieb Nr. 11 (1983)
- VDI-Richtlinie: Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden (VDI 4600). Düsseldorf 1997
- WAGNER, H. J., und WENZEL P.: Energiebilanzen – Vorgehen und Materialanhaltswerte. Energiewirtschaftliche Tagesfragen Heft 11, 685–688 (1997)
- ZELCK, G.: Anlagengrößen und gewinnbare spezifische Jahresenergie von Windenergiekonvertern. Brennstoff, Wärme, Kraft (BWK) Heft 7/8, 422–429 (1990)

Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef WAGNER
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE)
Gebäude IB, 4
Universitätsstraße 150
44801 Bochum
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 234 3228044
Fax: +49 234 3214158
E-Mail: lee@lee.ruhr-uni-bochum.de
Internet: www.lee.ruhr-uni-bochum.de

Ökonomische Probleme der Strommarktliberalisierung

C. Christian VON WEIZSÄCKER (Bonn)

Mit 1 Abbildung



Zusammenfassung

Die Einführung des Wettbewerbs bei Strom und Gas hat zu fundamentalen Veränderungen dieser Produktionszweige geführt. Es zeigt sich, daß der Wettbewerb insbesondere beim Gas ein europaweiter Wettbewerb ist oder doch zu werden verspricht. Der Wettbewerb hat zu erheblichen Rationalisierungsanstrengungen und zu sinkenden Preisen geführt. Zugleich hat er in Deutschland angesichts einer vorher zersplitterten Angebotsstruktur zu Konzentrationstendenzen geführt. Die Marktpreise sind volatil geworden und werden es unter Bedingungen des Wettbewerbs auch bleiben. Der rationalisierungsbedingte Abbau von Überkapazitäten bringt die Gefahr mit sich, daß in Zeiten hohen Strombedarfs auch wieder Marktmacht entsteht.

Abstract

The introduction of competition in the electricity and natural gas industries has led to drastic changes in both industries. Competition, especially with natural gas, gravitates toward European wide competition. Productivity in both industries has risen substantially, due to competitive pressure. Prices came down to the benefit of customers. In Germany, where in prior times many firms supplied electricity locally, competition forced concentrations in the form of mergers and takeovers. There is substantial price volatility – and this likely to remain the case as long as competition prevails. Excess capacities in production have been eliminated due to competitive pressure. There is the danger that this will lead to market power in periods of high demand.

1. Einleitung

Strom- und Gaswirtschaft haben in den letzten 10 Jahren eine fundamentale Veränderung erfahren, indem der Wettbewerb in diesen beiden Sektoren eingeführt worden ist. Dieser Veränderungsprozeß ist noch keineswegs abgeschlossen. Dennoch ist es heute schon möglich, eine Bestandsaufnahme durchzuführen. In diesem Vortrag muß ich mich auf einige Aspekte einer solchen Bestandsaufnahme konzentrieren. Wichtige andere Aspekte müssen aus Zeitgründen notgedrungen unter den Tisch fallen. Insbesondere kann ich nicht auf die besonderen Probleme eingehen – so wichtig sie sind –, die den Zusammenhang zwischen Ökologie und wirtschaftlichem Wettbewerb betreffen.

2. »Naturgesetze« in der Sozialwissenschaft

Vor diesem überwiegend naturwissenschaftlichen Publikum empfinde ich das Bedürfnis, darauf hinzuweisen, daß wir auch in den Sozialwissenschaften über Gesetzmäßigkeiten verfügen. Es handelt sich überwiegend um empirische Regelmäßigkeiten. Diese können aber sehr wohl auch häufig aus theoretischen Aussagen abgeleitet und insofern 'erklärt' werden. Allerdings lasse ich mich nun nicht auf eine Diskussion ein, was denn 'Erklären' eigentlich bedeutet.

Eine altbekannte Regelmäßigkeit ist das sogenannte Gesetz der Nachfrage (im Englischen klingt es besser: »The Law of Demand«). Es sagt folgendes: Steigt – *ceteris paribus* – der Preis eines Gutes, dann sinkt die Nachfrage nach diesem Gut. Bei sorgfältiger Beachtung des *ceteris paribus* bewährt sich dieses Gesetz im praktischen Leben. Es folgt aber auch aus der herkömmlichen Theorie, welche die ökonomische Wissenschaft entwickelt hat.

Eine andere empirische Regelmäßigkeit möchte ich das »Konzentrationsgesetz« nennen: Wird ein Wirtschaftsbereich dem Wettbewerb geöffnet, dann kommt es in diesem Bereich zu Konzentrationstendenzen. Der Wettbewerb erzwingt die Rationalisierung der Produktion, und im Rahmen dieser Rationalisierung stellt sich heraus, daß man im vor-wettbewerblichen Zustand zahlreiche Größenvorteile mißachtet hat, da die kleineren Einheiten an ihrer Selbständigkeit festhalten wollten und keine übergeordnete Instanz stark genug war, diesen Widerstand gegen Konsolidierung zu brechen. Diese »Instanz« ist nun der Wettbewerb, der zwingt, unrationelle Produktionsverfahren aufzugeben. (Der Wettbewerb hat natürlich auch zahlreiche andere Wirkungen, von denen nicht wenige auch wieder zu Dezentralisierungen führen, insbesondere durch die Stimulierung neuer Produkte und Märkte.)

Schließlich noch eine dritte Regelmäßigkeit, die ich entdeckt zu haben glaube: »Das Gesetz der zunehmenden Distanzkostendegression«. Jede Distanzüberwindung durch Personen, Waren oder Information ist mit Kosten verbunden. Wir können die Frage stellen: Wie hoch sind in einem konkreten Transportvorgang die Kosten als Funktion der überwundenen Distanz? Der Zeitaufwand eines Wanderers wächst ungefähr proportional mit der überwundenen Strecke. Der Zeit- und Geldaufwand eines Flugreisenden wächst weit unterproportional mit der überwundenen Strecke. Bei der Fliegerei gibt es also etwas, was ich Distanzkostendegression nenne. Die Kosten pro Kilometer sinken mit steigender Anzahl der Kilometer. Dies gibt es beim Wanderer kaum. Im Mittelalter ist man überwiegend zu Fuß gegangen, heute wird mehr geflogen. Die empirische Regelmäßigkeit, die ich zu beobachten meine, ist nun, daß die Distanzkostendegression ganz universell beim Personen-, Waren- und Informationstransport

im Verlauf der Menschheitsgeschichte immer weiter zunimmt. Dieses Gesetz ist im übrigen die eigentliche wirtschaftlich-technische Basis des Prozesses der Globalisierung. Ich habe dieses Gesetz zuerst im Bereich der Telekommunikation entdeckt, indem ich mir die Abfolge der Generationen von Übertragungstechniken angesehen habe. Den heutigen enormen Stand der Distanzkostendegression in der Informationsübertragung nutzen wir alle, indem wir »Kunden« des Internet geworden sind.

3. Charakteristika der Stromwirtschaft

Es ist für das Weitere nützlich, sich einige Charakteristika der Stromwirtschaft zu vergegenwärtigen. Wir sprechen vom Stromnetz. Strom wird auf exklusiv dieser Dienstleistung vorbehaltenen Transportwegen übertragen. Für die meisten Branchen in der modernen Volkswirtschaft gibt es ebenfalls Transportdienstleistungen. Aber der Transport von Waren erfolgt ganz überwiegend nicht auf der spezifischen Ware vorbehaltenen Transportwegen. So gibt es in der Wirtschaftspolitik als Sektorpolitik die Verkehrspolitik. Sie ist zuständig für den Sektor Verkehr, der den Transport von Waren und Dienstleistungen, aber auch von Personen für alle Branchen und für die Endverbraucher bewerkstelligt. Dem gegenüber handelt man die Fragen der Stromübertragung im Politikgebiet Energiepolitik ab. Denn die Transportwege des Stroms sind stromspezifisch und damit sehr viel enger verbunden mit ihrem energiewirtschaftlichen Zweck, als dies bei den Transportleistungen in anderen Branchen der Fall ist.

Damit zusammen hängt, daß die Einzeltransportleistung sehr eng gekoppelt ist mit der Leistung des Gesamtsystems. Die für den unproblematischen Stromtransport erforderliche konstante Netzspannung ist eine Systemeigenschaft und kann nicht isoliert für einzelne Transportleistungen bereitgestellt werden.

Jedes komplexere Produktions- und Verbrauchssystem hat das Problem der Abstimmung zwischen Produktion und Verbrauch. Dort, wo die Einzelleistung nur schwach gekoppelt ist mit der Performance des Gesamtsystems, wie bei den Transportleistungen für einzelne Industriebranchen, kann die Pufferung zwischen Produktion und Verbrauch durch dezentrale Lagerhaltung erfolgen. Bei den Dienstleistungen, die sich (definitiv) dadurch auszeichnen, daß Lagerhaltung nicht möglich ist, geschieht die Abstimmung zwischen Produktion und Verbrauch durch dezentral gesteuerte Wartezeiten, z. B. im Wartezimmer des Arztes oder in der Schlange am Fahrkartenschalter der Bahn. Demgegenüber ist die Pufferung zwischen Produktion und Verbrauch in der Stromwirtschaft ein Managementproblem für die zentrale Steuerung des Gesamtsystems. Bekanntlich kann auch Strom nicht gelagert werden, und insofern bedarf es einer von einer Zentralstelle aus erfolgenden Steuerung der einzelnen Komponenten des Systems. Da diese Steuerung den Verbraucher möglichst wenig irritieren soll, liegt die hauptsächliche Anpassungslast auf der Seite der Produktion. Die Befehle zum Hochsteuern oder Heruntersteuern der einzelnen Kraftwerke müssen zentral koordiniert sein.

Etwas abgeschwächt gelten ganz ähnliche Systemeigenschaften für die Gaswirtschaft. Die Abschwächung besteht natürlich darin, daß hier zum Teil dezentral Gas in Form von Lagerhaltung gepuffert werden kann.

4. Netze

Netze sind zu einem zentralen Thema der Wirtschaftspolitik der vergangenen 25 Jahre geworden. Eine ganz wesentliche Komponente dieser Wirtschaftspolitik war die Liberalisierung von Netzen. Es ist insofern nützlich, sich einige fundamentale Struktureigenschaften von Netzen zu vergegenwärtigen. Ich kann dies hier natürlich nur in sehr verkürzter Form tun.

Wichtig scheint mir die Unterscheidung zwischen Bruttonetzen und Nettonetzen zu sein. Bruttonetze sind solche Netze, in denen Transportleistungen, die in entgegengesetzter Richtung verlaufen, die Transportkapazitäten des Netzes additiv beanspruchen. Beispiele sind hier sämtliche Telekommunikationsnetze, aber auch Logistiknetze im Stückgutverkehr. Eine Nachricht, die in einem Telekommunikationsnetz von Punkt A zu Punkt B geschickt wird, und eine andere Nachricht, die von Punkt B zu Punkt A geschickt wird, beanspruchen Transportkapazitäten des Telekommunikationsnetzes, die weitgehend unabhängig von der Beanspruchung durch den gegenläufigen Strom sind. Die erforderliche Transportleistung des Gesamtnetzes ergibt sich somit als Summe der einzelnen Kapazitäten, die für die Transportleistungen von Punkt zu Punkt bereitgestellt werden müssen.

Von ganz anderer Natur sind Nettonetze. Diese sind in der Energiewirtschaft relevant. Das Stromnetz, das Gasnetz, aber auch das Netz für die Bereitstellung von Wasser sind Beispiele für Nettonetze. Muß eine bestimmte Menge Strom von Punkt A zu Punkt B transportiert werden, und muß eine bestimmte andere Menge Strom von Punkt B zu Punkt A transportiert werden, dann besteht die Netzbeanspruchung aus dem Saldo zwischen diesen beiden zu transportierenden Mengen. Das Netz muß faktisch nur diese Salden transportieren. Dieser grundsätzliche Vorteil von Nettonetzen beruht auf der Homogenität des Produkts, das transportiert wird. In einem funktionierenden Stromnetz ist Strom gleich Strom. In einem funktionierenden Gasnetz nach Qualitätsharmonisierung ist Gas gleich Gas. Ähnliches gilt für Wasser. Es gilt im übrigen auch für den Zahlungsverkehr, denn Geld ist gleich Geld. Demgegenüber ist für den Empfänger Information nicht gleich Information. Wir sprechen ja vom Informationsaustausch. Wenn zwei Personen, A und B, sich gegenseitig informieren, dann ist der Fluß der Informationen eben nicht einfach der Saldo, sondern die Summe. Ihrer Natur nach sind verschiedene Komponenten eines Informationsflusses heterogen.

Dem Homogenitätsvorteil der Nettonetze entspricht aber ein Nachteil. Man kann nicht mehr, wie in erster Approximation bei Bruttonetzen, die Transportkosten einer bestimmten Transportdienstleistung separat und weitgehend unabhängig von den übrigen Transportleistungen des Systems bestimmen. Selbst das Vorzeichen der Transportkosten einer bestimmten Transportdienstleistung ist bei Nettonetzen nicht von vornherein gegeben.

Wir können bei Nettonetzen auch vom Abtauschprinzip sprechen. Stellen wir uns eine Verbindung zwischen zwei Punkten A und B vor. Es werden von A nach B 100 Einheiten des homogenen Gutes (z. B. Strom) geliefert, und es werden von B nach A 80 Einheiten geliefert. Die erforderliche Transportleistung zwischen A und B besteht damit aus 20 Einheiten. Handelte es sich um ein Bruttonetz, so wäre die erforderliche Transportleistung die Summe aus 100 und 80, also 180. Was in Nettonetzen tatsächlich passiert, ist, daß der Bedarf von B nach dem Gut durch Produktion an der Stelle B gedeckt wird. Der Lieferant von A beliefert den Kunden von B, indem er sein eigenes Produkt, das sich in A befindet, abtauscht gegen das Produkt eines anderen Herstellers, der sich in B befindet. Durch diesen Abtausch, der bei homogenen Gütern immer möglich ist, wird das Transporterfordernis massiv vermindert.

5. Implikationen für den geographischen Markt am Beispiel Gas

Die Tatsache, daß es sich bei Strom und bei Gas um Nettonetze handelt, hat fundamentale Implikationen für den Wettbewerb von Herstellern, die ihre Kunden über ein solches Netz erreichen. Im Kartellrecht und in der Wettbewerbspolitik spricht man vom relevanten geographischen Markt. Darunter versteht man das geographische Gebiet, innerhalb dessen die Produzenten zueinander im Wettbewerb stehen. Gerade weil es auch um die Thematik der europäischen Integration geht, ist die Frage nach dem relevanten geographischen Markt von besonderer Bedeutung. Sie ist aber über das Kartellrecht hinaus von erheblicher strategischer Bedeutung für die Positionierung der einzelnen Unternehmen im Wettbewerb.

Um das Verständnis für den geographischen Markt zu steigern, beginne ich mit einem hypothetischen Referenzszenario, mit dem man dann die reale Situation vergleichen kann. In diesem Referenzszenario haben wir es zu tun mit einem Transportsystem für Erdgas, in dem die Anbieter die Transportkosten zu tragen haben, die den Systemtransportkosten ihres Angebots bei kostenoptimiertem System entsprechen.

Nehmen wir z. B. die Frage, die zuerst für dieses Referenzsystem zu beantworten ist: Stehen Nordseegas, Rußlandgas, Algeriengas in Europa im Wettbewerb? Für jedes dieser Gasfördergebiete können wir bei optimierter Verteilung des Gases über die Fläche ein Liefergebiet feststellen. Das Liefergebiet der Nordsee wird vor allem im Norden und Westen Europas anzutreffen sein, das Liefergebiet des Russengases wird vor allem im östlichen Teil, das Liefergebiet des algerischen Gases vor allem in Südeuropa liegen.

An der Grenze der Liefergebiete zweier Fördergebiete sind die beiden Fördergebiete gleich konkurrenzfähig. Dies gilt jedenfalls dann, wenn diese Grenzen der Liefergebiete nicht durch Engpässe im Transportsystem verursacht sind.

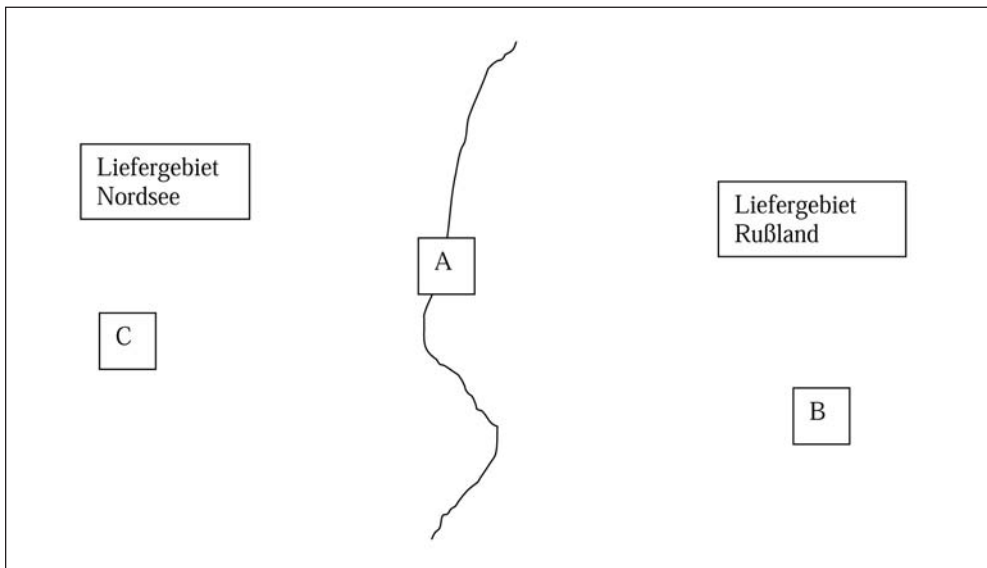


Abb. 1 Grenze der Liefergebiete zweier Fördergebiete

Betrachten wir nun auf der Grafik einerseits den Punkt A, der auf der Grenze des Liefergebiets der Nordsee und des Liefergebiets Rußlands liegt. Dies mag ein Punkt etwa in der Mitte Deutschlands sein. Wir betrachten nunmehr einen Punkt B, z. B. südöstlich von Punkt A, meinerwegen ein Entnahmepunkt in Österreich. Dieser liegt dann mitten im Liefergebiet des Fördergebiets Rußland.

Liefert nun »Nordsee« eine zusätzliche Menge an Entnahmepunkt B, dann geschieht folgendes:

- Es steigt die Nordseeproduktion.
- Es gibt entsprechend mehr Entnahme von Nordseegas bei einem Punkt A auf der Grenze der Liefergebiete zwischen Fördergebiet Nordsee und Fördergebiet Rußland.
- Es gibt entsprechend weniger Entnahme von Russengas an diesem Punkt A.
- Es gibt eine zusätzliche Entnahme von Russengas am Punkt B.

Vergleicht man nun die »Produktions- und Transportkosten« des Liefergebiets Nordsee am Entnahmepunkt B mit den »Produktions- und Transportkosten« des Liefergebiets Rußland am Punkt B, dann stellt man fest, daß diese gleich groß sind. Würde das zusätzliche Gas von Rußland geliefert, dann entstehen die russischen Förderkosten plus Transportkosten in Höhe des zusätzlichen Transports vom russischen Fördergebiet zum Punkt B. Liefert nun Nordsee, dann entstehen Förder- und Transportkosten in Höhe der zusätzlichen Lieferung von der Nordsee zu Punkt A. Diese aber werden kompensiert durch die geringeren Transporte zu Punkt A von dem russischen Fördergebiet. Da voraussetzungsgemäß am Grenzpunkt A zwischen den beiden Liefergebieten die beiden Liefergebiete gegeneinander konkurrenzfähig sind, kann der Austausch am Punkt A zwischen Nordseegas und Russengas die Gesamtkosten des Systems nicht verändern. Damit sind die zusätzlichen Kosten, die dem System insgesamt entstehen, einfach gegeben durch die Lieferung von zusätzlichem Russengas zum Punkt B, genau als wäre der Lieferant das russische Fördergebiet selbst gewesen. Somit also sind die zusätzlichen Kosten der Bereitstellung von Gas am Entnahmepunkt B unabhängig davon, ob dieses Gas aus dem Nordseefördergebiet oder aus dem russischen Fördergebiet kommt. Insofern ist wegen des Abtauschprinzips im Nettonetz für Gas Nordseegas in ganz Europa, also auch dort wettbewerbsfähig, wo wir uns mitten im Liefergebiet für Russengas befinden.

Spiegelbildlich dasselbe würde gelten für einen Entnahmepunkt C, der mitten im Liefergebiet des Förderbereichs Nordsee irgendwo in Westeuropa liegt. Auch hier wäre Russengas mit Nordseegas wettbewerbsfähig. Die Schlußfolgerung ist, daß in diesem Referenzszenario der relevante geographische Markt aus ganz Europa besteht.

Will man nun von diesem Referenzszenario zur realen Welt übergehen, dann muß man eine Reihe von Fragen beantworten:

- Sind die Liefergebiete der einzelnen Fördergebiete durch physische Transportengpässe getrennt? Für diesen Fall würde die Analyse der Wettbewerbsgleichheit an der Grenze der Liefergebiete nicht gelten. Faktisch ist es so, daß das Gastransportnetz in Europa, insbesondere in Mitteleuropa so gut ausgebaut ist, daß es solche Abgrenzungen durch Transportengpässe nicht gibt. Sowohl in Deutschland als auch z. B. in Italien sind die Grenzen zwischen dem Liefergebiet Rußland und dem Liefergebiet Nordsee nicht durch Engpässe bestimmt.
- Gibt es Netzzugangsprobleme oder überhöhte Gebühren für den Transport? Gibt es also institutionell bedingte Engpässe, die insofern als Wettbewerbsschranken auftreten können? Diese Frage muß je nach Situation unterschiedlich beantwortet werden. Durch das neue

österreichische Gesetz in der Gaswirtschaft ist zumindest in Österreich eine Situation hergestellt, die eine negative Antwort auf diese zweite Frage erlaubt, so daß hier solche Wettbewerbshemmnisse nicht zu erwarten sind. In Deutschland ist die Lage etwas komplizierter. Man streitet sich zur Zeit heftig darüber, ob das dortige Regime der Durchleitung bei Gas auf der Basis der neuesten Regelungen alle relevanten Hemmnisse aus dem Wege geräumt hat oder nicht.¹

Es sei an dieser Stelle bemerkt, daß große Gasunternehmen, wie etwa Ruhrgas oder Gaz de France oder SNAM/ENI, von den verschiedensten Fördergebieten einkaufen. Sie haben ihr Transportsystem intern ähnlich optimiert, wie im Referenzfall vorgestellt. Und insofern schweißen sie die Fördergebiete in einen unternehmensinternen relevanten geographischen Markt »Europa« zusammen. Überall dort, wo die Durchleitung zufriedenstellend geregelt ist, also z. B. in Österreich, kann man deswegen von einem relevanten geographischen Markt Europa ausgehen.

6. Der Strommarkt in Europa

Analoge Überlegungen, wie sie für den Gasmarkt eben angestellt worden sind, können auch für den Strommarkt angestellt werden. Die Stromnetze sind nur anders gewachsen als die Ferntransportnetze für Gas. Der große Aufschwung des Erdgases in den letzten drei bis vier Jahrzehnten hat es zur Selbstverständlichkeit gemacht, daß Gas ein überwiegend international gehandeltes Gut ist. Die Netze sind also von vornherein darauf eingerichtet, daß über große Distanzen transportiert wird. Demgegenüber stand vor der Ära der Liberalisierung beim Strom der Gedanke der nationalen quantitativen Ausgeglichenheit der grenzüberschreitenden Stromlieferungen im Vordergrund. Man hat zwar ein europäisches Verbundsystem aufgebaut, aber jedes einzelne Land hat unter dem Aspekt der Versorgungssicherheit sehr lange darauf geachtet, daß das Volumen der Stromerzeugung und das Volumen des Stromverbrauchs im eigenen Land sich ungefähr entsprachen. Damit mußte das internationale Stromnetz primär nur als Absicherung gegen das Ausfallen einzelner Kraftwerke und für die Ausnutzung der saisonalen Produktionsunterschiede in den Alpengebieten dienen. Traditionell war damit die Transportkapazität der Kuppelleitungen zwischen den nationalen Netzen relativ eng begrenzt im Vergleich zum Produktions- und Transportvolumen innerhalb eines nationalen Gebiets. Erst im Verlauf der letzten Jahrzehnte hat sich insbesondere durch die divergente Entwicklung der Kernenergie einerseits in Frankreich, andererseits insbesondere in Italien ein dauerhafter nationaler Leistungsbilanzsaldo bei Strom eingestellt.

Insofern lag es bis vor kurzem nahe, nationale Grenzen und die begrenzten Kapazitäten der Kuppelleitungen als Engpässe anzusehen, die es verhindern, daß analog den vorhin angestellten Überlegungen beim Gas von einem europäischen Strommarkt gesprochen werden kann.

Allerdings muß diese nationale Abgrenzung von Strommärkten heute ernsthaft in Frage gestellt werden. Nicht zuletzt durch die Liberalisierung selbst ergibt sich ein Umstrukturierungsprozeß bei den Unternehmen der Stromwirtschaft, der im Grunde eine Beseitigung der Engpässe bei den Kuppelleitungen impliziert. Lassen Sie mich das am Beispiel Frankreich und Deutschland erläutern. Wenn heute auf Grund ihrer Akquisitionspolitik die *Electricité de*

¹ Zu dieser Frage vergleiche die Vorträge in OBERENDER 2004.

France (EDF) die Kontrolle über einen gewichtigen Stromanbieter (EnBW) auf dem deutschen Markt ausübt, und wenn es sich nicht ganz zufällig so ergibt, daß die traditionellen Liefergebiete von EDF und EnBW geographisch am Oberrhein aneinandergrenzen, dann können Kuppelleitungen zwischen Frankreich und Deutschland eigentlich kein Engpaßfaktor mehr sein. Jedenfalls besteht die Möglichkeit, daß EDF die Kapazität dieser Kuppelleitungen zwischen dem eigenen Liefergebiet und dem von EnBW den Bedürfnissen ihrer Strategie in Deutschland anpaßt. Insofern kann man davon ausgehen, daß beliebig Strom von Frankreich nach Deutschland geliefert werden kann, sofern man nicht nur von ganz kurzfristigen Reaktionsperioden, sondern von mittelfristigen ausgeht, innerhalb derer der Kapazitätsausbau bei den Kuppelleitungen durch Investitionen erfolgen kann. Die Logik dieses Arguments legt nahe, daß – jedenfalls für die Fragestellung des Wettbewerbs – für Stromlieferungen in Deutschland Frankreich in den relevanten geographischen Markt mit einbezogen werden müßte. Ganz analoge Überlegungen sollten auch für das Verhältnis zwischen Italien und Frankreich gelten, wobei hier schon erhebliche Übertragungskapazitäten auf Grund des hohen Exports von Frankreich nach Italien existieren.

7. Ein homogener Strommarkt

Auf Grund der Standardisierungserfordernisse und des Netzmanagements kann Strom von seiner physischen Beschaffenheit her als homogenes Gut angesehen werden. Wir können also für einen Wettbewerbsmarkt mit einem homogenen Produkt das Modell der *Perfect Competition*, der vollständigen Konkurrenz, anwenden. Dies gilt allerdings dann nicht mehr, wenn sich Oligopolisierungstendenzen bemerkbar machen, oder wenn von vornherein eine oligopolistische Struktur existiert.

Unterstellen wir einmal als Referenzszenario einen nicht oligopolisierten homogenen Strommarkt. Spielt hier der Wettbewerb, so sinkt der Preis bekanntlich auf die Grenzkosten. Das führt dazu, daß Überkapazitäten abgebaut werden. Langfristig wird man also davon ausgehen, daß unter solchen Wettbewerbsbedingungen die Versorgungslage immer eher angespannt ist. Es gibt nun für die Spitzenbedarfszeiten keine erheblichen Reservekapazitäten. Das führt seinerseits zu einer hohen Volatilität der Preise. Nicht nur werden regelmäßig die *Off-Peak*-Preise und die *Peak*-Preise stark gespreizt sein, darüber hinaus werden Zufallsabweichungen – und seien sie auch quantitativ nur relativ gering – einen massiven Einfluß auf die Preisbildung haben. Die hohe Volatilität, die dann immer wieder zum Ärger der Verbraucher auch zu Zeiten mit sehr hohen Preisen führt, ist aber andererseits der Anreiz zum Aufbau von Produktionskapazitäten, die sich ohne gelegentliche Hochpreisphasen nicht lohnen würden.

Als Fazit ist festzuhalten, daß wegen der mangelnden Lagerbarkeit des Stroms die hohe Volatilität des Strompreises bei funktionierendem Wettbewerb sozusagen ein Gleichgewichtsphänomen ist, nicht etwa eine Übergangserscheinung.

Darüber hinaus muß aber auch berücksichtigt werden, daß die Tendenz zum Abbau von Reservekapazitäten das Phänomen der »Marktmacht« fördert. Diesen Zusammenhang sollte man sich klar machen. Die Liberalisierung des Strommarkts, z. B. in Deutschland im Jahr 1998, geschah unter Bedingungen, in denen es ohne Zweifel hohe Reserveproduktionskapazitäten gab. In dieser Situation war es selbst für einen großen Anbieter nicht möglich, mehr zu verdienen, indem er seine eigenen Produktionskapazitäten dem Markt partiell nicht zur Verfügung stellte. Denn an deren Stelle traten dann einfach Produktionskapazitäten von Kon-

kurrenten. In einer Situation nur geringer Reservekapazitäten, also in einer Situation ohne Überkapazitäten, wie man sie längerfristig gerade auch unter Wettbewerbsbedingungen erwartet, sieht die Situation anders aus. Dort kann schon ein Anbieter mit einem Marktanteil etwa von einem Drittel durch bewußte Zurückhaltung von Kapazitäten Preissteigerungen erreichen, die es ihm ermöglichen, mit dem dann noch verkauften Strom mehr zu verdienen, als wenn er Kapazitäten nicht zurückhielte.

Allerdings muß der Marktsoziologe realistischerweise hinzufügen, daß diese Art der Ausnutzung von »Marktmacht« durch bewußte Zurückhaltung von Kapazitäten als Dauerphänomen nicht sehr plausibel ist – selbst wenn die Marktstruktur dies erlauben würde. Denn die Hauptnutznießer der Zurückhaltungspolitik eines großen Anbieters sind seine kleineren Konkurrenten. Sie profitieren genauso von dem durch die Zurückhaltung hoch getriebenen Preis wie der große Anbieter selbst. Sie profitieren sogar noch mehr. Denn sie tragen nicht das Opfer der Kapazitätszurückhaltung. Das Top-Management eines Unternehmens wird aber in der Regel gemessen an der relativen Performance des Eigenunternehmens im Vergleich zur gesamten Branche. Wenn das Top-Management des großen Anbieters zu entscheiden hat, ob man etwas mehr im Sinne der Aktionäre verdient, indem man Kapazitäten zurückhält oder nicht, so wird das Faktum, daß man dadurch in der Rentabilität hinter den Konkurrenten stärker zurückbleibt, als wenn man auf die Kapazitätszurückhaltung verzichtet, ein gewichtiger Grund sein, um eine solche Zurückhaltungspolitik nicht zu wählen.²

8. Die Ereignisse in Kalifornien im Sommer 2000 und andere vergleichbare Ereignisse

Im vorangegangenen Abschnitt ist quasi die theoretische Basis gelegt worden zur Analyse der kalifornischen Stromkrise im Jahre 2000. Im Sommer 2000 litt Kalifornien, also eine Weltgegend mit einer Spitzenstellung in der Weltwirtschaft, an Lieferengpässen beim Strom. Oberflächliche Betrachter haben dies der Liberalisierung des kalifornischen Strommarkts zugeschrieben. Es wurde vielerorts behauptet, daß dies der Beweis sei, daß eben liberalisierte Strommärkte nicht funktionieren. Eine solche oberflächliche Diagnose wäre allerdings irreführend.

Im Sommer des Jahres 2000 bestand in Kalifornien eine klimatisch und konjunkturell bedingt übernormal hohe Nachfrage. Bekanntlich besteht die Nachfragespitze beim Strom in den USA, und so auch in Kalifornien, im Sommer und nicht wie bei uns im Winter. Bei funktionierendem Wettbewerb hätte diese sehr hohe Nachfrage dazu geführt, daß die Preise, die die Kunden zu bezahlen hatten, stark in die Höhe geschossen wären. Nun hatte aber die kalifornische Gesetzgebung nur den Großhandelsmarkt für Strom liberalisiert, nicht aber den Endverbrauchermarkt. Hier existierten staatlich festgelegte Preiskontrollen, so daß der Anreiz zum Stromsparen bei den Stromverbrauchern auf Grund hoher Preise nicht existierte. Die Nachfrage seitens der Endverbraucher war also höher, als sie es bei funktionierendem Preismechanismus gewesen wäre. Das aber führte zu einem höheren Großhandelspreis, als es gewesen wäre, wenn die *Retail*-Preise mit angestiegen wären. Zugleich führte das natürlich zu Insolvenzen bei den Anbietern von Strom im *Retail*-Markt, die sich nun auf dem Großhandelsmarkt mit sehr hohen Preisen eindecken mußten, die sie an ihre Kunden nicht weitergeben konnten.

² Vgl. zu dieser Thematik von WEIZSÄCKER 2002.

Ob die Krise hätte abgewendet werden können, wenn es die Preiskontrollen im *Retail*-Markt nicht gegeben hätte, ist allerdings nicht endgültig zu beantworten. Denn eine genaue Analyse von ökonomischen Experten dessen, was geschehen ist, führt zu dem Resultat, daß es auch marktmachtbedingte Angebotszurückhaltung der Produzenten gegeben hat. Denn natürlich gibt es auch im Westen der USA sehr große Stromproduzenten. Und Kalifornien ist angesichts seines Bevölkerungsreichtums und seines hohen wirtschaftlichen Entwicklungsstands dort der weitaus größte Markt. So konnte sich Angebotszurückhaltung möglicherweise lohnen. Es ist also nicht ausgemacht, daß selbst bei Abwesenheit von Preiskontrollen die Endverbraucher einfach nur die einem Konkurrenzmarkt entsprechenden Preise gezahlt hätten.

Wenn auch bezüglich dieses Beurteilungspunkts eine gewisse Unsicherheit verbleibt, so ist eines sicher richtig: Die Krise mitsamt den Lieferengpässen ist dadurch verschlimmert worden, daß es kein freies Preisspiel auf dem *Retail*-Markt gegeben hat.

9. Ein Modell des europäischen Strommarktes

Im Anschluß an die Analysen, die ich in den vorangehenden beiden Abschnitten präsentiert habe, referiere ich kurz über einige Studien, die wir am Energiewirtschaftlichen Institut bezüglich der Preisbildung auf dem liberalisierten deutschen Strommarkt angestellt haben.

Im Verlauf der letzten Jahre haben wir am Energiewirtschaftlichen Institut das EUDIS-Modell entwickelt, das den kontinentaleuropäischen Strommarkt in relativ großer Detailliertheit abbildet.³ Es ist uns mit Hilfe dieses Modells möglich, eine hypothetische Angebotskurve für die Bereitstellung von Strom auf der Großhandelsebene zu konstruieren und damit in Abhängigkeit der Nachfrage vorauszusagen, welches der Konkurrenzpreis wäre. Mit andern Worten: Wir haben eine Grenzkostenkurve für die Stromerzeugung auf dem kontinentaleuropäischen Markt entwickelt. Auf Grund anderer Studien wissen wir relativ gut, daß diese Grenzkostenkurve im großen und ganzen realistisch ist. (Es verdient Erwähnung, daß der Aufbau eines solchen Modells eine enorme Arbeit bedeutete. Viel an Fleiß und Gedankenreichtum ist in den Aufbau dieses Modells seitens der Mitarbeiter des Energiewirtschaftlichen Instituts eingeflossen.)

Nun gibt es seit einiger Zeit in Leipzig eine Strombörse, auf der ein Großhandelspreis für Strom börsenähnlich bestimmt wird. Es lag natürlich nahe, diesen Leipziger Strompreis mit dem hypothetischen Preis, der sich aus unserem Modell ergibt, zu vergleichen, um damit die Frage zu beantworten: Funktioniert der deutsche Strommarkt nach den Regeln des Wettbewerbs, oder tut er das nicht? Für die Monate Januar bis Oktober ergibt sich eine weitgehende Übereinstimmung der beiden Preisserien. Das spricht dafür, daß damals in Deutschland Wettbewerbspreise geherrscht haben. Im November und im Dezember kam es an Wochentagen zu Preissprüngen des Börsenpreises, die von unserem, den Wettbewerb simulierenden Modell nicht nachvollzogen wurden.

Diese Diskrepanz zwischen dem tatsächlichen Preis und dem hypothetischen Preis unseres Modells ist zwar kein Beweis eines Abweichens der Preise vom Wettbewerbspreis. Es kann durchaus sein, daß unser Modell in Zeiten sehr hoher Nachfrage gewisse Engpaßfaktoren nicht korrekt abbildet und deswegen für diese Phasen den Wettbewerbspreis stark unterschätzt. Die alternative Erklärung der starken Abweichung ist aber, daß hier Faktoren eine

3 Vgl. www.uni-koeln.de/wiso-fak/energie unter Publikationen, The model EUDIS.

Rolle gespielt haben, die mit einem voll funktionierendem Wettbewerbssystem nicht kompatibel sind. Es liegt nahe, analog den *Ex-post*-Untersuchungen, die man bei der kalifornischen Krise angestellt hat, eine weitere Untersuchung durchzuführen, um diese Diskrepanzen zu erklären.

Jedenfalls glauben wir, mit dem EUDIS-Modell einen Referenzpreis konstruieren zu können, der im großen und ganzen den hypothetischen Wettbewerbspreis widerspiegelt, so daß Abweichungen von den EUDIS-Preisen Indikatoren für Funktionsmängel des Wettbewerbs darstellen.

10. Reorganisation der Branchen

Als Folge der Einführung des Wettbewerbs, als Folge der Liberalisierung kommt es zu typischen Reorganisationen. Dies kennt man aus der Wirtschaftsgeschichte aus vielen anderen Branchen ebenfalls. Die Einführung des Kartellverbots etwa führte sowohl in den USA im frühen 20. Jahrhundert als auch in Deutschland in den 60er Jahren zu Konzentrations- und Umstrukturierungsprozessen. Dies ist das oben unter 2. genannte »Konzentrationsgesetz«.

Entsprechendes war in den letzten Jahren auch auf den Märkten für Strom und Gas zu beobachten. Die in diesen Märkten traditionell tätigen Unternehmen machten einen radikalen Strategiewechsel durch. Während vorher die Diversifikation gerade auch in Aktivitäten anderer Branchen hoch im Kurs war, führte die Einführung des Wettbewerbs zur Konzentration auf die Kernkompetenzen. Zahlreiche branchenfremde Aktivitäten wurden abgestoßen, gleichzeitig bemühten sich die Unternehmen, auf dem Wege der horizontalen und vertikalen Fusion ihre Kräfte zu bündeln. Es bestand sehr stark die Tendenz – gerade bei den großen Unternehmen, die ja alle traditionell auf nationale Märkte beschränkt waren – in den Kernkompetenzen sich geographisch auszudehnen, d. h. »mit dem Markt mitzuwachsen«. Der sich ausdehnende relevante geographische Markt führte zu einer geographischen Expansion der großen *Player*.

Insbesondere bei horizontalen Fusionen gerieten die Unternehmen häufig an die Grenzen des Kartellrechts. Die Fusionskontrolle der Wettbewerbsbehörden hat eine Reihe von Fusionen unmöglich gemacht. Zum Teil gab es explizite Untersagungen; zum Teil gab es von den Kartellbehörden angeordnete Verkäufe von Unternehmensteilen; und manch eine Fusion wurde zwar angedacht, aber dann gar nicht durchgeführt, weil man damit rechnen mußte, daß sie die Fusionskontrolle nicht passieren würde.

Entsprechendes gilt für die Strategie der Absatzsicherung durch vertikale Fusionen. Die aus der Vergangenheit mit nur geringem Wettbewerb ausgestattete Struktur sah ganz regelmäßig eine vertikale Aufspaltung der Wertschöpfungskette bei Strom und Gas als Normalfall an. Dies hing nicht zuletzt damit zusammen, daß in vielen Ländern die kommunale Komponente in der Energieversorgung eine große Rolle spielte. Unter den Bedingungen des Wettbewerbs mußten sich insbesondere in Ländern wie Deutschland, zum Teil auch in der Schweiz und in Österreich, kommunale Unternehmen die Frage stellen, ob sie eigentlich groß genug seien, um überleben zu können. Es lag nahe, daß man hier Anlehnung an größere Strom- und Gasversorgungsunternehmen suchte. Diese ihrerseits waren sehr darauf aus, durch Erwerb von Beteiligungen an Unternehmen, die über eine traditionelle Endverbraucherundschaft verfügten, etwas für die Sicherung des Absatzes ihrer Produkte zu tun. Die Frage, ob dieser Trend zur vertikalen Fusion volkswirtschaftlich sinnvoll ist oder nicht, wird unter Wettbe-

werbspolitikern kontrovers diskutiert. Die vertikale Strukturierung einer Wertschöpfungskette ist ja nicht naturgegeben oder gottgegeben. Veränderte Absatztechnologien (Informationstechnik), veränderte Produktionstechniken können dazu führen, daß die vertikale Gliederung sich unter dem Druck des Wettbewerbs ebenfalls verändert. So gibt es eine Reihe von Gründen, die für diese vertikalen Fusionen nicht nur aus betriebswirtschaftlicher, sondern auch aus volkswirtschaftlicher Sicht sprechen. Dem wird von der traditionellen Wettbewerbspolitik entgegengehalten, daß es sich bei diesen vertikalen Fusionen vor allem um die Sicherung von Märkten handele, d. h. um den Versuch der Ausschaltung des Wettbewerbs. Dies sei im Sinne des Wettbewerbsschutzes zu verdammen, und deshalb seien diese vertikalen Fusionen von der Fusionskontrolle zu untersagen. Diese Debatte ist keineswegs beendet.

11. Fazit der bisherigen Entwicklung

Es gibt (teilweise intensiven) Wettbewerb. Dennoch kann kaum bestritten werden, daß noch nicht alle Wettbewerbspotentiale ausgeschöpft sind. Schon die Erwartung eines intensiveren Wettbewerbs hat bei den meisten Unternehmen einen starken Rationalisierungsschub ausgelöst. Die Arbeitsproduktivität ist massiv gestiegen. Entsprechend sind Preise ganz überwiegend gesunken. Die Konzentration auf »Kernkompetenzen« ist Teil dieses Rationalisierungsprozesses.

Das Innovationspotential sowohl auf technischem Gebiet als auch auf institutionellem Gebiet hat sich durch die Liberalisierung stark vermehrt.

Als Folge des intensivierten Wettbewerbs ist es zu Konzentrationstendenzen gekommen. Diese können also nicht ins Feld geführt werden für die Behauptung, Wettbewerb finde nicht statt. Die Konzentrationsentwicklung wird zwar durch die Kartellbehörden gebremst, es ist aber insbesondere in den Fällen, in denen ein mörderischer Wettbewerb das Überleben kleinerer Unternehmen schwierig macht, nicht auszuschließen, daß neue Phänomene der Marktmacht – gerade auf Märkten mit homogenen Produkten – zu beobachten sind.

Andererseits geht die Konzentrationsentwicklung mit einem Wachstum der geographischen Ausdehnung der Märkte einher, so daß hier auch wieder Elemente einer weiteren Intensivierung des Wettbewerbs zu beobachten sind. Die Kartellbehörden tun sich angesichts dieses raschen Strukturwandels bei der Fusionskontrolle nicht leicht. Eine zuweilen zu statische Sicht der Dinge kann dazu führen, daß die Wettbewerbsbehörden zu einem Instrument der Rettung des Status Quo werden, was sicher nicht ihre ureigentliche Funktion ist.

Sollte es auf diesen Märkten mit homogenen Gütern bei intensivem Wettbewerb bleiben, so werden wir uns an eine hohe Preisvolatilität gewöhnen müssen.

C. Christian von Weizsäcker

Literatur

OBERENDER, P. (Ed.): Wettbewerb in der Versorgungswirtschaft. Berlin: Duncker & Humblot 2004

WEIZSÄCKER, C. C. VON: 'Kollektive Marktbeherrschung' im Rahmen der staatlichen und internationalen Fusionskontrolle. In: FRANZ, W., RAMSER, H. J., und STADLER, M. (Eds.): Fusionen. Wirtschaftswiss. Seminar Ottobeuren Bd. 31, 225—258 (2002)

Prof. Dr. C. Christian VON WEIZSÄCKER
Max-Planck-Institut
zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern
Kurt-Schumacher-Straße 10
53113 Bonn
E-Mail: weizsaecker@mpp-rdg.mpg.de

Eine universell gültige Strategie für energieeffiziente Gebäude und ihre praktische Umsetzung

Bruno KELLER (Zürich)

Mit 10 Abbildungen



Zusammenfassung

In einer Übersicht wird zuerst der Stellenwert der verschiedenen Faktoren im Energiebedarf eines Gebäudes beleuchtet. Für den wichtigsten Faktor, den thermischen Energiebedarf für Raumheizung und -kühlung, werden aufgrund einer elementaren Bilanzgleichung die Schlüsselparameter eines Raumes bestimmt. Die Leerlauftemperatur, d. h. der Temperaturverlauf eines Raumes unter dem Einfluß des Klimas allein, erweist sich als wichtigstes Charakteristikum, und der Einfluß der Schlüsselparameter auf die Leerlauftemperatur wird angegeben. Auf dieser Basis wird eine allgemeingültige Strategie für den Entwurf von Bauten mit niedrigem thermischen Energiebedarf in jedem beliebigen Klima entwickelt. Dies zeigt sowohl die Möglichkeiten als auch die Grenzen rein passiver Maßnahmen, es zeigt aber auch, daß man diese Strategie sehr wohl mit vorhandenen Technologien und zu vernünftigen Kosten umsetzen kann. So sind in Deutschland ohne weiteres Bauten mit einem spezifischen thermischen Energiebedarf von 30 kWh/m²a oder 3 l Öl/m²a möglich. Diesbezügliche Planungshilfsmittel werden vorgestellt.

Bauten, welche entsprechend dieser Strategie entworfen und realisiert werden, weisen eine sehr hohe Behaglichkeit und einen sehr geringen thermischen Rest-Energiebedarf auf. Es wird gezeigt, daß und wie man daraus neuartige, sanfte haustechnische Konzepte für die Deckung des Restbedarfes ableiten kann und wie diese funktionieren. Die Realisierbarkeit solcher Konzepte wird anhand mehrerer konkreter Bauten demonstriert. Schlußendlich werden die energiepolitischen Folgerungen für das Bauwesen gezogen.

Abstract

It is demonstrated, the thermal dynamic behaviour of a room to depend only on three key parameters. The free-run-temperature of a room, e.g. its temperature development under the influence of the climate alone, turns out to be the most important characteristic of a room in a given climate. On this base, an universally valid strategy for rooms and buildings with a lowest possible thermal energy- and power need is developed and illustrated. It is also shown, this optimization to be easily possible with the aid of simple diagrams based on two of the key parameters. Buildings optimised in such a way show in most climates a very low thermal power need. This has dramatic consequences for the satisfaction of the remaining needs by the HVAC. The HVAC equipment can thus be designed in a much softer and for human beings more agreeable way. Finally, these results are illustrated by real buildings in operation in Switzerland as well as in China. Some conclusions for the general energy discussion are indicated.

1. Einführung

Zweck eines jeden Gebäudes ist es, den Benutzern für ihre Arbeit und ihre Freizeit eine Zone hoher Behaglichkeit zu gewährleisten. Es ist nicht so, daß Gebäude zum »Energie sparen« da sind, sondern sie sollen diese Behaglichkeit gewährleisten, selbstverständlich mit möglichst geringem Energieaufwand. Von den Komponenten menschlicher Behaglichkeit sind vor allem der Bedarf nach

- angenehmer und ausgewogener Raumtemperatur,
- genügender und reiner Luft,
- angenehmer Luftfeuchtigkeit,
- genügendem Licht,
- Warmwasser

energetisch relevant, während sich der sehr wichtige Schutz gegen Lärm energetisch höchstens indirekt auswirkt.

Einen Überblick über den relativen Stellenwert der obigen Einflußfaktoren auf den Energiebedarf eines Gebäudes zeigt Abbildung 1. Dabei wurde bei der Raumheizung auch die thermische Aufbereitung der Luft eingeschlossen. Der Warmwasserbedarf bezieht sich auf ein Wohngebäude, bei einem Bürobau wäre er wesentlich geringer. Bei natürlicher Lüftung ist das Einsparvermögen infolge Ersatzes einer mechanischen Lüftung durch natürliche Lüftung angegeben. Je nach Qualität der Außenluft: Temperatur: zu heiß, zu kalt, Luftverunreinigungen und Umgebungsbedingungen: Bei Lärmimmissionen sind die Möglichkeiten für natürliche Lüftung jedoch von Beginn herein eingeschränkt. Um die Relationen noch deutlicher zu zeigen, ist auch der umgerechnete Energiebedarf eines sparsamen Automobils mit 5 l/100 km und 10000 km/Jahr, bezogen auf eine Wohnung von 150 m² Fläche angegeben. Die Daten beziehen sich auf Zürich.

Wie man sofort sieht, macht der thermische Energiebedarf für die Raumheizung, eventuell -kühlung, den Großteil aus. Dort liegt das größte Reduktionspotential, wie es bereits in der Abbildung 1 angedeutet ist. Im Vergleich dazu sind alle anderen Faktoren von untergeordneter Bedeutung. Erst wenn der thermische Energiebedarf der Bauten so stark wie angedeutet reduziert ist, erfahren die anderen Faktoren eine relative Erhöhung ihrer Bedeutung. Der Vergleich mit dem Fahrzeug zeigt aber, daß dann sowieso wesentlich weitergefaßte und grundsätzlichere Überlegungen einbezogen werden müßten.

Hier wird gezeigt werden, daß und wie man den thermischen Energiebedarf unter Einhaltung bester Komfortbedingungen reduzieren kann.

2. Die Schlüsselparameter eines Raumes

Es geht im folgenden darum, das dynamisch thermische Verhalten eines Raumes unter dem Einfluß des Klimas verstehbar zu machen. Anstatt sich in ein komplexes Raumsimulationsprogramm zu stürzen, wird hier eine elementare und damit allgemeingültige Bilanzgleichung aufgestellt. Diese reduziert die thermische Beschreibung eines Raumes auf das Wesentliche und gestattet damit, die Zusammenhänge zu verstehen. Selbstverständlich sind die Zusammenhänge wesentlich aufwendiger unter Berücksichtigung der ganzen instationären Pro-

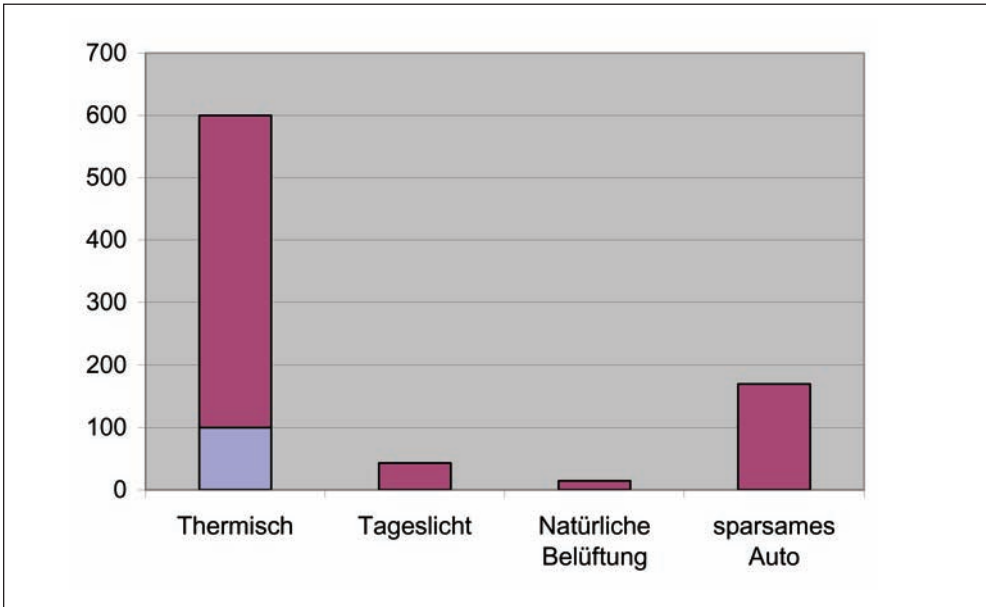


Abb. 1 Vergleich der Energiebedarfskomponenten in MJ/m²a

zesse in einem Forschungsprojekt untersucht worden. Es hat sich aber gezeigt, daß auch unter diesem umfassenderen Blick betrachtet, die elementare Darstellung das Wesentliche erfaßt. Interessenten können diese Untersuchungen in der Referenzliteratur nachlesen (BURMEISTER 1996, KELLER und MAGYARI 1998, KELLER 1997).

Die globale Leistungsbilanz eines Raumes erhält man so zu:

$$G \cdot I(t) + P_{\text{heiz/kühl}} + P_{\text{innQu}} - K \cdot [\mathcal{G}_i(t) - \mathcal{G}_a(t)] = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{d\mathcal{G}_i(t)}{dt} \quad [1]$$

mit den Abkürzungen:

$$K = \frac{1}{\sum_k A_{ak}} \cdot \left[\sum_k A_{ak} \cdot U_k + (c \cdot \rho)_{\text{Luft}} \cdot \dot{V} \right]: \text{verallgemeinerter Verlustfaktor,} \quad [2]$$

$$G = \frac{\sum_l A_{\text{transp}} \cdot g_l}{\sum_k A_{ak}}: \text{mittlere Gesamtenergietransmission der Hülle,} \quad [3]$$

$$C = \frac{\sum_l A_{il} \cdot c_l \cdot \rho_l \cdot d_l}{\sum_k A_{ak}}: \text{Speicherkapazität, bezogen auf die Außenfläche.} \quad [4]$$

Dieser Ausdruck ist exakt für dünne Speicherschichten. Für endliche dicke Schichten wird der Ausdruck komplizierter, der wesentliche Inhalt bleibt aber der gleiche (BURMEISTER 1996, KELLER und MAGYARI 1998, KELLER 1997).

- $\vartheta_i(t)$: mittlere innere Raumtemperatur,
 $\vartheta_e(t)$: Außenlufttemperatur,
 $I(t)$: solare Einstrahlungsintensität auf die Fassade [W/m^2],
 U : U-Wert [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$],
 \dot{V} : Außenluftvolumenstrom (m^3/s),
 A_e : Fläche der Außenelemente,
 A_i : Innenoberflächen,
 A_{trans} : Flächen der strahlungsdurchlässigen Elemente: Verglasungen, etc.,
 g : Gesamtenergietransmission einer Verglasung,
 C : flächenbezogene spezifische Wärmekapazität [$\text{J}/\text{m}^2\text{K}$],
 c : massenbezogene spezifische Wärmekapazität [J/kgK],
 d : Schichtdicke [m],
 ρ : Dichte [kg/m^3].

Eine leichte Umformung liefert bereits die wesentlichen Zusammenhänge:

$$\vartheta_i(t) + \frac{C}{K} \cdot \frac{d\vartheta_i(t)}{dt} = \vartheta_a(t) + \frac{G}{K} \cdot I(t) + \frac{P_{\text{immOu}}}{K} + \frac{P_{\text{heiz/kühl}}}{K} \quad [5]$$

Diese Gleichung zeigt bereits alles Wesentliche:

- Die Entwicklung der Raumtemperatur (linke Seite) ist bestimmt durch die äußeren Einflüsse: Klima, innere Quellen, Heiz- oder Kühlelemente (rechte Seite) und zwei Schlüsselparameter.
- Der eine Schlüsselparameter ist:

$$\frac{C}{K} = \tau = \text{Zeitkonstante des Raumes (in s oder h)}. \quad [6]$$

Er bestimmt die »Raumantwort«.

- Der andere Schlüsselparameter ist:

$$\frac{G}{K} = \gamma = \text{Strahlungseinfluß (in } \text{m}^2\text{K/W)}. \quad [7]$$

Er bestimmt das Maß, mit welchem die Auswirkung der Außenlufttemperatur durch den Einfluß der Einstrahlung in den Raum korrigiert wird.

- Innere Quellen (Menschen, Apparate, Beleuchtung) und Heiz- oder Kühlelemente wirken sich nicht einfach mit ihrer Leistungsdichte P , sondern mit dem Quotienten P/K aus.

Läßt man die inneren Quellen sowie die haustechnischen Elemente beiseite, so erhält man die Differentialgleichung für die Entwicklung der Raumtemperatur unter dem Einfluß des Klimas allein, die sogenannte »Leerlauftemperatur« (LLT). Deren Verlauf ist offensichtlich vollständig durch das Klima $\vartheta_a(t)$, $I(t)$ und durch die beiden Schlüsselparameter γ und τ bestimmt.

Nimmt man in einer ersten Näherung die beiden Parameter mindestens für eine begrenzte Zeit als konstant an, so erhält man als Lösung:

$$\vartheta_i(t) = \vartheta_i(t_{st}) \cdot e^{-\frac{t-t_{st}}{\tau}} + \frac{1}{\tau} \cdot \int_{t_{st}}^t e^{-\frac{(t-t')}{\tau}} \cdot \Phi(t') \cdot dt' \quad [8]$$

mit $\Phi(t) = \vartheta_a(t) + \gamma \cdot I(t) =$ Meteo-Funktion. [9]

Das Faltungsintegral zeigt deutlich, daß sich der Raum an weiter zurück liegende Wetterzustände mit einem exponentiell abklingenden Gedächtnis »erinnert«. Die Raschheit dieses Abklingens oder die »Gedächtnislänge« wird durch die Zeitkonstante τ bestimmt und der Einfluß der Einstrahlung durch γ .

Die Bedeutung der Schlüsselparameter:

Die Zeitkonstante $\frac{C}{K} = \tau$ wird also nicht nur durch die Speicherfähigkeit des Materials (Wärmeeindringzahl $b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$ resp. $c \cdot \rho \cdot d$) und die Größe der inneren Oberflächen A_i bestimmt, sondern auch durch den Verlustfaktor K . Eine geringe Speicherfähigkeit kann also im Prinzip durch einen entsprechend reduzierten Verlustfaktor kompensiert werden.

Der Strahlungseinfluß $\frac{G}{K} = \gamma$ wird also nicht nur durch den Anteil der Verglasungen an der Fassade und deren Durchlässigkeit g bestimmt, sondern auch durch den Verlustfaktor K . In gut gedämmten Räumen wirkt sich also die Einstrahlung stärker aus als in weniger gut gedämmten.

Die Tatsache, daß beide Schlüsselparameter Quotienten darstellen, eröffnet dem gestaltenden Architekten wesentlich mehr Möglichkeiten, als ihm in der »Energie-Literatur« gemeinhin zugestanden werden.

3. Die Strategie

Solange die LLT im Komfortbereich verläuft, besteht kein Heiz- oder Kühlbedarf. Also gilt es, die beiden Schlüsselparameter so zu wählen, daß dies im Laufe eines Jahres möglichst häufig der Fall ist.

Dies ist bereits die Strategie in ihrer allgemein gültigen Form. Da sie allein auf dem Energiesatz (und der Wärmeleitungsgleichung von FOURIER) beruht, ist sie in der Tat allgemein gültig. Allerdings wird man Wege finden müssen, um die Parameter zu optimieren.

Abbildung 2 zeigt die LLT für verschiedene Werte von γ und τ . Daraus ist ersichtlich und läßt sich analytisch ableiten (Abb. 3):

- daß γ sowohl den Tagesmittelwert als auch die Tagesamplitude verändert: je größer γ , desto höher der Tagesmittelwert und desto größer die Tagesamplitude;
- daß τ sich nur auf die Tagesamplitude auswirkt: je größer τ desto kleiner die Amplitude.

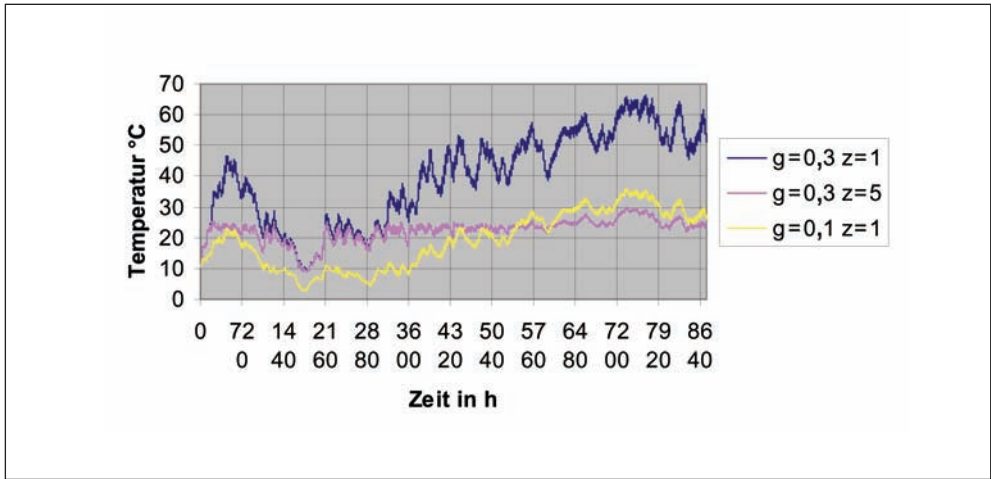


Abb. 2 Leerlaufemperatur für verschiedene γ -Werte mit und ohne Sonnenschutz. Zürich Süd $\tau = 200$ h, $\gamma = 0,1/0,3$

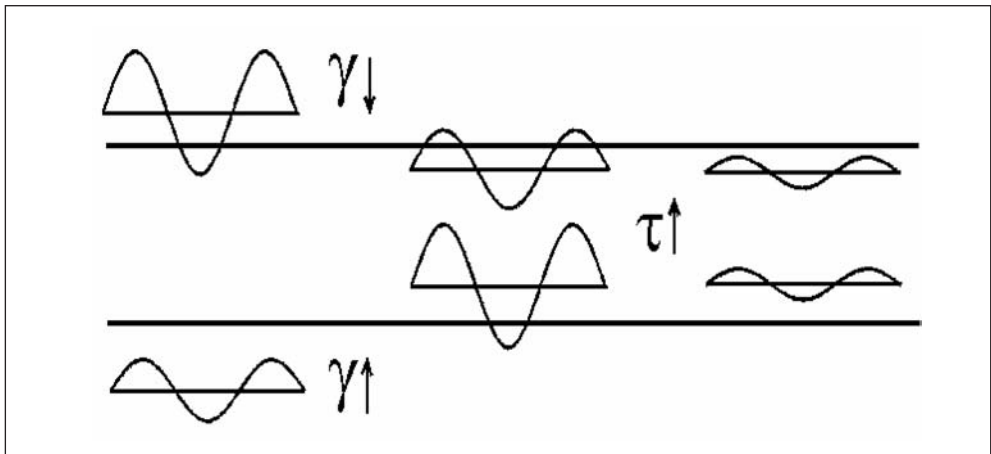


Abb. 3 Die Auswirkung der Parameter γ und τ auf die Leerlaufemperatur

4. Ein Planungshilfsmittel

Immer dann, wenn die LLT eine Komfortgrenze erreicht, tritt die Haustechnik in Aktion, um ein Über- oder Unterschreiten zu verhindern:

$$\vartheta_i(t) \Rightarrow \vartheta_{\min/\max} \frac{d\vartheta_i}{dt} = 0; \quad \vartheta_i = \vartheta_{\min/\max} = \vartheta_a(t) + \gamma \cdot I(t) + \frac{P_{\text{heiz/kühl}}(t)}{K} \quad [10]$$

also:

$$P_{\text{heiz/kühl}}(t) = K \cdot [\vartheta_{\min/\max} - \vartheta_a(t) - \gamma \cdot I(t)] = K \cdot \Pi_{\text{heiz/kühl}}(\gamma, \tau) \quad [11]$$

$P_{\text{heiz/kühl}} > 0$: Heizen; $P_{\text{heiz/kühl}} < 0$: Kühlen.

Die Funktion der Haustechnik besteht also darin, den Einfluß des Klimas so zu korrigieren, daß die Raumtemperatur im Komfortbereich bleibt. Es handelt sich um eine Temperaturkorrektur: $\Pi_{\text{heiz/kühl}}(\gamma, \tau)$. Das Maximum dieser Korrektur $\Pi_{\text{heiz/kühl max}}(\gamma, \tau)$ über ein Jahr entspricht in etwa (abgesehen von statistischen Überlegungen) der Auslegungstemperaturdifferenz, welche die Maximalleistung, also die Größe der haustechnischen Anlagen bestimmt.

Aus den erforderlichen Heiz- resp. Kühlleistungen $P_{\text{heiz/kühl}}$ resp. den entsprechenden Temperatur-Korrekturen $\Pi_{\text{heiz/kühl}}(\gamma, \tau)$ läßt sich der Energiebedarf als Integral über die Zeit berechnen:

$$E_{\text{heiz/kühl}} = \int_{\text{Jahr}} P_{\text{hc}}(t) \cdot dt = K \cdot \int_{\text{Jahr}} \Pi_{\text{heiz/kühl}}(\gamma, \tau) \cdot dt = K \cdot \Omega_{\text{heiz/kühl}}(\gamma, \tau) \quad [12]$$

Die Funktion $\Omega_{\text{heiz/kühl}}(\gamma, \tau)$ entspricht einem Zeitintegral über Temperaturdifferenzen und damit den traditionell verwendeten Heizgradtagen. Im Gegensatz dazu berücksichtigt sie allerdings die Auswirkung der Einstrahlung insoweit, als diese innerhalb der Komfortgrenzen genutzt werden kann.

Die zu installierende Leistung und die aufzuwendende Energie stellen also beide Produkte dar:

$$P_{\text{heiz/kühl max}} = K \cdot \Pi_{\text{heiz/kühl max}}(\gamma, \tau) \quad E_{\text{heiz/kühl}} = K \cdot \Omega_{\text{heiz/kühl}}(\gamma, \tau) \quad [13]$$

Um ein Produkt zu minimieren, ist es notwendig, beide Faktoren zu minimieren. Der Faktor K läßt sich leicht innerhalb der gegebenen technischen, ökonomischen und architektonischen Randbedingungen minimieren. Etwas schwieriger ist dies mit den beiden Funktionen und $\Omega_{\text{heiz/kühl}}(\gamma, \tau) \cdot \Pi_{\text{heiz/kühl max}}(\gamma, \tau)$. Hier hilft aber die Strategie:

- Die LLT ist in einem gegebenen Klima eindeutig durch γ und τ bestimmt.
- Solange die LLT im Komfortbereich verläuft, braucht es weder Heiz- noch Kühlenergie.
- Also wird die Kombination von γ und τ , welche die längste Aufenthaltsdauer der LLT im Komfortbereich ergibt, das Optimum darstellen. Aus Kontinuitätsgründen weist diese Kombination mit Sicherheit auch die geringsten Kompensationsbedürfnisse, also ein Minimum von $\Pi_{\text{heiz/kühl max}}(\gamma, \tau)$, auf.

Da man aus Jahressätzen von stündlichen Wetterdaten leicht den Verlauf der LLT für jede Kombination von γ und τ numerisch berechnen kann, läßt sich also auch die Anzahl der Stunden im Komfortbereich bestimmen, und diese Zahl N_0 gilt es zu maximieren. Eine Darstellung

von N_0 in Funktion von γ und τ erlaubt damit eine sehr einfache und direkte Ablesung der optimalen Werte: Klimadiagramme.

Abbildungen 4–6 mögen dies erläutern. Auf einen Blick lassen sich daraus bereits einige interessante Schlüsse ziehen:

- Während ohne Sonnenschutz (variables Element) das beste γ praktisch unabhängig von τ ist und einen relativ kleinen Wert aufweist, erlaubt die Verwendung eines (optimal geregelten) Sonnenschutzes eine Vergrößerung des Wertes von γ und zudem eine starke Steigerung der Nullenergiestunden N_0 : von 2000 auf 3800 (Reduktionsfaktor $z = 2$, innerer Sonnenschutz) auf 6100 (Reduktionsfaktor $z = 5$, äußerer Sonnenschutz).
- Mit der Nutzung eines variablen Sonnenschutzes (generell eines variablen Elementes) beginnt sich die Zeitkonstante erst richtig auszuwirken. Und zwar erweist sich in diesem Klima eine größere Zeitkonstante als vorteilhaft.

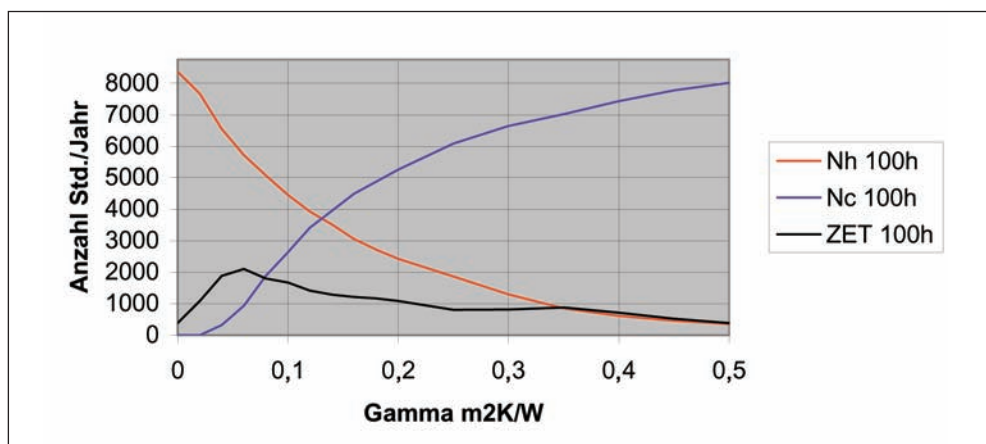


Abb. 4 Heiz-, Kühl- und Nullenergiestunden (ZET) Zürich Süd $\tau = 100$

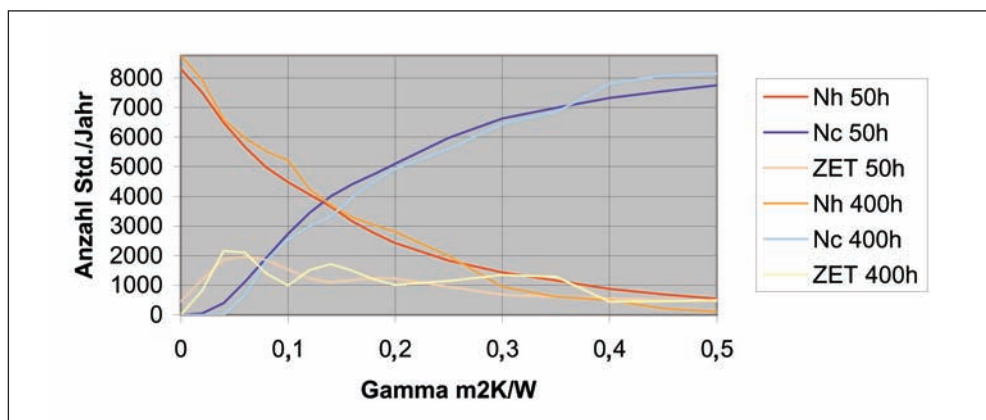


Abb. 5 Zeitkonstante und Klimadiagramme

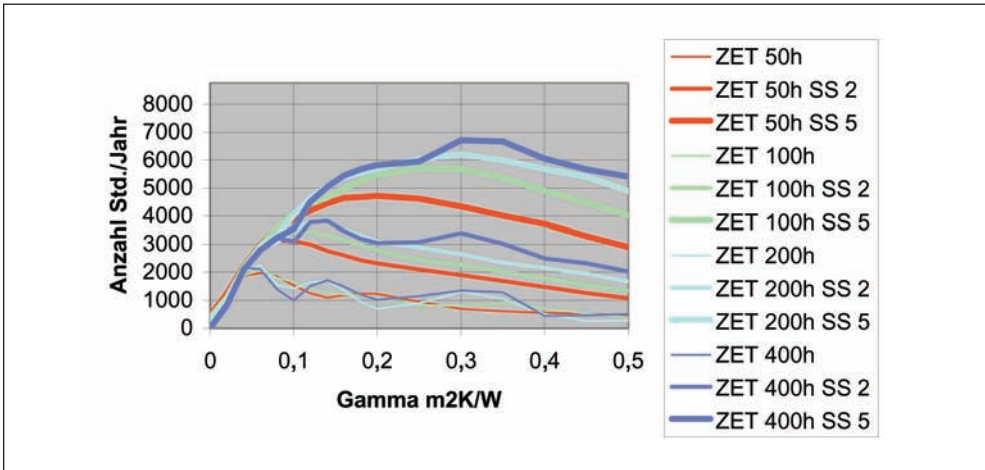


Abb. 6 Klimadiagramme (Zürich Süd): Zeitkonstante und Sonnenschutz

Wie man sieht, erlaubt eine solche Darstellung nicht nur eine direkte und einfache Wahl der optimalen Schlüsselparameter, sondern läßt auch interessante Schlüsse zu, welche bei den üblichen vielparametrischen Simulationsprogrammen im Wald der Parameter untergehen und damit nicht sichtbar würden (BURMEISTER und KELLER 1997). Manche der so möglichen Schlüsse sind deshalb bis heute z. B. den zuständigen Normenkommissionen verborgen geblieben. Eine transparente Optimierung der Gebäudehülle: G, K und der Gebäudestruktur: C kann also erst mit diesen Klimadiagrammen erfolgen.

Selbstverständlich läßt sich diese Methode auf Grund ihrer Allgemeingültigkeit auf jedes Klima anwenden und erlaubt, diesbezügliche Schlüsse zu ziehen: Es wäre interessant zu untersuchen, inwieweit die historische Entwicklung des Bauens in einem Klima zu eben diesen Optimalwerten geführt hat oder nicht.

5. Die Konsequenzen für die Rest-Energieversorgung

Die Strategie und die Klimadiagramme gestatten in jedem Klima, ein Gebäude so zu optimieren, daß sein thermischer Leistungs- und Energiebedarf ein Minimum erreicht. Ob dieses Minimum auch einem ökonomischen Optimum entspricht und ob und wie es realisiert werden kann, hängt selbstverständlich noch von den Randbedingungen ab: Nutzerbedürfnisse, Architektur, Wirtschaftlichkeit.

Würde man nun den verbleibenden Rest-Energiebedarf einfach durch redimensionierte klassische Anlagen: Heizung, Klimaanlage decken, so würde man sich eine große Chance vergeben. Etwa so wie dies die USA unlängst mit ihrem »Green Building« in Beijing getan haben. Es gilt vielmehr, die neuen energetischen Dimensionen optimal zu nutzen.

Um dies zu verstehen muß zuerst Kritik an der traditionellen Haustechnik geübt werden:

- Die klassische Heizung eignet sich praktisch nur für Heizung und nicht für Kühlung. Letztere erfordert eine zusätzliche Anlage: Klimaanlage. Deshalb besteht z. B. für Klimaanlagen in der Schweiz eine restriktiv angewandte Bewilligungspflicht.
- Geheizt wird meist, abgesehen von Bodenheizungen, mit relativ kleinflächigen und deshalb mit relativ hoher Temperatur betriebenen Heizelementen.
- Gekühlt wird meist mit kalter Luft, welche mit niedriger Temperatur in den Raum eingeblasen und durch die so erzeugte Turbulenz mit der vorhandenen Luft vermischt wird.
- Der Wärmeübergang vom und zum Bewohner geschieht konvektiv über die Luft.
- Die hohe Turbulenz erzeugt unangenehme Empfindungen (»Klimagefühl«) und meist auch Geräusche und Zugscheinungen, wie die Kröhling-Studie in den 80er Jahren nachgewiesen hat.
- Die geringe Transportkapazität von Luft: $c \cdot \rho$ bedingte große Luftmengen, und, um diese in Grenzen zu halten, wird mit einem erheblichen Umluftanteil gearbeitet, verbrauchte Luft also quasi rezykliert.
- Die großen Luftmengen und die dadurch erforderlichen Rohrsysteme haben einen erheblichen Platzbedarf und Kosten zur Folge.

Die Mehrzahl dieser Punkte wird durch den relativ großen Leistungsbedarf traditioneller Bauten und Räume bedingt. Dazu kommt, daß aus unerfindlichen oder nur historisch erklärbaren Gründen das ungeeignete Medium Luft zum Energietransport verwendet und zudem der Transfer mit der ineffizienten Konvektion anstatt mit der effizienteren Strahlung bewerkstelligt wird.

Will man also einen Quantensprung in der Haustechnik erreichen, so müssen diese Punkte alle zusammen unter dem Blickwinkel des wesentlich reduzierten Energie- und Leistungsbedarfs neu betrachtet werden. Eine Schlüsselgröße ist dabei der auf die Grundfläche (oder die Deckenfläche) bezogene maximale spezifische Leistungsbedarf. Dieser bestimmt nämlich die maximal notwendige Temperaturdifferenz zum Raum, welche nötig ist, um die benötigte Leistung einzubringen. Die Werte dazu liegen:

- bei älteren Bauten bei $60\text{--}80 \text{ W/m}^2$ für Heizung,
- bei heutigen moderneren $40\text{--}60 \text{ W/m}^2$,
- bei gesamtoptimierten Bauten $15\text{--}25 \text{ W/m}^2$.

Für die Kühlung können die Werte bei $50\text{--}100 \text{ W/m}^2$, respektive $30\text{--}50 \text{ W/m}^2$ liegen, wobei innere Lasten eine große Rolle spielen.

Der verbleibende Restbedarf soll also

- mit möglichst geringen Differenzen zur Behaglichkeitstemperatur eingebracht werden,
- dies soll ohne Zug, Turbulenz und Geräusch, vorzüglich durch die leistungsfähigere Strahlung bewerkstelligt werden,
- der Energietransport soll mit Wasser, anstatt mit Luft: Transport-Kapazitätsverhältnis 1: 3520 geschehen,
- Luft soll nur für lufthygienische Zwecke und dazu möglichst effizient und kostengünstig (Verteilsystem) eingesetzt werden,
- die Elemente sollen, wenn möglich, sowohl Heiz- wie auch Kühlfunktion erfüllen können.

Der wesentlich geringere Heiz- und Kühlleistungsbedarf ermöglicht diesbezüglich neue Wege.

6. Die neue Haustechnik

Noch ohne die oben erläuterten Grundlagen zur Optimierung haben in Skandinavien und in der Schweiz zwischen 1985 und etwa 1995 eine Reihe von Entwicklungen in Richtung dieser Ziele stattgefunden. Heute verfügt man mit den Klimadiagrammen über eine wesentlich bessere und universelle Grundlage. Ortspezifische und auf empirischen Arbeiten beruhende Strömungen wie das »MINERGIE«-Haus oder das »PASSIV«-Haus sind darin eingebettet und haben so eine theoretisch fundierte Grundlage bekommen.

Ohne auf diverse Zwischenstufen einzugehen, kann man heute sagen, daß in fast allen Klimaregionen der Welt, mit Ausnahme der sehr feuchten Zonen, folgendes System die Grundlagen am besten ausnützt (Abb. 7):

- Heizen und Kühlen *via* Strahlung durch die Decke, betrieben durch eingelegte wasserführende Rohre, unter Ausnützung des relativ hohen Speichervermögens der Decken (Beton),
- Lüfthygiene durch Frischluft, eingebracht nach dem Verdrängungs- oder Quell-Lüftungsprinzip: Zufuhr aus dem Boden oder in Bodennähe, leicht niedrigere Lufttemperatur führt zu einer stabilen Schichtung, woraus sich die Wärmequellen Mensch, Apparate etc. durch ihren eigenen Auftrieb bedienen. Die verunreinigte und erwärmte Luft sammelt sich unter der Decke und wird von dort weggeführt. Eine Rückzirkulation ist meist nicht zu vermeiden, erlaubt trotzdem aber eine im Vergleich zur turbulenten Verdünnungslüftung wesentlich höhere Effizienz, typische Luftwechselzahlen liegen bei $0,5\text{--}1,5\text{ h}^{-1}$ im Vergleich zu $3\text{--}5\text{ h}^{-1}$.

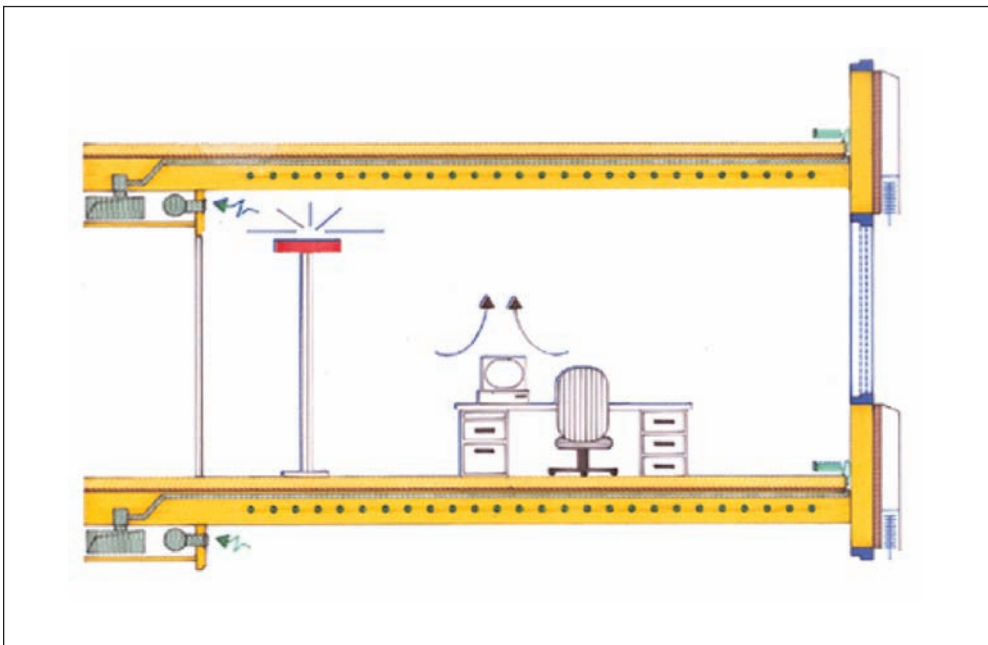


Abb. 7 Prinzip moderner Haustechnik: Thermisch kontrollierte Decken und Verdrängungslüftung

Die niedrigen spezifischen Leistungsdichten für Heizen und Kühlen erlauben Vorlauftemperaturen für das Heizen von 24–27 °C, für das Kühlen von 19–24 °C, was jeden negativen Einfluß auf die Bewohner vermeidet (heißer Kopf etc.). Durch die Lage der Vorlauftemperatur im oder nahe am Komfortbereich werden solche Decken weitgehend selbstregulierend und verlieren damit ihre berichtigte Trägheit, sofern man eine gewisse Variation der Raumtemperatur innerhalb der Komfortgrenzen zuläßt.

Nach verschiedenen Zwischenstufen ging ein erster solcher Bau in Mitteleuropa in der Schweiz im Jahr 1993 (Abb. 8) in Betrieb und ist heute noch für seinen hohen Komfort und geringen Energiebedarf bekannt. Die Gesamtkosten waren zudem eher etwas kleiner als für einen traditionellen Bau vergleichbaren Komforts. Inzwischen ist diese Methode, nach an-



Abb. 8 Das erste vollständig ausgerüstete Gebäude: Sarinaport Freiburg (CH), 1993. (A) Außenansicht und (B) Innenansicht



Abb. 9 Der SUNRISE-Tower in Zürich



Abb. 10 TIPTOP-Apartments in Beijing

fänglichen Grabenkämpfen, geradezu Mode geworden, wenn auch noch nicht alle Anwender sie verstanden haben. In der Schweiz sind inzwischen weit über 1000 Minergiebauten in Betrieb, und rund 9 % aller Neubauten werden nach diesem Prinzip eingegeben. Auch die beiden höchsten Bauten der Schweiz, der SUNRISE-Tower in Zürich und der EXHIBITION-Tower in Basel, werden so betrieben (Abb. 9).

7. Schlußfolgerungen

Es ist also heute möglich, Bauten mit sehr hohem Komfort und sehr niedrigem thermischem Energiebedarf zu sehr vernünftigen Kosten mit heute verfügbaren Technologien zu erstellen. Diese weisen neben eher reduzierten Kosten zudem eine erhöhte Fehlertoleranz auf, weil sie weitgehend autoregulatorisch reagieren. In Anbetracht der großen Anzahl vorhandener gut funktionierender solcher Bauten erübrigen sich diesbezügliche »Forschungsprojekte« mit Pilotbauten etc. Selbstverständlich können in einzelnen Aspekten noch Verbesserungen erwartet werden, aber das Wesentliche ist getan. Inzwischen sind sogar in China in Beijing mehr als 50000 m² Wohnfläche auf diese Weise realisiert worden und in Betrieb. Sie haben im Bauproduktmarkt und in den Medien ein sehr großes Echo und reißenden Absatz gefunden (Abb. 10).

Für Neubauten scheint damit eine tragfähige Lösung gefunden und auch in einem Land mit einem extrem großen Neubaubedarf anwendbar zu sein.

In Anbetracht dessen, daß in Europa pro Jahr (ohne neue Bundes- und Ostländer) nur etwa 1–1,5 % des Baubestandes, inklusive Neubau, Renovation, Umbau pro Jahr verändert werden, kann allerdings kein unmittelbarer, rasch wirksamer und großer Effekt auf den Energiebedarf des Gebäudeparks erwartet werden – und dies bei einem Anteil von etwa 40 % am Gesamtverbrauch eines Landes. Besser angepaßte technische Möglichkeiten für den Einsatz im Renovations- und Umbau müssen noch entwickelt werden. So oder so wird aber die Transformation des Gebäudeparks in Europa sehr viel Zeit erfordern, und diesbezügliche Illusionen sollte man deshalb vermeiden. Für das Bauwesen gilt ganz besonders der Satz von Immanuel KANT: »Unser Entscheiden reicht weiter als unser Erkennen.«

Für Bauten mit einem thermischen Restbedarf von 80–150 MJ/m²a (1/5–1/8 des heutigen Durchschnitts) stellen sich zudem neue Fragen: Wie weit soll der Bedarf noch heruntergeschraubt werden, wenn man damit den Bedarf für den Haushalt und für die Mobilität vergleicht (Abb. 1)?

Wie stellt sich die Position von Europa mit einem Pro-Kopf-Gesamtleistungsbedarf von etwa 6000 W (40 % davon thermischer Gebäudebetrieb) und einem eher stagnierenden Baumarkt im Vergleich dar, einerseits zu den USA mit 11 500 W/Kopf und andererseits zu China mit einem sehr rasch wachsenden Bedarf von zur Zeit ca. 900 W/Kopf? Es könnte sich erweisen, daß die wesentlichen Investitionen in energiesparsames Bauen nicht primär im alten Europa, sondern in den großen Schwellenländern mit rasch wachsendem Energiebedarf getätigt werden sollten, um mit begrenzten Mitteln innert nützlicher Frist global den besten Effekt zu erreichen. Dort ist zudem die Reaktionszeitkonstante für Veränderungen wesentlich geringer.

Literatur

- BURMEISTER, H.: Die quantitative gebäuderelevante Darstellung von Klimadaten. Die Klimaflächen. ETH Zürich, Dissertation Nr. 11586, Zürich: 1996
- BURMEISTER, H., und KELLER, B.: Analyse und Darstellung der Wechselwirkung zwischen Klima und Gebäude: Klimaflächen. Teil I: Grundlagen, Teil II: Interpretation und strategische Aussagen. *Bauphysik 19*, 1–6 (Teil I), *Bauphysik 19*, 46–49 (Teil II), Berlin: Ernst & Sohn 1997
- KELLER, B.: *Klimagerechtes Bauen*. Stuttgart: B. G. TEUBNER 1997 (vergriffen)
- KELLER, B., und MAGYARI, E.: Eine allgemeingültige Strategie für die gleichzeitige Minimierung des Energie- und Leistungsbedarfes für Heizen und Kühlen. ETH Zürich, Forschungsbericht 5/1998, Zürich: 1998

Prof. Dr. Bruno KELLER
Institut für Hochbautechnik
ETH-Hönggerberg, HIL E46.3
CH-8093 Zürich
Schweiz
Tel: +41 1 6333631
Fax: +41 1 6331041
E-Mail: b.keller@hbt.arch.ethz.ch

Fuel Cells: State of the Art and Future Developments

Holger APFEL, Carsten CREMERS, and Ulrich STIMMING (Garching)

With 23 Figures and 2 Tables



Abstract

Providing electricity and heat is one of the key issues of our civilization today and in the future. Conserving non-renewable resources and reducing emissions become more and more important in the development of energy converters. Fuel cells are one possibility: They convert energy with high efficiency and extremely low emission of pollutants. In this paper construction and operation of fuel cells are explained briefly. Applications for high (SOFC) and low (PEM) temperature fuel cells are shown by means of several existing prototypes. The main issues inhibiting higher power densities are discussed and a possible solution by an enhanced structure of the catalysts is presented.

Zusammenfassung

Die Bereitstellung von Elektrizität und Wärme ist und bleibt eine wesentliche technologische Aufgabe der zivilisatorischen Gesellschaft. Ressourcenschonung und Minimierung der Schadstoffemissionen gewinnen zunehmend an Bedeutung. Brennstoffzellen sind Energiewandler, die mit hoher Effizienz bei extrem geringen Schadstoffemissionen arbeiten. Aufbau und Funktionsweise von Brennstoffzellen werden kurz vorgestellt. Es werden Anwendungsbeispiele für Hochtemperatur-Brennstoffzellen (z. B. SOFC) für die stationäre Erzeugung von Elektrizität und Wärme aus Erdgas und für Niedertemperatur-Brennstoffzellen (z. B. PEMFC) mit flüssigen Energieträgern im Fahrzeugbereich gegeben. Für die Entwicklung geeigneter Brennstoffzellensysteme muß die Peripherie, insbesondere die Gasaufbereitung, so gestaltet werden, daß der hohe elektrische Wirkungsgrad und die Schadstoffarmut erhalten bleiben. Die mikroskopischen Prozesse in Brennstoffzellen werden beleuchtet, und es wird, anhand einer potentiell deutlich verbesserten Katalysatorstruktur, ein möglicher Weg zur Überwindung momentaner Schwierigkeiten bei der Entwicklung von Brennstoffzellen diskutiert.

1. Introduction

Energy conversion systems are the principal source of pollution on our planet. In the industrialized countries, the electric power plants that convert chemical energy in electrical energy are the main producers of CO₂ emissions, private cars, on the other hand, are the principal producers of CO and NO_x emissions. Figure 1 illustrates this situation for an industrialized country such as Germany (given for Germany in 2001, *Umweltbundesamt*).

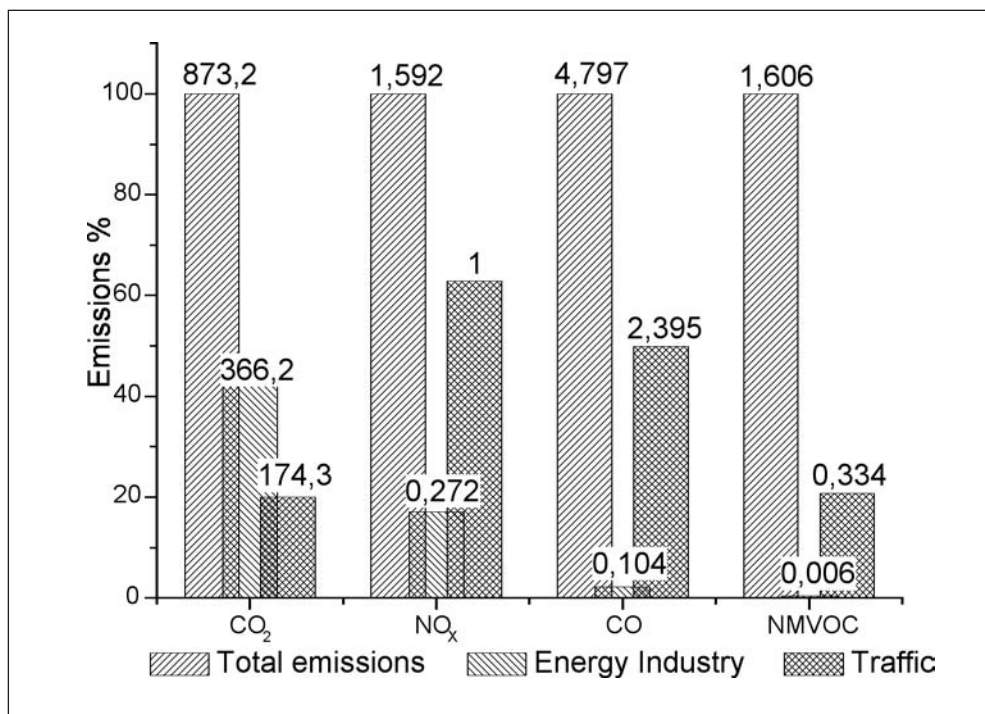


Fig. 1 Emissions generated in Western Germany in 2001 with emphasis on power plants and road traffic in relation to overall emissions (*Umweltbundesamt*). All numbers in million tons. NMVOC = Non-methane volatile organic compounds.

The concentration of CO₂ in the earth's atmosphere increased considerably since the last century as a consequence of industrialization (see Fig. 2); it is considered the main reason for the greenhouse effect leading to an increase of the earth's surface temperature. Furthermore power plants and cars are important consumers of mineral oils and natural hydrocarbons, which have a higher potential as a raw material for the chemical industry than as fuel for, e.g., the production of electricity. Nowadays the air pollution and the diminution of the earth's resources of hydrocarbons are two main topics in politics and economics and regenerative energy sources are sought after. A better energy conversion technology would be very attractive, as it would reduce both the air pollution and the indiscriminate destruction of precious chemicals.

One possible technology to achieve this are fuel cells. Fuel cells convert the chemical energy of a fuel such as methane directly into electrical energy with a better yield and much low-

er emission levels than any other energy conversion system (KORDESCH and SIMADER 1996, LEDJEFF 1995). Although the principal operation of a fuel cell is known since the last century, the necessary technology for producing fuel cell systems of high efficiency, acceptable costs and at an industrial level has only been developed in the last few decades.

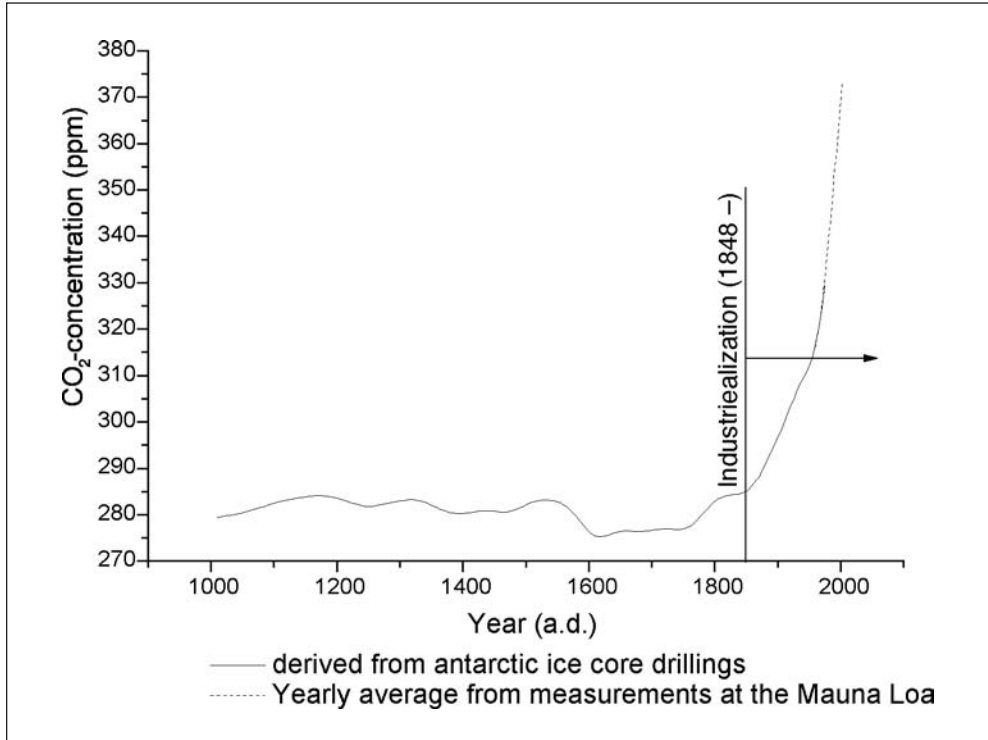


Fig. 2 CO₂ concentration in the earth's atmosphere as a function of time (*Umweltbundesamt*)¹

2. Fuel Cells

2.1 Functions

The principle operation of a fuel cell is comparable to that of a battery. In contrast to batteries – where the chemical energy is stored in substances inside the battery – fuel cells are just devices where the conversion takes place. The reagents are stored externally and have to be

1 Historical CO₂ records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. Cores taken from the Law Dome, Antarctica (66;44 S, 112;50). Data downloaded on the 19. 1. 2004 from <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/lawdome.html>. Measurements of the CO₂ concentrations in the in atmosphere at Mt. Mauna Loa (Latitude:19.539, Longitude:155.578, Hawaii). Data downloaded on the 16. 1. 2004 from <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.combined.dat>.

supplied continuously to the fuel cell in order to obtain electricity. Thus, fuel cells are systems that convert chemical energy directly into electricity in an invariant electrochemical set-up. Figure 3 schematically shows the principle of a fuel cell with a proton conducting electrolyte, hydrogen as fuel and oxygen as oxidant.

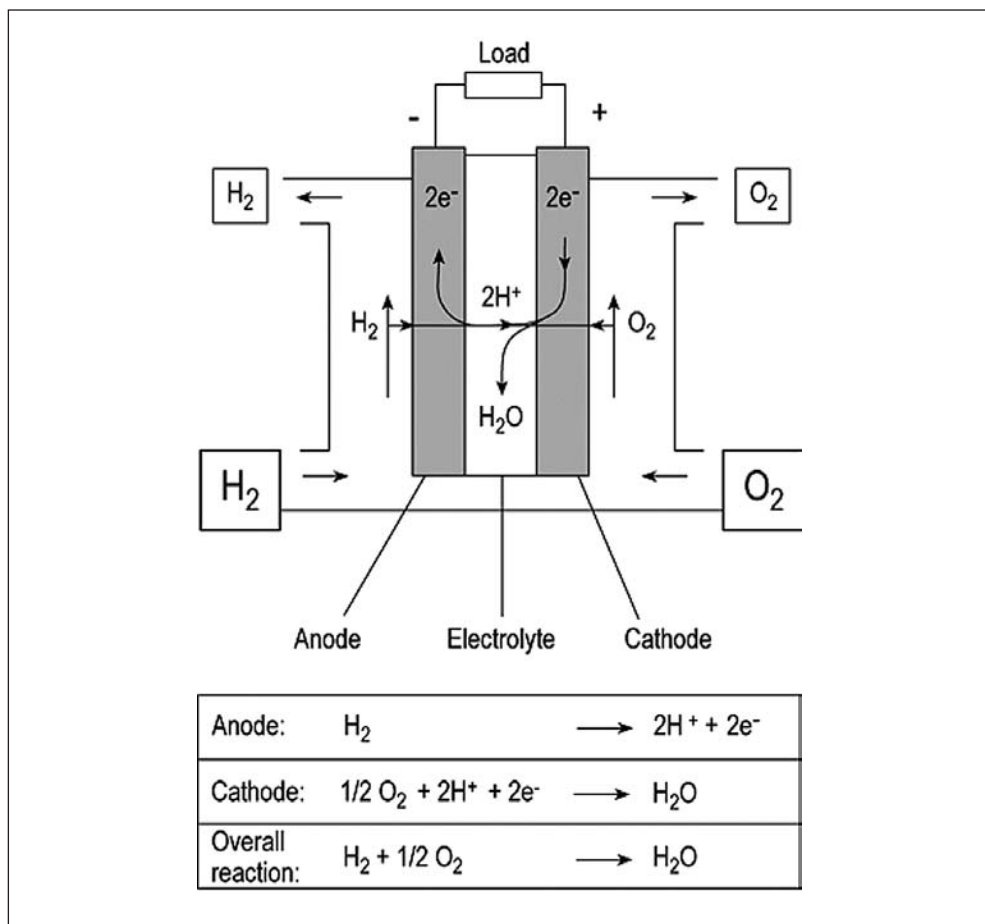


Fig. 3 Sketch of the principal operation of a fuel cell: Two electrodes are separated by a gastight electrolyte. The fuel (H_2) is supplied at the anode, where it is oxidized releasing electrons. The oxidant (O_2) is supplied at the cathode, where it is reduced consuming electrons. Hydrogen and oxygen are supplied to porous electrodes; the gases diffuse through the electrode to the electrode – electrolyte interface. This is the reaction zone where the gases are consumed. The oxygen ions on the cathode react with the hydrogen ions, which permeate the electrolyte and form water. The electrons stripped of the hydrogen during ionization cannot permeate the electrolyte; for them the only way to reach the cathode is by an external electron-conducting path. Work is performed as soon as a suitable load is introduced into this path.

2.2 Efficiency

Because of the direct energy conversion fuel cells work at a higher efficiency than energy conversion processes which involve a conventional heating cycle as the latter are limited by the Carnot cycle's efficiency. This is illustrated in Figure 4, which compares the theoretical efficiencies as a function of temperature of a fuel cell and a Carnot process operating between T and 300 K.

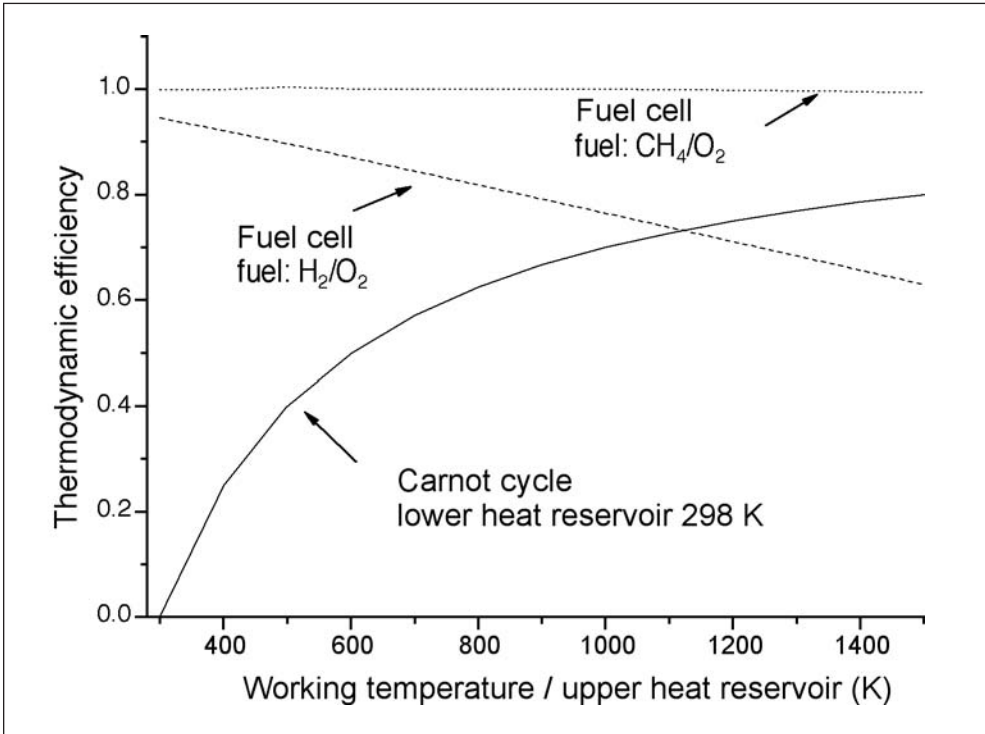


Fig. 4 Thermal efficiency as a function of temperature of the energy conversion of a fuel cell and a conversion process limited by the Carnot's factor.

The Figure shows two things: *First* that the efficiency of the fuel cell depends on the type of fuel used; and *second* that the thermal efficiency of a fuel cell is higher than that of a Carnot process unless the upper temperature of the process largely exceeds 1000 K. But just as with combustion engines, the thermodynamic efficiency represents the upper limit for the cell rather than the actual performance. There are several factors that reduce the efficiency of a real fuel cell system: At first there are the losses that occur inside the fuel cell. The factor describing those is called the *electrical efficiency* and is given by the product

$$\eta_{el} = \eta_{id} \eta_U \eta_F U_f \quad [1]$$

where the *ideal or theoretical efficiency* $\eta_{id} = \Delta G / \Delta H$ is the thermodynamic efficiency. η_{id} is the value plotted in Figure 4 and 6.

The *voltage efficiency* $\eta_U = \Delta U_{cell} / \Delta U_{theoretic}$ reflects voltage losses due to polarization phenomena at the electrodes and ohmic potential drops at the interfaces, in the electrolyte, and in the interconnectors (the theoretic cell voltage for water production is 1.23 V at standard conditions, cell voltages in real systems vary between 0.6 and 1.1 V depending on current densities). The voltage efficiency is the one that is the target of most of the research today. Details are discussed in Section 3.2.3.

The *faradaic efficiency* $\eta_F = I / I_m$ is defined as ratio between the observed current and the theoretically expected current calculated on the basis of complete reaction. The faradaic efficiency is lower than 1 if a parallel reaction takes place. A prominent example, the DMFC, is discussed later in Section 3.2.2.

U_F is the utilization of the fuel in the cell or stack. U_F is smaller than 1.0 if a part of the fuel leaves the stack without taking part in the reaction.

The electrical efficiency of the complete fuel cell system comprises also the efficiency of the periphery and is given by

$$\eta_{el}^{system} = \eta_{el}^{stack} \eta_p \quad [2]$$

The *periphery efficiency* η_p is defined as the ratio between the usable energy delivered by the system and the energy output of the cell. This factor considers losses by blowers feed pumps, control equipment and other peripheral components. If a reformer is needed this may be another mayor factor of loss in the system, in case of a POX reformation the system efficiency may decrease by 20 % or more.

The resulting electrical efficiencies are shown in Figure 5 where known or projected efficiencies of the different energy conversion systems are compared for different sizes of plants. The efficiencies of two types of fuel cell systems shown in the diagram are higher than those of engines and conventional power plants of comparable size and, in the case of the SOFC, are higher than the maximum achievable efficiency of Carnot-type units.

The efficiencies shown in the Figure consider only the electric efficiencies of the plants. If the heat produced by the fuel cell can be used, e.g. in plants for combined generation of heat and power (CHP), the total conversion efficiency can reach 90 % or more while the electric efficiency remains at 45 % or more. In those cases the heat generated by the fuel cell can be used for producing hot water or steam.

In addition to the high efficiency, fuel cells also exhibit emission levels that are notably lower than present legal requirements (in Germany for instance, stipulated by »TA Luft«). Several factors contribute to this: Fuel cells work continuously, so that there are no problems with pulsating combustions as they are encountered in gas and diesel engines. Secondly sulphur is a catalyst poison for all types of fuel cells used today so it has to be removed before entering the stack, which results in a strongly reduced SO₂ emission. Further the temperatures reached by the highest temperature fuel cells are about 1000 °C – and thus much lower compared to the temperatures within gas turbines and diesel engines, reducing NO_x emissions to levels well below the limits specified by the law.

Finally fuel cells themselves do not have moving mechanical parts so they are virtually soundless.

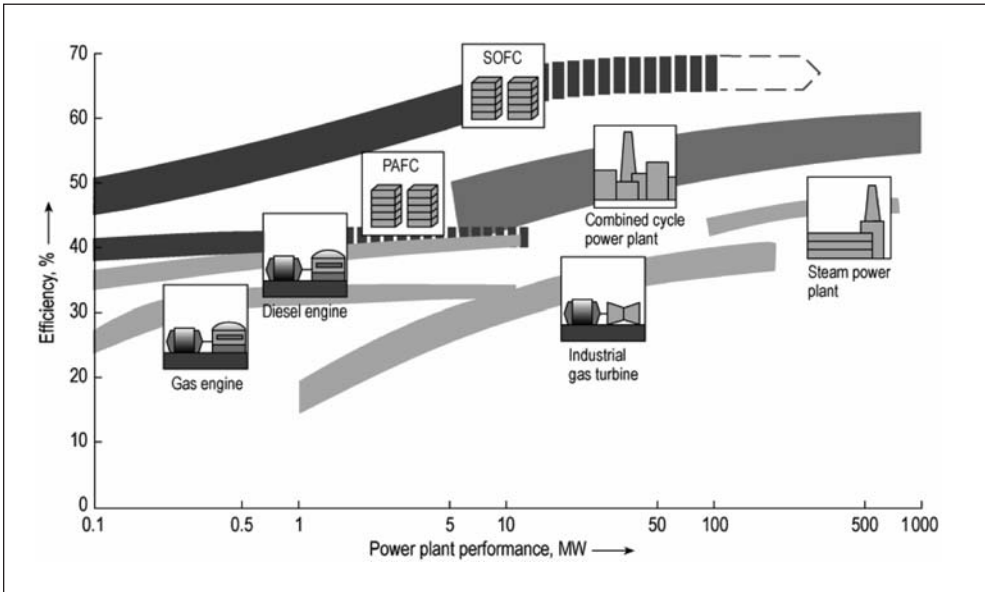


Fig. 5 Efficiency of energy conversion as a function of the size of the power plant; conventional systems are compared with projected fuel cell systems such as PAFC and SOFC.²

2.3 Different Types of Fuel Cells

Today's fuel cells can be divided into two groups depending on their operation temperature. Low temperature fuel cells operate at a temperature typically lower than 200 °C, while high temperature fuel cells operate at a temperature above 600 °C. The fuel cells are usually classified and named after the electrolyte present in the cell, with the exception of the direct methanol fuel cell (DMFC), which is identified by the fuel used. Except for some alkaline fuel cells, a common characteristic of fuel cells is the use of an immobilized electrolyte, which means that the electrolyte is solid or consists of a liquid retained in a solid matrix. Immobilized electrolytes offer many practical advantages such as fewer corrosion problems, no leakage of the liquid, easier design, planning and construction. An overview of the materials used for the components of the different fuel cell systems is given in Table 1.

² Published by Siemens.

Tab. 1 Materials and components for different types of fuel cells. The other parameters such as reagents, temperature, pressure and application of the fuel cell system depend on the electrolyte in the cell.

| | | | | |
|--|--|--|--|---|
| Fuel cell Alkaline fuel cell (AFC) | Electrolyte conc. KOH in porous matrix | Electrodes (anode/cathode) Ni/Ag (Pt/Pt) on porous Ni | Interconnector Nickel | Construction materials graphite, Inconel |
| Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) | proton exchange membrane | Pt on graphite | graphite sheet metal (stainless steel) | steel |
| Phosphoric acid fuel cell (PAFC) | conc. phosphoric acid in porous matrix | Pt/Pt | graphite | Inconel |
| Molten carbonate fuel cell (MCFC) | molten Li and K carbonate in porous matrix | Ni/NiO | Inconel | Inconel, Ni, ceramic |
| Solid Oxide fuel cell (SOFC) | yttrium stabilized zirconia $ZrO_2 (Y_2O_3)$ | Ni cermet, $SrLaMnO_3$, other perovskites | chromium based alloys or chromium based ceramics | ceramic, Ni and Fe alloys |

Tab. 2 Operation parameters for different types of fuel cells. Tab. 2 lists these parameters for different types of fuel cells.

| Characteristic | AFC | PEMFC | PAFC | MCFC | SOFC |
|-------------------------|--------------------|---|--------------------------|--|---|
| Temperature | 60–90 °C | 50–90 °C | 160–220 °C | 620–660 °C | 800–1000 °C |
| Fuel | pure hydrogen | pure hydrogen, reformat [*] , methanol | pure hydrogen, reformat | natural gas, reformed or directly fed, biogas, coal gas | natural gas, reformed or directly fed, biogas, coal gas |
| Oxidant | pure oxygen | pure oxygen or air | air | air | air |
| Application | space and military | space, military, automotive, and stationary | cogeneration power plant | cogeneration or combined cycle power plants, depending on size | |
| System power at present | | 50 kW–250 kW | 11 MW | 2 MW demonstration plant | 100 kW demonstration plant |
| Electrical efficiency | | | | | |
| Stack | 69–70 % | 50–68 % | 50 % | 60 % | 60–65 % |
| System | 62 % | 43–58 % | 40 % | 44 % (plant) 60–65 % (combined cycle) | 53 % (plant) 65–70 % (20 MW) |

Several fuels can be used; depending on the type of systems they can be directly supplied to the anode or first undergo a reforming reaction. The thermodynamic efficiencies of the conversion of different fuels are given in Figure 6.

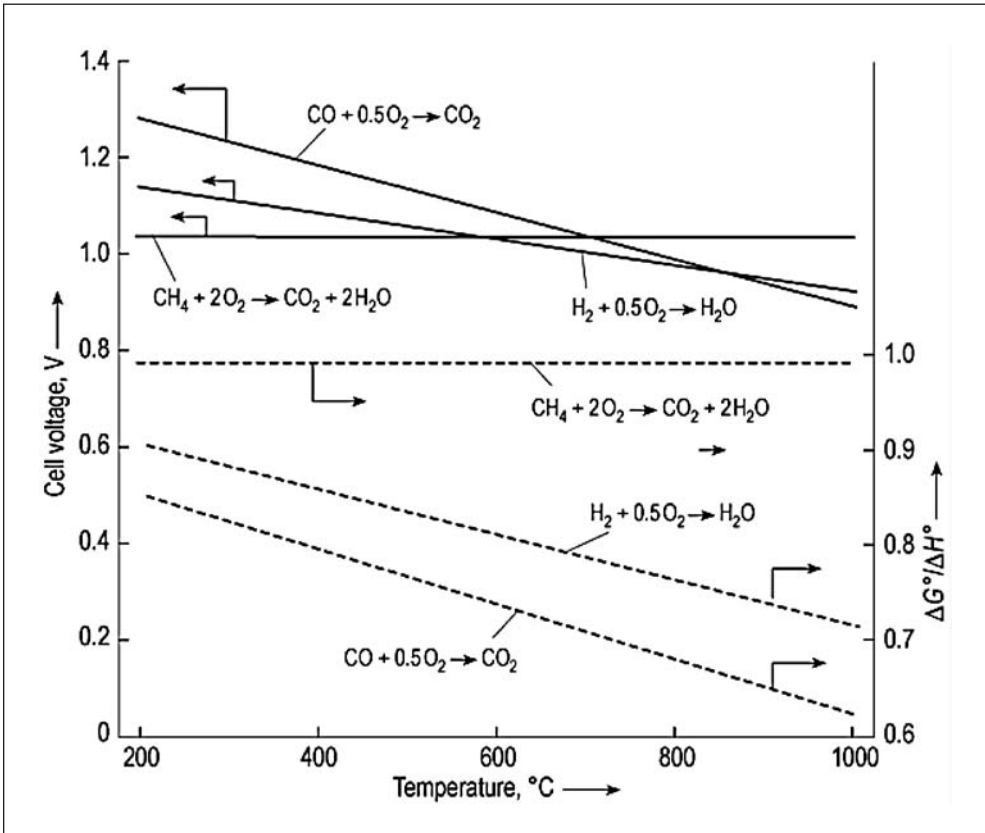


Fig. 6 Thermodynamic equilibrium voltages and theoretical efficiencies for the conversion of different fuels in a solid oxide fuel cell. The temperature dependence of the theoretical efficiencies $\Delta G^\circ / \Delta H^\circ$ of various reactions are plotted on the right scale. The corresponding cell voltages, calculated from the Nernst equation, are shown as well (left scale).

2.4 Stack

Figure 3 shows only the electrochemical core of a fuel cell. However, a single electrode-electrolyte assembly is not sufficient for electricity generation, since the typical voltage of a single cell is below 1 V. In order to obtain suitable voltages a number of cells are connected in series. Thus, in addition to the electrochemical components, a fuel cell needs interconnector plates, which electrically connect two adjacent electrochemical units and usually also act as reactant distributors. Several fuel cells connected by interconnectors form a stack. Such a stack is shown in Figure 7 for a fuel cell with polymer electrolyte.

Regardless of the actual type of fuel cell there are certain demands on the properties of the materials involved: The *electrolyte* has to have a high conductivity at operating temperature, i.e., it should cause a low ohmic drop ($< 0.15 \Omega \text{ cm}^2$). It should have negligible electronic conductivity, be gas impermeable, and chemically stable in an oxidative and reductive environment (1.2 V and 0.0 V, respectively).

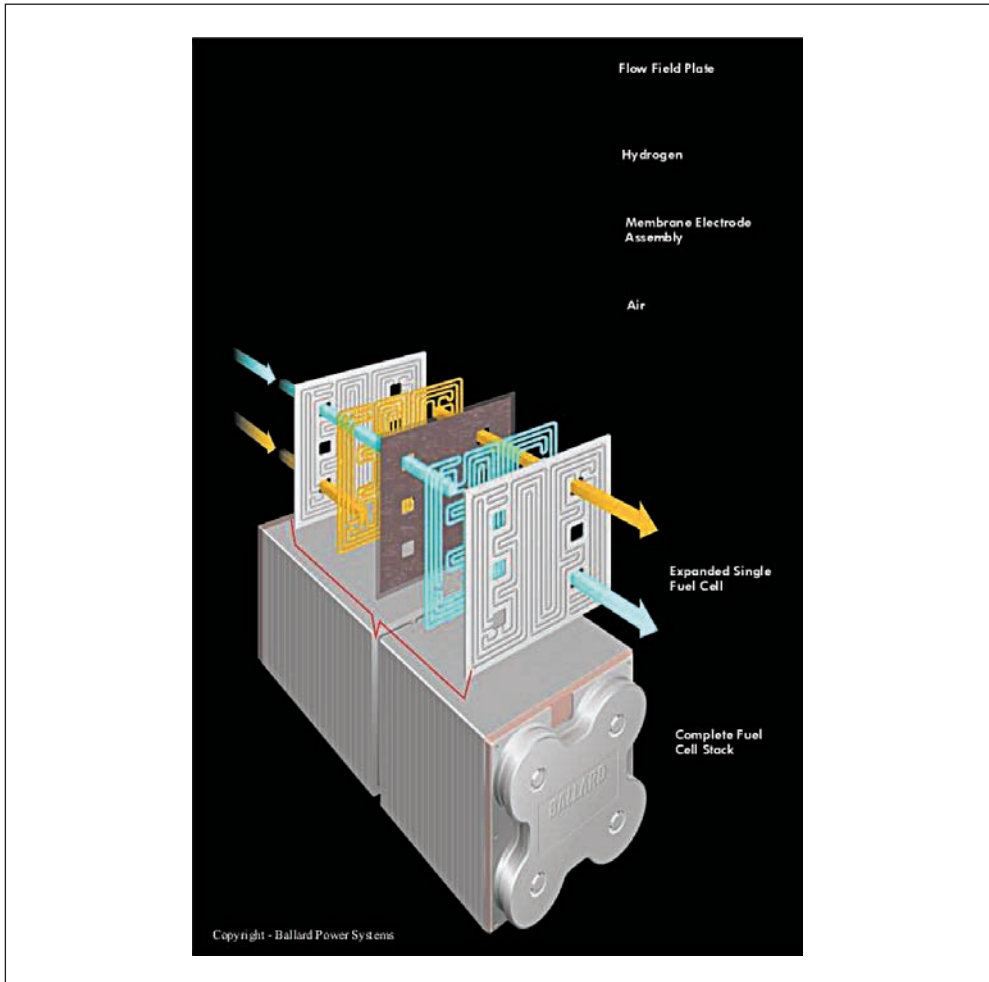


Fig. 7 Ballard PEMFC-Stack³

The *electrodes* must have a high electrocatalytic activity for fuel oxidation or oxidant reduction, a high electrical conductivity (electronic or mixed ionic and electronic), and must be chemically stable to reduction or oxidation and gas permeable.

The *interconnector* must have a high electronic conductivity and must be stable in oxidative environment on the cathode side and reductive environment on the anode side.

The *electrochemical system* interconnector–anode–electrolyte–cathode must exhibit high thermal stability to sufficiently withstand frequent thermal cycles, have a long operation life (5000–150,000 h, depending on application), be light, compact, not expensive, and easy to produce.

³ Press release photography from Ballard Power Systems.

In order to reach these targets, the design of the cell is of crucial importance, in fact, it can strongly affect the production costs and the efficiency of a fuel cell system. An important factor for the design is the dimension of the three-phase zones, where the electrochemical reactions take place. The three-phase zone has a thickness of just a few micrometers, therefore cell designs have to consider the design of the components (electrodes, electrolytes, and interconnectors) in such a way that the specific power density is increased by minimizing the volume of the stack for the same volume of the reaction zone.

2.5 System

2.5.1 Mobile Systems

Drivetrain

In mobile applications size is at a premium, followed by instant availability – nobody wants to wait a prolonged time before driving away. Up to now the focus therefore was on PEMFC's, which have been developed to power densities approaching $0,3 \text{ kW/l}^4$ and can start

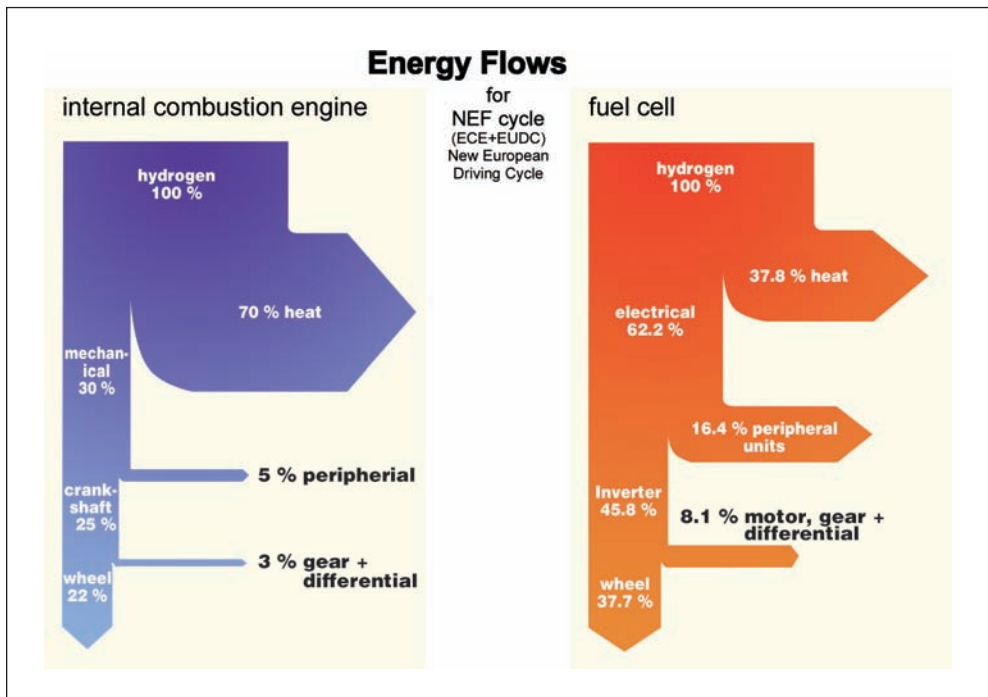


Fig. 8 Comparison of fuel to wheel efficiencies of an ICE and a fuel cell engine driven vehicle (NECAR 4 data: FRIEDLMEIER et al. 2001)

4 Ballard XCellis Hy80, without electric motor and hydrogen tank. Ballard sales brochure.

at ambient temperature. By now (2003) every major car manufacturer has shown at least some demonstration car powered by a fuel cell. Some, as DaimlerChrysler or Toyota, have small numbers of fuel cell vehicles in everyday use already. Driving tests with those vehicles demonstrated a system efficiency not reached by their ICE counterparts (Fig. 8).

However, the use of a PEM type cell has also drawbacks: The low working temperature of the cell of some 70 °C means that the temperature of the coolant will not exceed 65 °C, which leaves a mere 25 °C temperature difference to the surrounding at a hot summer day. Compared with a conventional vehicle with its upper coolant temperature of some 90 °C as well as a 50 % loss of thermal energy with the off-gas, this translates directly into a fourfold increase of the thermal load on the cooling equipment, which in term increases size, price and power demands of the components involved.

Secondly PEMFC's today are based on sulfonated PTFE and have a low CO-tolerance of less than 100 ppm. The cell therefore has to be fuelled either by pure hydrogen stored on board or by a CO-depleted gas which can only be generated by further refining the reformat derived from methanol or gasoline (Fig. 9).

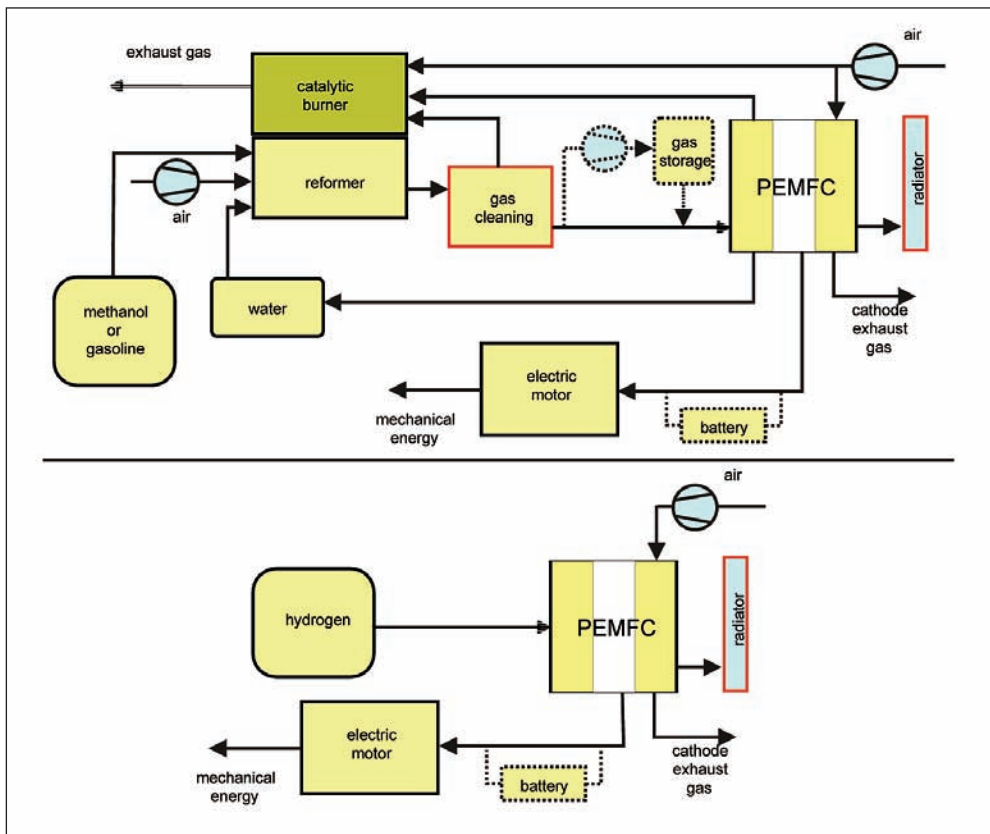


Fig. 9 Hydrocarbon and hydrogen fuelled PEM system

Gasoline would be the ideal fuel for fuel cells as the infrastructure is available already. Yet PEMFC's need not only reforming and post-reforming process to generate PEM-compatible fuel out of gasoline or diesel: The process is further complicated by the frequent load changes of car drive trains with the associated flow and heat transients. This way of generating fuel gas out of an existing liquid has therefore been abandoned by all car manufacturers.

Methanol would be more suitable liquid fuel from the PEMFC's view: The need for reforming remains but the process itself is simpler and needs lower temperatures (250 °C *versus* 800 °C); post-reforming the gas is easier as well. Methanol-driven fuel cell vehicles have driving ranges comparable to those of ICE-driven vehicles, switching gas stations from gasoline to methanol merely means cleaning the piping and recalibrating the measuring equipment. DaimlerChrysler built several demonstration vehicles (NECAR 3, NECAR 5) with driving ranges of more than 400 km. But during the last 3 years the line was abandoned in favor of vehicles fuelled by Hydrogen.

The Fuel cell vehicles envisioned by the manufacturers today are directly fuelled by hydrogen. Design advanced considerably so that the fuel cell system fits into a small car with-

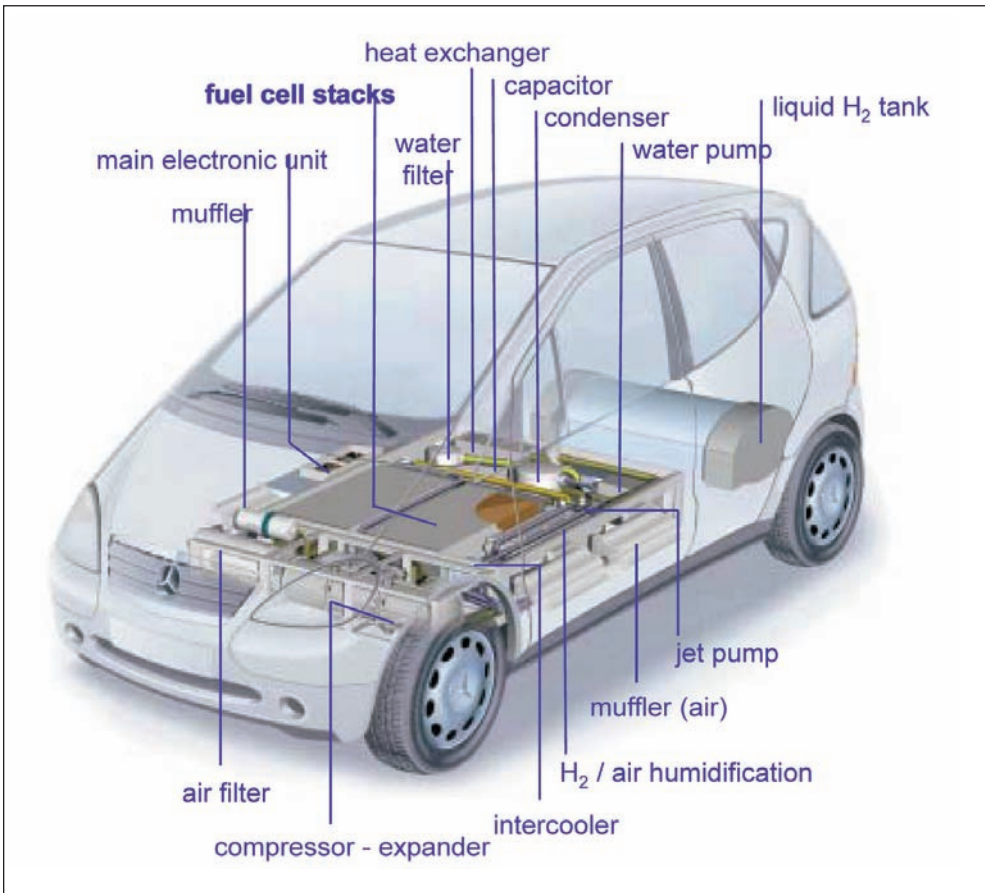


Fig. 10 NECAR 4 packaging of components (DaimlerChrysler Press photography)

out reducing the passenger or freight space (Example NECAR 4 by DaimlerChrysler shown in Fig. 10). While the use of hydrogen results in a fairly simple system (Fig. 9) and adequate driving range (400–500 km once higher pressurized storage tanks are available), unfortunately hydrogen as an energy source is not available as a primary energy carrier – the gas has to be generated first, usually out of hydrocarbons. Using hydrogen as the energy source for driving cars therefore would only add another conversion step into the chain reducing the overall efficiency of the system. But even if we would limit the use of hydrogen to the amount generated by regenerative energies, such as wind, solar or (yet to be developed) biochemical plants, there would still remain the problem of delivery: In 2003 there are some 70 hydrogen filling stations throughout the world (WURSTER 2003). Installing the 60,000 stations necessary to provide a worldwide hydrogen supply would cost an estimate of 240 Billion Euros (WURSTER 2003) in investments. While this might be the way to go eventually the timescale to reach this figure will be decades rather than years.

Auxiliary Power Unit (APU)

Instead of replacing the complete drive train an alternative approach would be to just replace inefficient components or reduce operating conditions with low efficiency.

An inefficient component within the car is the electric generator, which adds a second energy conversion process (rotation -> electricity) to the ICE. The efficiency of belt-driven generators ranges from 50 % to 30 % (at maximum RPM) with a possible increase to 80 % when replaced by an integrated starter-generator (ISG)⁵. But even the ISG is only the second module in a chain of energy converters starting with the ICE and its low part-load efficiency of less than 25 % (ARMSTRONG 2001). While this does not matter so much in the cars today with an electric power consumption of several 100 W future concepts like drive-by-wire or break-by-wire will increase the average electric power consumption to 2–4 kW – which, at a base fuel consumption of about 0.7 l/kW/100 km⁶, translates into 1,5–3 l/100 km just to generate electricity.

An even worse condition exists when a car or truck engine runs for the sole purpose of generating a few kW for air conditioning, electricity or heating. Truck engines, for example, still consume some 3 l/h, or 30 kW thermal power input, when idling (*United States Environmental Protection Agency* 2002).

The energy needed in such cases may just as well be delivered by a second, auxiliary power generator (APU) dedicated for delivering electric energy. A fuel cell would be ideal for that job, as it would combine a high efficiency with the right form of energy at the output. Overall efficiency of a fuel cell is at least 35 % and therefore nearly twice as high as that of the ICE + generator chain.

In the case of an APU, however, the fuel cell is only a secondary system so the choice of fuel is usually dictated by the one used by the ICE already – diesel or gasoil. This means that a PEM loses the advantage of the simple system and another type of fuel cell – namely the SOFC – may be the better choice.

First prototypes of such systems already exist: Delphi, a car component manufacturer, has shown working prototypes of such systems during the last years: A cooperation with BMW

⁵ SiemensVDO automotive press release.

⁶ Continental press release March 11th 2003.

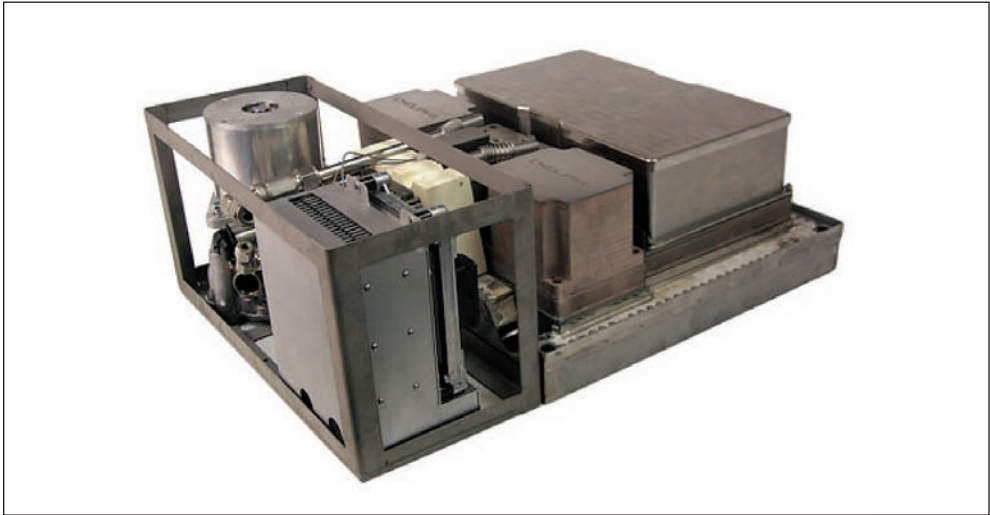


Fig. 11 SOFC APU (Delphi Systems press photography)

led to a first working model, a 5 kW system that fit below the trunk of an 7-series BMW and which was presented to the public in 2001⁷. Delphi improved the system and shrank the size to 44 l and weight to 70 kg in 2002 (Fig. 11) – 1/4th of the values of the system shown in 2001 (ZIZELMAN 2003). The main issues remaining today are system cost and temperature cycle stability of the stack (ZIZELMAN 2003).

While the cost issue might only be solved by high volume production the problems deriving from temperature stability might be overrated as it has been shown that – due to the thermal isolation – SOFC systems can be switched off for several hours without experiencing a severe temperature drop. The difference between the lowest and the highest temperatures within the system therefore never exceed a 200–300 °C while the absolute temperature of the system remains above 600 °C (HOLTAPPELS et al. 2001). The number of thermal cycles down to ambient temperatures during the lifetime of an APU will therefore be in the range of several tens of cycles.

Even these few cycles may be further reduced by keeping the system at a minimum working temperature at times of prolonged standstill. The amount of power needed to keep a SOFC APU at working temperature is in the range of 50–150 W (HOLTAPPELS et al. 2001). This would reduce the fuel efficiency of the APU by some 5 % to 30 % or more⁸, still more than the 20 % of the ICE/generator combination.

2.5.2 Stationary Systems

Fuel cells systems for stationary applications usually include the production of both electricity *and* heat for a better overall efficiency. The fuel for those stationary systems will be natu-

⁷ Press release BMW, ex. at <http://www.bmwworld.com/models/750hlc.htm>.

⁸ Based on the average 12,700 km/year (1999) driving per vehicle, 1l/100 km fuel consumption by the SOFC-APU, 100 W heating power and 50 sundays + 30 holidays supplementary heating per year.

ral gas as fuel: The amount of CO₂ produced per kWh is low (an important issue today) and the short length of the hydrocarbons speeds reformation and reduces the risk of carbon deposition within the reformer.

A possible system layout for a stationary application is shown in Figure 12.

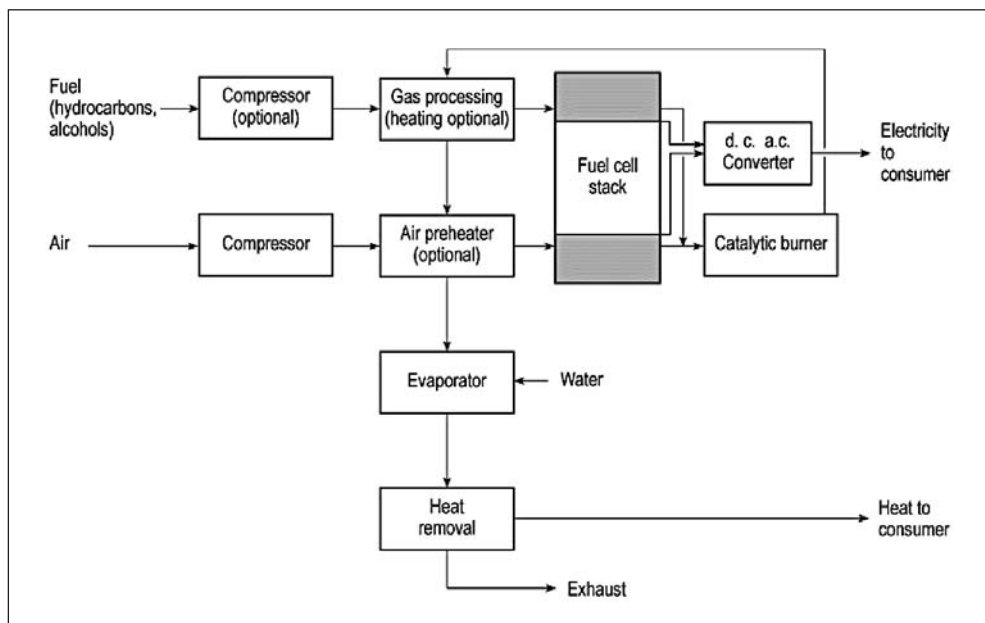


Fig. 12 Fuel cell system for stationary production of electricity and heat. A complete fuel cell system comprises besides the electrochemical device other components such as gas compressors, reformers, catalytic burner, and d.c./a.c. converter.

It shows a complete fuel cell system for stationary production of electricity and heat. Before being supplied to the fuel cell the fuel is compressed, heated, chemically processed in presence of water vapor (for example by reforming), the air is compressed and preheated. After exploitation in the fuel cell stack for energy production, the residual gases are burned in a catalytic burner. The combustion supplies the necessary heat for preheating and reforming. The residual heat is used as process heat.

The gas processing step(s) before entering the stack depend on the type of the cell used: A PEM fuel cell needs the complex arrangement consisting of the reformer, shift reactors and so on (Section 3.1.2.), for a SOFC type cell the gas treatment can be reduced to a reformer which converts the natural gas into hydrogen and carbon monoxide. Nevertheless, both types of cells still need a sort of preprocessing of the fuel before it can be used in the cell.

2.5.3 Conclusion

As a summary we can say that while we have both energy sources and fuel cells, we neither have energy sources for our fuel cells nor fuel cells for our energy sources. While changing

the base for our energy consumption is a slow process, given the money needed, developing or modifying existing cells which do not carry the burden of backward compatibility issues might well be faster and more affordable.

3. Challenges for the Application of Fuel Cells

The previous sections have shown that fuel cells are feasible for many applications both mobile and stationary. The question is why fuel cells – being systems with high efficiency – are so scarce.

One of the reasons is of course the vicious circle that as long as production is low, prices are high which results in small production runs etc. Once production lots increase the price of fuel cells will be comparable to those of today's internal combustion engine (DIXON et al. 2002). But there are other issues as well:

3.1 Fuels

The fuel of choice for all fuel cells is *hydrogen*. It may be used in every cell type, has a very high reaction rate and generates only water as reaction product. However, while this may be the way to go in the future when hydrogen will be generated using renewable energies, we have to face the fact that there is no molecular hydrogen available on earth. Most hydrogen used today in general is obtained by steam reformation of hydrocarbons; a large amount of this hydrogen is used for further processing in the chemical industry (Fig. 13). Any additional amount of hydrogen, example for energy conversion, would have to be produced especially for that purpose. While this reduces the amount of CO₂ generated at the site where the hydrogen is consumed, the conversion from hydrocarbons to hydrogen itself is not reversible and may result in an overall higher CO₂ output on earth. As a second point hydrogen has a very low volumetric energy density in comparison to liquid fuels, even when compressed or liquified (EBERHARD 2002), which not only means that cars have a lower driving range but also that more freight space is needed to transport the energy to the end user, resulting in higher energy expenditure for the distribution. As long as hydrogen is generated *via* reforming hydrocarbons and not *via* renewable energies this effect will increase, not reduce CO₂ emissions worldwide.

So while hydrogen might be the fuel of choice in the future fuel cell systems designed for today have to use the fuels available today. And those fuels are hydrocarbons (natural gas, diesel, gas) and, to a lesser extent, alcohols. That are the fuels fuel cells have to run with, either directly or after reforming them into mixtures more suitable for the cells. Reformates can be tailored to the needs of nearly all types of fuel cells using existing fuels limits the types of cells which can be used.

3.1.1 Direct Fuels

There are some fuel cells, namely MCFC's and SOFC's, which may use *methane* as fuel. Natural gas, an available energy carrier, consists mainly of methane. But the rest consists of higher hydrocarbons (ethane, butane etc.), which are large enough to prohibit direct feeding of

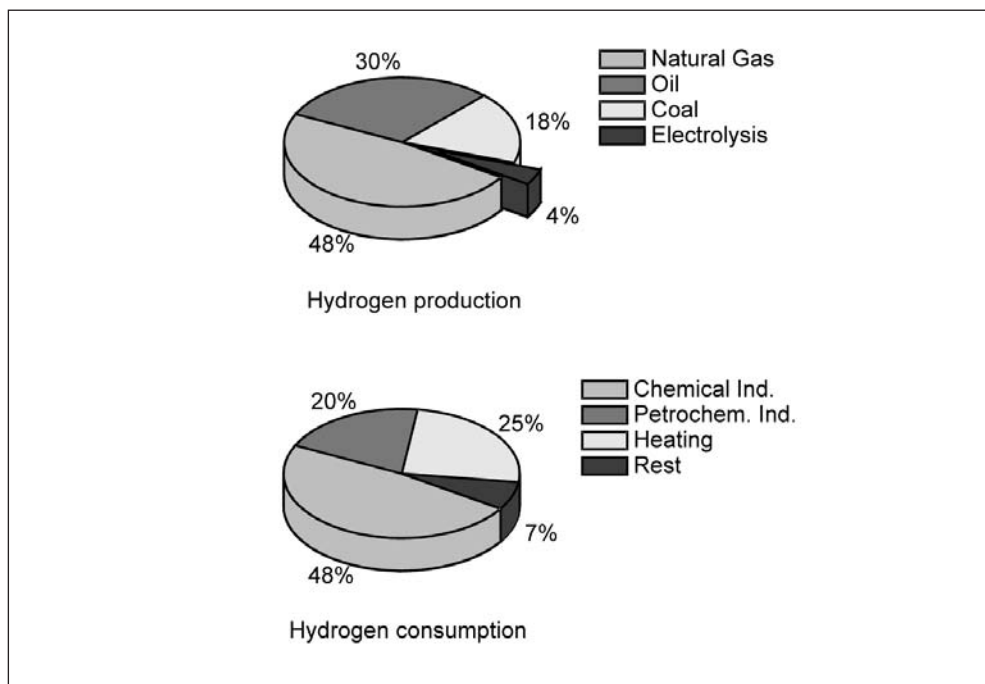


Fig. 13 Hydrogen production and consumption in the world. 96 % of the product stems from reforming hydrocarbons.

these cells without endangering their operation, so that the gas has to be pre-reformed before entering the cells.

Methanol may be used in specifically designed cells, for example direct methanol fuel cells (DMFC). However methanol is usually obtained from natural gas, losing about 1/3 of the chemical energy in the process (U. S. Department of Energy, Office of Domestic and International Energy Policy 1989).

Carbon monoxide is an option for MCFC's and SOFC's (it is a catalyst poison for PEMFC's). As it is not available as fuel in nature but rather generated during the reforming process of hydrocarbons it will be discussed in Section 3.1.2.

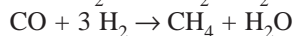
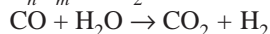
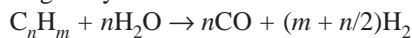
Higher hydrocarbons can yet not be used as fuel though there are developments which may lead to diesel-using SOFC's. Today the hydrocarbons have to be converted into a hydrogen-rich gas («reformate») before it can be fed into a fuel cell.

3.1.2 Reformates

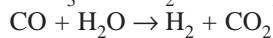
The desired composition of the reformed gas strongly depends on the type of fuel cell where it shall be consumed.

The carbon containing fuels are converted into a hydrogen rich gas either by reaction with water vapor (Steam Reforming) or under-stoichiometric amounts of oxygen (partial oxidation). The respective relevant reaction equations are given below.

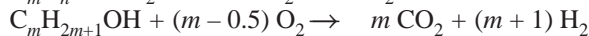
Steam reforming of hydrocarbons:



The steam reforming of methanol proceeds according to:



Partial oxidation:



The advantage of the steam reforming lies in the high hydrogen yields and concentrations which can be obtained, e.g. > 75 % H₂ (dry gas) for methane. But as these reactions are strongly endothermic external heating is required. To overcome difficulties encountered herein in start-up and load change situations the use of micro-reaction technology is discussed (CREMERS et al. 2003).

In contrast to steam reforming partial oxidation is a slightly exothermic process. The exothermic degree increases with the carbon content of the fuel so that POX reformers for e.g. gasoline or diesel require adequate cooling. As further drawback the use of air as oxidant dilutes the product gas with nitrogen so that only hydrogen concentrations lower than 40 % can be obtained.

To avoid an external heat exchange reforming concepts were both reactions run in parallel in the same catalytic bed are emerging. This so called auto thermal reforming (ATR) is a good compromise between the high hydrogen yield as obtained with steam reforming and the lower system complexity and reactant storage volume of a POX. ATR is especially interesting for the reforming of gasoline or diesel fuels in mobile application.

Except for the steam reforming of methanol and some other alcohols which can be processed at relatively low temperatures (250 °C) the product gas obtained by the reforming process is rich in CO. It may be directly fed to the high or future intermediate temperature types of fuel cells. But for the use in the PACF and in particular the PEMFC the CO needs to be removed. This is achieved regularly in a multi-step process comprising high and low temperature shift reaction to achieve CO contents of about 1 % followed by preferential oxidation or methanation of the remaining CO.

3.2 Efficiency

3.2.1 The Utilization of the Fuel U_f

The ideal situation for a fuel cell would be to completely use all the fuel to generate electricity and heat. This is achieved in so-called dead-end configuration where the fuel is fed into the anode inlet and consumed without leaving any residue.

For most fuel cells or working conditions this however is impossible. The following two examples may illustrate this:

- Feeding the cell with reformat. The reforming process usually adds some non-reacting gases like N_2 or CO_2 into the gas stream.
- In certain kinds of fuel cells, ex. SOFC's, the products are generated on the anode side.

In both cases non-reacting gases accumulate at the anode side which have to be removed from the stack. This is done by providing a continuous flow of gas through the anode. The concentration of fuel gases is high at the inlet and is depleted more and more as the gas flows through the cell towards the gas outlet. Due to fabrication tolerances in the stack, gas manifolds etc. the gas flow within the different cells varies so the point where all the fuel is depleted varies from cell to cell as well. As complete depletion of fuel within a cell would damage the cell components (much like an accumulator) so more fuel than absolutely necessary has to be fed into the stack to prevent this from happening. The utilization of the fuel for such a system is given by the partial pressures of the oxidizable gases entering (p_{in}) and leaving (p_{out}) the cell:

$$U_f = 1 - \frac{p_{out}}{p_{in}}. \text{ Typical values are } U_f \approx 0.8 - 0.85. \quad [3]$$

While the fuel utilization directly affects systems generating only electricity CHP plants can recover some of the energy lost by oxidizing the unconsumed fuel in an afterburner and adding it to the heat output of the plant.

3.2.2 The Faradaic Efficiency η_F

While most types of fuel cells reach faradaic efficiencies of 0.95 to 1.0, the η_F of the DMFC is a research topic. The reason for that is the diffusion of the fuel – methanol – through the electrolyte, which causes not only a voltage drop through the cell but also a drop in the faradaic efficiency. The leakage through a typical membrane (Nafion 117) amounts to a current loss of about 100 mA/cm^2 , which even at the maximum power point with typical currents of about 400 mA/cm^2 reduces the faradaic efficiency to 0.8 (WASMUS and KÜVER 1999).

3.2.3 The Voltage Efficiency η_U

Looking only at thermodynamics the voltage U across both electrodes of a fuel cell should be

$$\Delta U = \frac{\Sigma \Delta G}{-nF} \quad [4]$$

with $\Sigma \Delta G$ the Gibbs free energy of all reactions in the cell, F the Faradaic constant and n the number of electrons transferred in the chemical reaction (Fig. 14A). $\Sigma \Delta G$ again depends on temperature and gas concentrations:

$$\Sigma \Delta G = \Sigma \Delta G^0 + RT \ln \frac{c_{products}}{c_{educts}} \quad [5]$$

However, as larger currents flow through the cell the internal ohmic resistance of the cell reduces the usable voltage at the cell contacts (Fig. 14 B). The internal ohmic resistance of the cell or stack is the sum of all the components involved: interconnectors between the cells, the anode layer, the electrolyte and the cathode layer. Countermeasures depend on the type of re-

sistance encountered: In case of the interconnect it's in principle the contact resistance between the interconnector and the adjacent layers so focus is on improving the contact by reducing possible high-resistant oxide layers on the face of the interconnect. In case of the electrolyte it's mainly diffusion resistance induced by the drift of the ions through the electrolyte so the target is to reduce its thickness. In case of the anode and cathode it's mainly the lateral resistance as only a part of the active area is in contact with the interconnect and the electrons have to flow laterally through the layer in order to get to the contacted areas. Counter measures may comprise the use of a conductive gas diffusion layer (backing) and the appropriate design of the structure of the interconnect to fulfill both the media distribution and the electrical contact requirements.

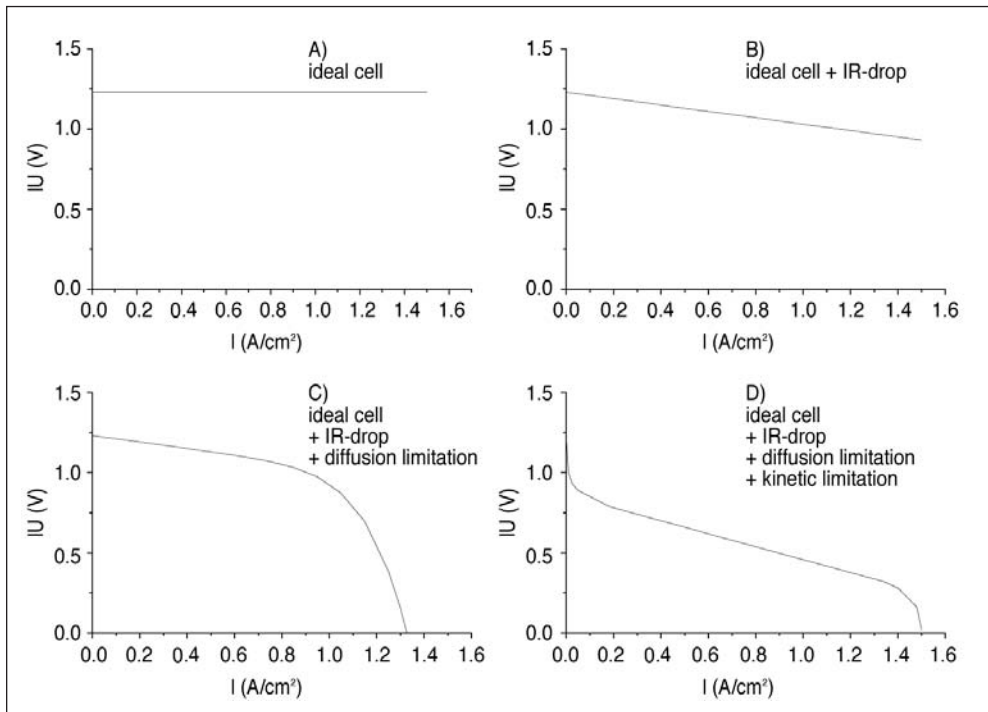


Fig. 14 Contributions to the I/U dependence of a fuel cell. (A) Ideal cell. (B) Ideal cell + IR-drop. (C) Ideal cell + IR-drop + diffusion limitation. (D) Ideal cell + IR-drop + diffusion limitation + kinetic limitation

At still higher currents another effect contributes significantly to the overall voltage drop of the cell; the reactants have to reach the three-phase boundary (TPB) where the actual reaction takes place. The products that are generated have to leave after the reaction as well. Both effects are diffusion controlled which means that the higher the reaction rate (\sim cell current) the lower the educt concentration and the higher the product concentration at the TPB will be. Due to the exponential relationship between the gas concentration and concentration overpotential (KORDESCH and SIMADER 1996, LEDJEFF 1995) the voltage across the cell will decrease very fast once a certain current limit is exceeded (Fig. 14C). It can usually be avoided by designing anode and cathode porosity appropriately.

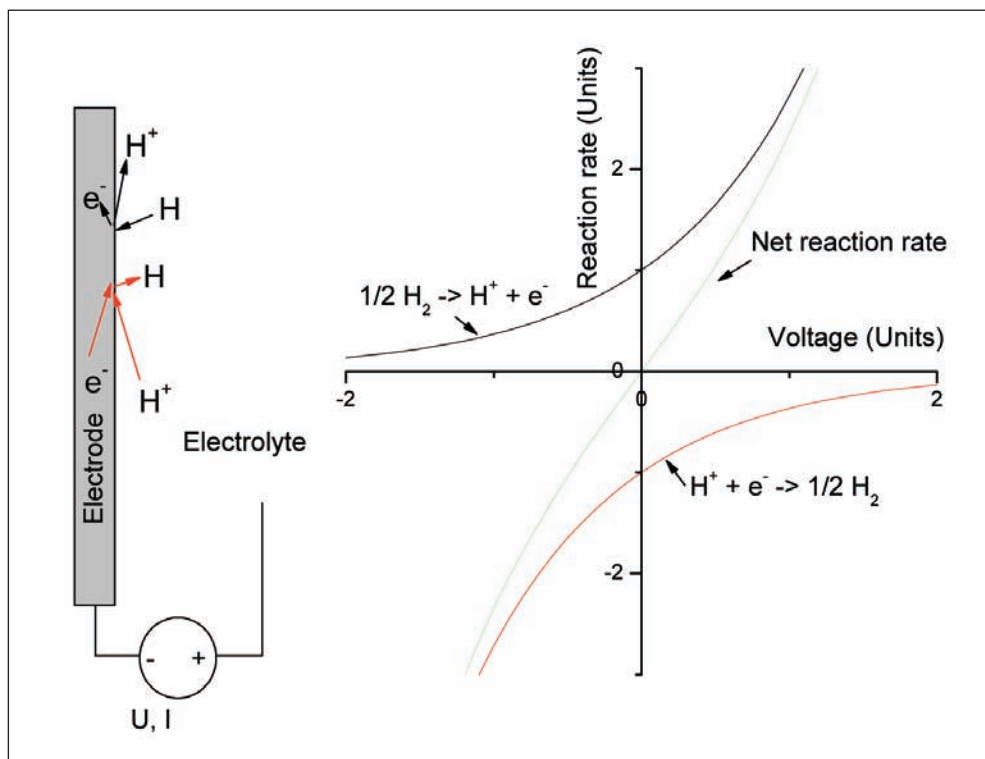


Fig. 15 Reactions taking place at one electrode, in this example hydrogen oxidation resp. proton reduction at the anode. The voltage applied does not control whether the reaction takes place or not but how often the reaction takes place.

Finally there is another contribution to the overall voltage drop of the cell, which becomes important at small currents already and is therefore significant for the overall efficiency of the cell: the kinetic overpotential. As with any electrode the electrochemical reaction is reversible on a microscopic scale at both the anode and the cathode of a fuel cell. Consequently both kinds of reactions – oxidation and reduction – do take place simultaneously (Fig. 15). The number of reactions per time depends on the potential between the electrode and the surrounding; theory shows that both reaction rates should rise or drop exponentially, the sum of which can be detected as the macroscopic current flow of the cell: $I = I^0 (e^{-\alpha CU} - e^{(1-\alpha)CU})$. As can be seen in Figure 14D this phenomenon creates a steep voltage drop at small currents, which flattens out as the current increases. This voltage drop depends very strongly on the exchange current I^0 which again depends on the reaction rate of the catalyst under the working conditions of the cell. Those conditions may vary substantially: While a PEMFC with pure hydrogen as fuel and platinum as catalyst shows only small overpotential on the anode, the cathode side exhibits a significant contribution of the electrochemical over potential to the overall voltage drop (Fig. 16).

Another example for this can be seen in Figure 17 which shows current densities and power densities depending on the fuel used.

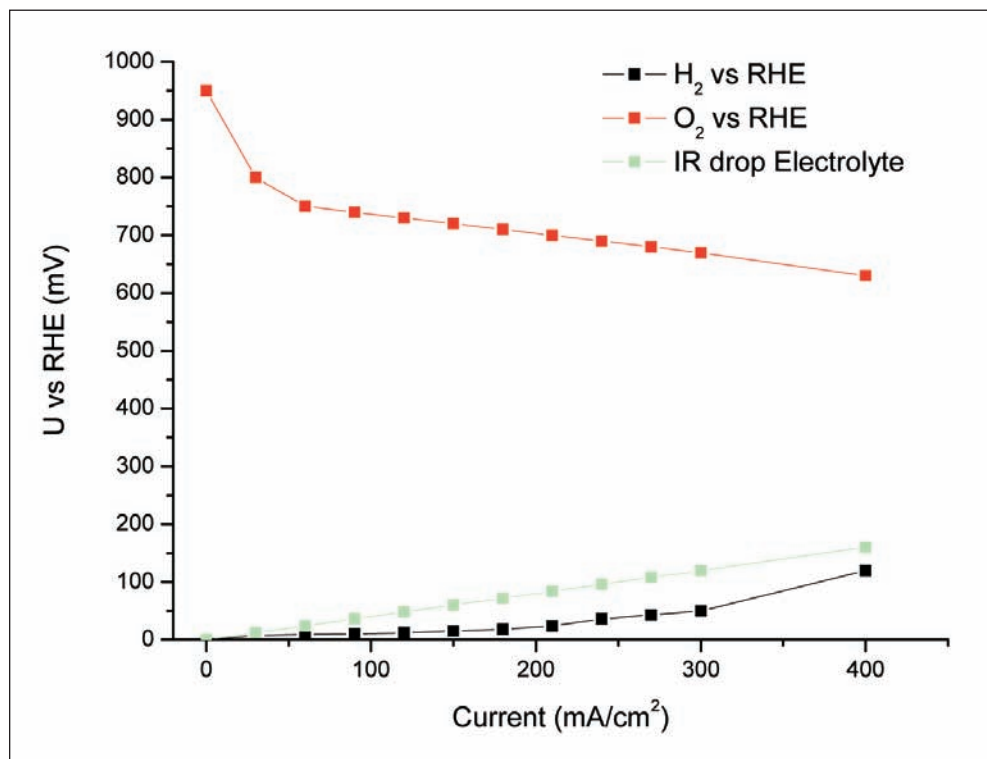


Fig. 16 Over voltages at a PEM fuel cell (H₂, O₂ data: ESCRIBANO and ALDEBERT 1995).

While being fed with hydrogen the cell exhibits only a small overpotential at the beginning of the curve, the cell voltage drop is nearly linear. In the case of Methane and Butane the internal resistance of the cell is much higher. In both cases the cell performance would increase significantly if a catalyst would be known with a much higher activity towards the specific reaction.

The important issue for the near future is to reduce the overvoltage within the fuel cells for readily available fuels. An increased efficiency is not only the key to reducing volume and material expense in construction the fuel cell but also determines the amount of residual heat which needs to be removed. Especially for low temperature fuel cells this important heat as produced at low temperatures is difficult to remove and can often not be utilized.

3.3 Nano-scaled Materials for Electrocatalytic Reactions

An important part of improving the performance and the efficiency of fuels lies in finding enhanced catalysts with a higher activity and better selectivity towards the desired reaction. Research today is aimed on improving the catalyst by providing catalysts with very small active particles and a homogeneous dispersion of them on the used support, regularly a sort of carbon black and by using binary, ternary or higher alloys instead of pure metals.

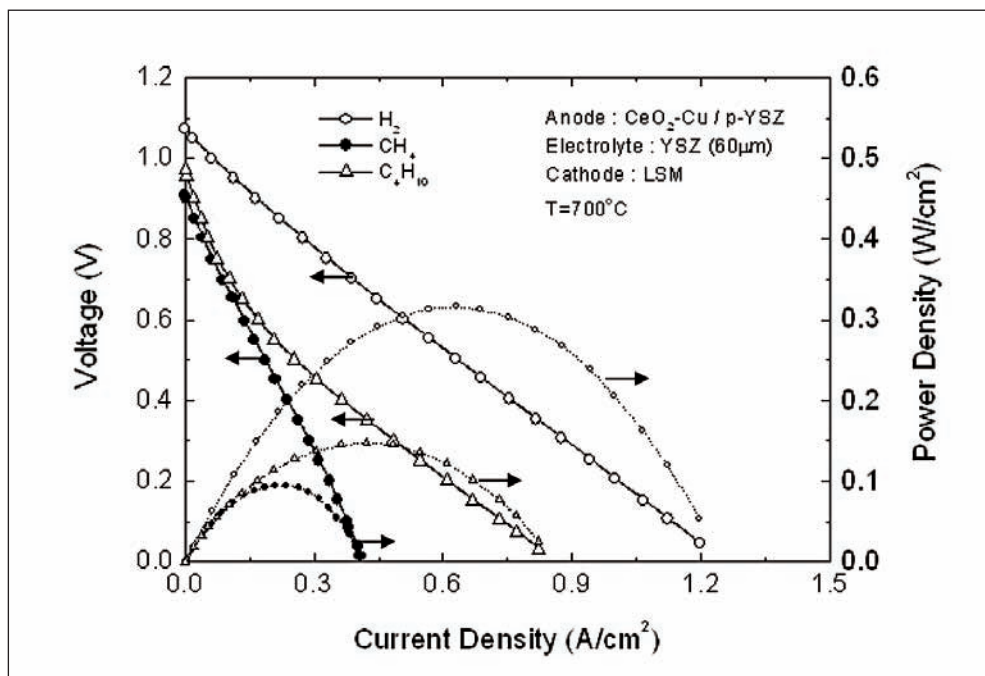


Fig. 17 Performance curve of an SOFC. Both current and power densities are plotted for various fuels (GORTE et al. 2000).

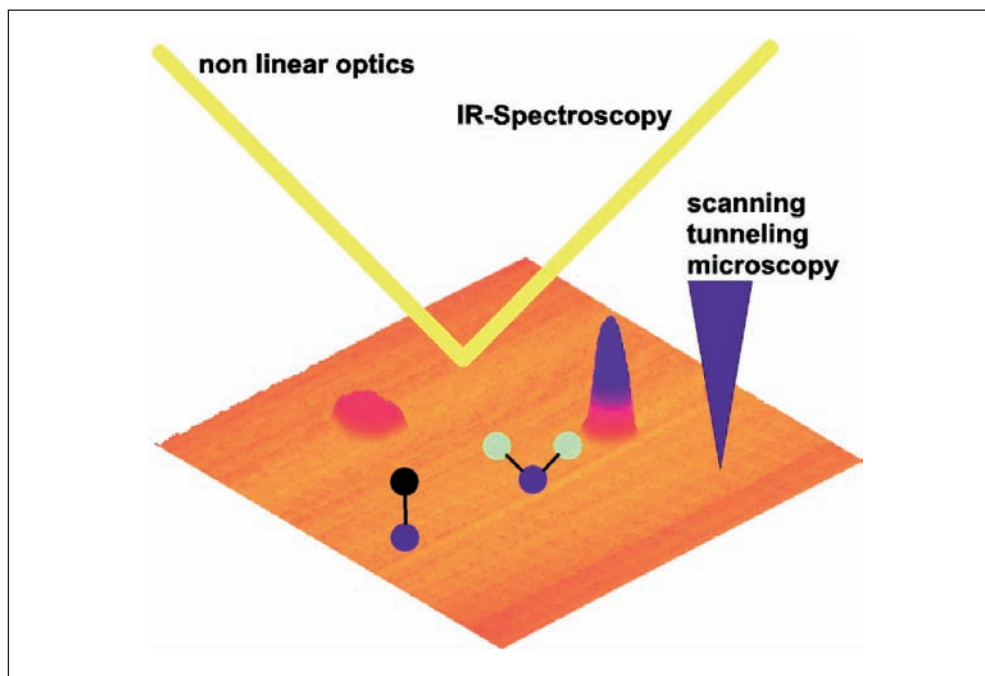


Fig. 18 Methods for the *in-situ* characterization of electrochemical active surfaces

While the reduction of size of the active centers aims first at an enlargement of the active surface area the reduction of particle size below a certain degree can cause additional effects which influence the activity of the catalysts. The understanding of these effects by investigating model catalysts is major issue in current electro-catalysis research. The investigation of these effects is conducted on model catalyst consisting of either numerous nano-particles of the same type on multi-crystalline supports like glassy carbon or single nano-particles deposited onto single-crystalline surfaces (MAIER et al. 2002). A number of different physical characterization methods is suitable for *in-situ* measurements in electrochemical systems and can be used to characterize the specimens. Some of the methods applied are shown in Figure 18.

One of those methods, the electrochemical scanning tunneling microscopy (EC-STM), is especially suited for basic research concerning the reactivity of single nano-particles supported on single-crystalline surfaces: First the tip is coated with the material to be investigated. The tip is mounted in the STM and some of the atoms are transferred onto the single crystal surface by inducing a mechanical contact of tip and substrate. By varying the force and duration of the contact the size of the cluster transferred to the crystal can be controlled. After the deposition the reactivity regarding the hydrogen evolution of the cluster can be investigated by measuring the hydrogen oxidation current at the tip (Fig. 19). The electrocatalytic activity of the particle is calculated from the current measured during the experiment (MAIER et al. 2002). This technique allows for an *in-situ* measurement where a single nanoparticle is generated, characterized and the electrochemical measurement performed under complete *in-situ* conditions.

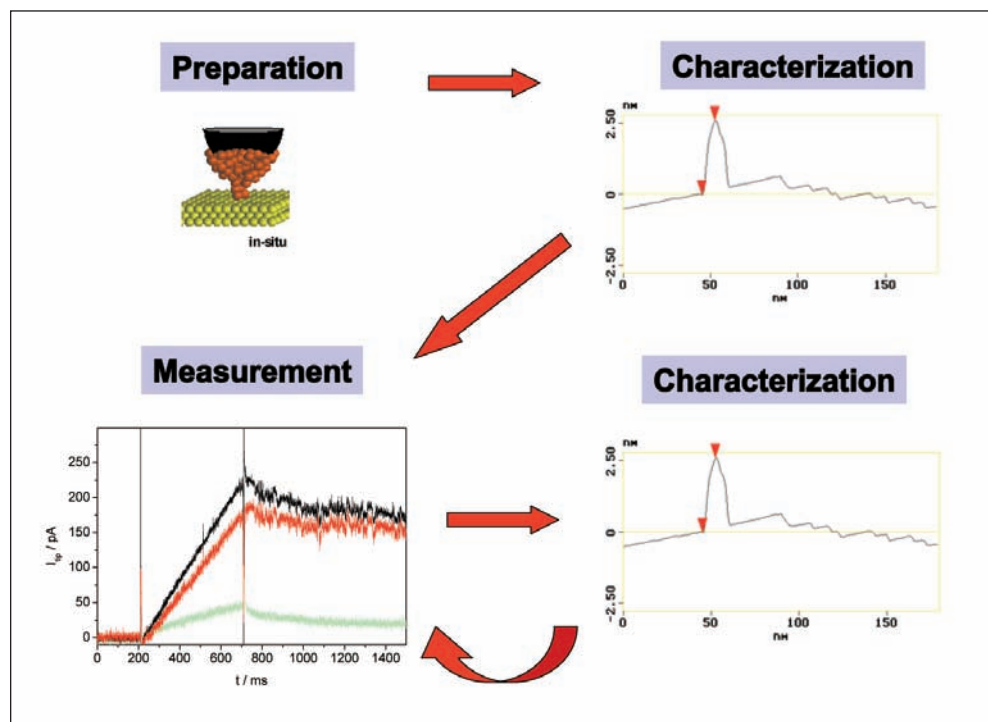


Fig. 19 All *in-situ* EC-STM measurement sequence

Of special interest are measurements of metallic nano-particles supported on a single crystal of different metal. The difference of the lattice constant strains the layer of the nano-particle in close contact to the substrate so that a strong influence of the size of the particle can be observed. This may help to understand the effects relevant in the alloy formation on the electrochemical activity.

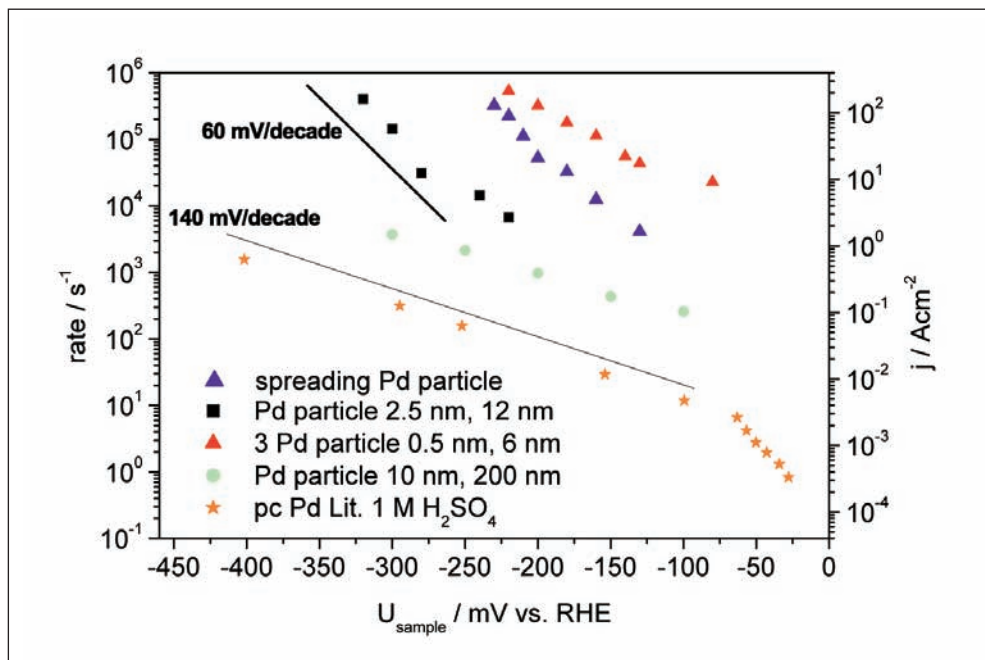


Fig. 20 Reaction rates for proton reduction at single palladium cluster supported on Au(III) substrate. A strong dependence on the particle size (height, width) is observed. Reaction rates up-to three order of magnitude larger than for polycrystalline palladium were observed. Small particles exhibit a different Tafel slope (MAIER et al. 2002).

But first experiments trying to find a correlation between the density of low correlated surface atoms and the reactivity did not reveal any apparent correlation (Fig. 21).

We found that the catalytic activity of gold supported palladium nano particles regarding the hydrogen evolution depends on the height of the particles which can be explained on the basis of strain exerted by the substrate (Au) on the Pd nano-particle and thus its electronic structure, as predicted by the d-band model of HAMMER and NORSKOV (MAVRIKAKIS et al. 1998, RUBAN et al. 1997, HAMMER and NORSKOV 2000). Such a strain leads to modified adsorption and activation energies e.g. of hydrogen and the rate of hydrogen evolution.

To further understand the effect of the particle size the investigation of systems containing multiple nano-particles of a certain size is important. The major factor to influence the size of the particles is the loading of noble metal on the support. High loadings lead to larger particles and in the end to the formation of larger cluster of multi-crystalline particles or agglomerates. The best way to characterize these particles is transmission electron microscopy (TEM) to achieve an overview of the number and size of the particles. High-resolution transmission electron spectroscopy allows distinguishing between different orientations of the

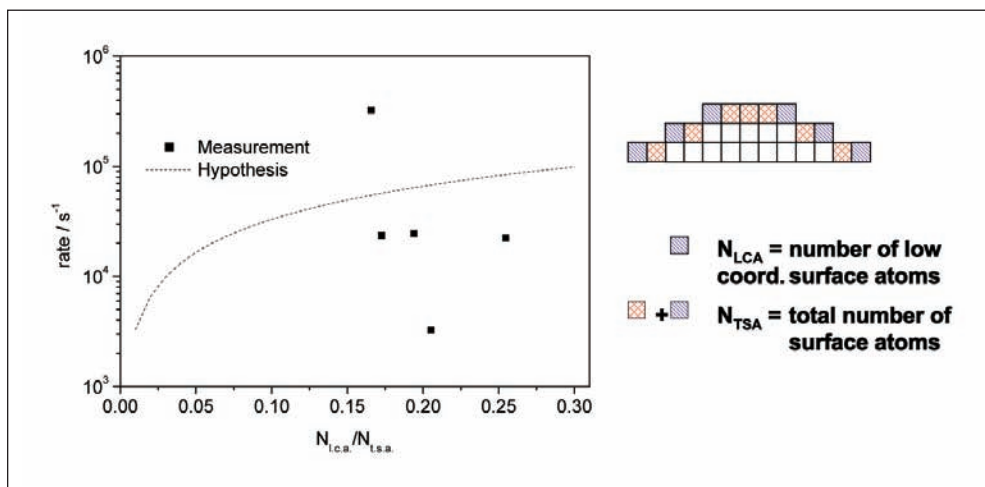


Fig. 21 Reaction rate as function of the density of low coordinated surface atoms experiment and simulation. Simulation uses the following assumptions: particles have shape of a truncated cone with layered structure; the reaction rate of low coordinated atoms is set to $3 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$

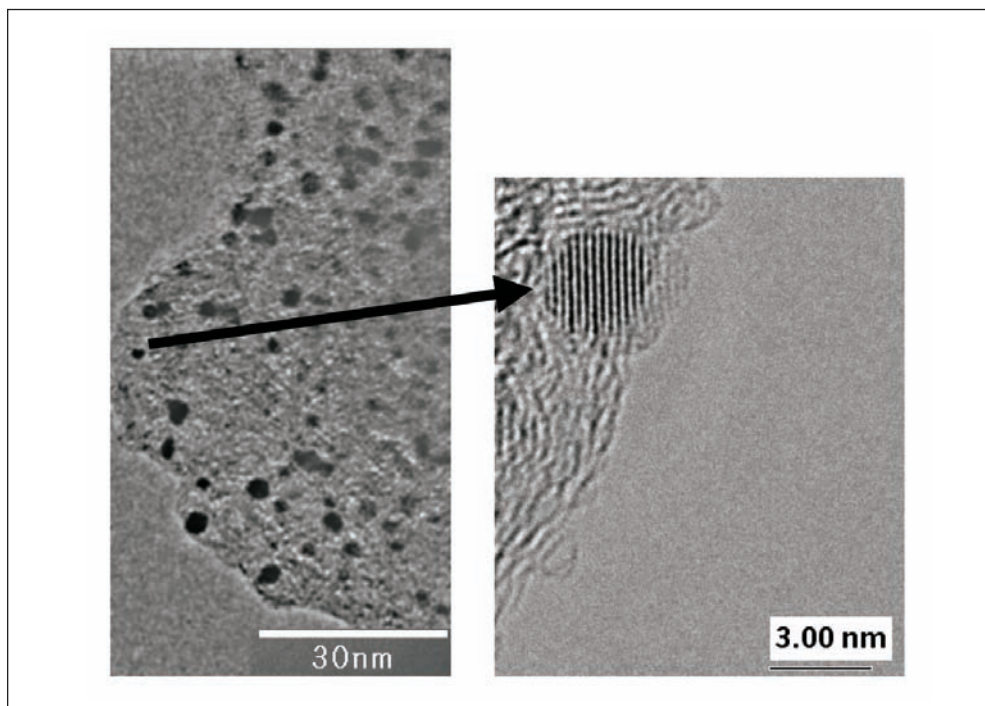


Fig. 22 TEM (left) and ARTEM (right) picture of nano-particles in a carbon supported platinum catalyst specimen.

crystallites forming the nano-particle and so detects the formation of poly-crystalline or agglomerate particles (Fig. 22).

An important effect of an increased particle size is the reduction of the density of atoms with a low coordination number on the surface – experimentally confirmed recently by FRENKEL et al. using extended x-ray absorption fine-structure (EXAFS).

4. Conclusions

Due to their high conversion efficiencies and their low emissions of pollutants fuel cells are a promising technology for future energy conversion systems. A major obstacle for the wider introduction is the lack of a suitable infrastructure for distribution and storage of the preferred fuel, hydrogen. Means for the on-site production of hydrogen from more readily available sources are therefore developed with some success.

Although today's fuel cells have achieved a quite high level of efficiency and stability future improvements are required for the commercialization. Key roles herein play improved catalyst especially for the PEMFC operated with reformed gas. These improvements will be achieved more easily if a better understanding of the relevant processes can be provided. Here the investigation of the correlation of the structure of the used nano-particles to the reactivity is essential.

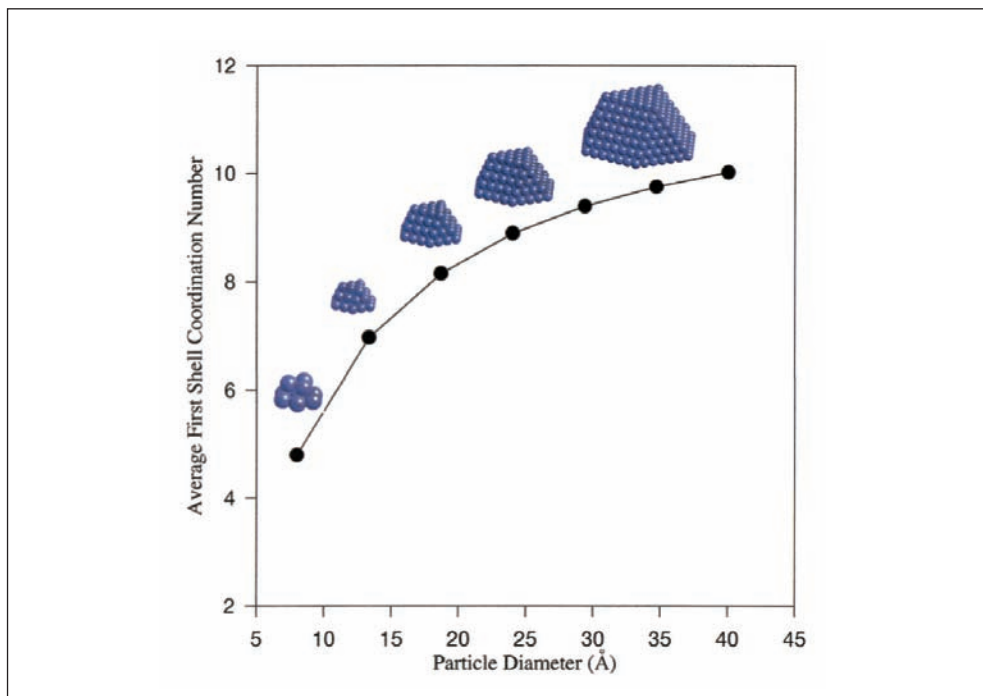


Fig. 23 Coordination number as function of the particle size (FRENKEL et al. 2001)

References

- ARMSTRONG, A.: Well to wheels efficiency standards and climate change. New Zealand Road to Cleaner Air workshop. Wellington: June 2001, published in the proceedings on CD
- CREMERS, C., STIMMING, U., FIND, J., LERCHER, J. A., REUSE, P., RENKEN, A., KURTZ, O., CRÄMER, K., HAAS-SANTO, K., GÖRKE, O., and SCHUBERT, K.: Micro-structured steam reformers as flexible hydrogen generators for fuel cell systems. Fuel Cell Seminar. Miami Beach, FL (USA) 2003
- DIXON, L. S., PORCHE, I., and KULICK, J.: Driving emissions to zero: Are the benefits of California's zero emission vehicle program worth the costs? RAND Study 2002 (ISBN 0833032127)
- EBERHARD, J. J.: Energy efficiency and renewable energy. US Department of Energy. 2002 DEER Workshop, 2002
- ESCRIBANO, S., and ALDEBERT, P.: Electrodes for hydrogen/oxygen polymer electrolyte membrane fuel cells. *Solid State Ionics* 77, 318–323 (1995)
- FRENKEL, A. I., HILLS, C. W., and NUZZO, R. G.: A view from the inside: complexity in the atomic scale ordering of supported metal nanoparticles. *J. Phys. Chem. B* 105 (51), 12689–12703 (2001)
- FRIEDLMEIER, G., FRIEDRICH, J., and PANIK, F.: Test experiences with the DaimlerChrysler fuel cell electric vehicle NECAR 4. *Fuel Cells* 2001, 92–96 (2001)
- GORTE, R. J., PARK, S., VOHS, J. M., and WANG, C.: Anodes for direct oxidation of dry hydrocarbons in a solid oxide fuel cell. *Advanced Materials* 12, 1465–1469 (2000)
- HAMMER, B., and NORSKOV, J. K.: Theoretical surface science and catalysis – calculations and concepts. *Adv. Catalysis* 45 (2000)
- HOLTAPPELS, P., STIMMING, U., and LAMP, P.: Concept for simple small SOFC system for automotive application. Proceedings of the VIIth International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells. 2001 (ISBN 1-56677-322-9)
- KORDESCH, K., and SIMADER, G.: *Fuel Cells*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft 1996
- LEDJEFF, K. (Ed.): *Brennstoffzellen*. Heidelberg: C. F. Müller 1995
- MAIER, J., FRIEDRICH, K. A., and STIMMING, U.: Novel method for the investigation of single nano particles. *Faraday Discussion* 121, 365–372 (2002)
- MAVRIKAKIS, M., HAMMER, B., and NORSKOV, J. K.: Effect of strain on the reactivity of metal surfaces. *Phys. Rev. Letter* 81, 2819 (1998)
- RUBAN, A., HAMMER, B., STOLTZE, P., SKRIVER, H. L., and NORSKOV, J. K.: Surface electronic structure and reactivity of transition and noble metals. *J. Mol. Catal. A* 115, 421 (1997)
- United States Environmental Protection Agency*: Study of Exhaust Emissions from Idling Heavy-duty Diesel Trucks and Commercially Available Idle-reducing Devices. EPA420-R-02-025. October 2002
- U. S. Department of Energy, Office of Domestic and International Energy Policy*: Assessment of Costs and Benefits of Flexible and Alternative Fuel Use in the U. S. Transportation Sector: Technical Report Three: Methanol Production and Transportation Costs. Washington DC, November 1989
- WASMUS, S., and KÜVER, A.: Methanol oxidation and direct methanol fuel cells: a selective review. *J. Electroanalytical Chemistry* 461, 14–31 (1999)
- WURSTER, R.: DWV. Presentation at Hessischer Mobilitätskongress 2003
- ZIZELMAN, J.: Development update on delphi's solid oxide fuel cell system. Presentation at the 4th SECA meeting 2003

Prof. Dr. Ulrich STIMMING
Technische Universität München
Physik-Department E19
James-Frank-Straße 1
85748 Garching
Germany
Tel: +49 89 28912531
Fax: +49 89 28912530
E-Mail: stimming@ph.tum.de

Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen – Potentiale, Herstellung, Perspektiven

Michael SPECHT, Ulrich ZUBERBÜHLER und Andreas BANDI (Stuttgart)

Mit 6 Abbildungen und 3 Tabellen



Zusammenfassung

Biomassepotentiale zur energetischen Nutzung sind zwar limitiert, sie können aber einen erheblichen Teil des Energiebedarfs decken. Unter der Annahme, daß 50 % der energetisch nutzbaren Biomasse für die Kraftstoffherzeugung zur Anwendung im Verkehrsbereich verwendet werden, ergibt sich – bei einem moderaten Zubau von Energiepflanzen auf 2 Mio. Hektar – für Deutschland ein Substitutionspotential von ca. 7 %. Aufgrund der Energieverbrauchsstrukturen und der zur Verfügung stehenden Agrarflächen resultieren für die Europäische Union deutlich höhere Anteile von ca. 11 % für die EU-15 bzw. ca. 17 % für die EU-27. Das weltweite Potential beträgt ca. 27 %. In Ländern mit zukünftig sinkendem Kraftstoffverbrauch wie Deutschland, können die Substitutionspotentiale auch deutlich überschritten werden.

Ein wesentliches Entscheidungskriterium für einen Kraftstoffpfad ist aufgrund der begrenzten Anbaufläche der Flächenertrag. Die spezifischen Flächenerträge von Kraftstoffen aus angebaute Biomasse unterscheiden sich je nach Agrarprodukt und Konversionspfad erheblich und liegen für Mitteleuropa in einer Bandbreite von ca. 11 MWh Biodiesel aus Raps bis ca. 40 MWh Wasserstoff aus *Miscanthus* (pro Hektar und Jahr). Bei einer durchschnittlichen jährlichen Fahrstrecke von 12000 km reicht ein Hektar Anbaufläche zur Versorgung von 1,2 Fahrzeugen (Biodiesel aus Raps, heutiger Durchschnittsverbrauch mit 8-l-Dieseläquivalent) bis zu 11 Fahrzeugen zukünftig (Wasserstoff aus *Miscanthus*, Verbrauch 3-l-Dieseläquivalent).

Die Konversionstechnologien mit hohen Flächenerträgen sind fermentative Verfahren zur Erzeugung von methanhaltigen Produktgasen (Erdgassubstitut aus Biogas) und thermochemische Vergasungsprozesse zur Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen aus Synthesegas. Die thermochemischen Verfahren sind jedoch – im Gegensatz zur Erzeugung von Biodiesel, Ethanol und Biogas – noch nicht Stand der Technik. Aufgrund der Technologieverfügbarkeit werden zuerst die regenerativen Kraftstoffe am Markt abgesetzt werden, die die momentan existierende Infrastruktur bedienen können. Dies sind kurzfristig Biodiesel als Reinkraftstoff und als Zumischung zu Diesel sowie Ethanol bzw. das aus Ethanol hergestellte Antiklopffmittel ETBE (Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether) als Zumischung zum Ottokraftstoff. Mittelfristig mögliche regenerative Kraftstoffe sind flüssige Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe (z. B. Benzin- und Diesel-Substitute), Methanol, Dimethylether (DME) und Erdgassubstitut (SNG). Erst sehr langfristig wird sich Wasserstoff aufgrund der hohen Infrastrukturerfordernisse als Kraftstoff für den Verkehr am Markt durchsetzen können.

Auch erneuerbare Elektrizität kann, ohne Limitierung durch biogene Ressourcen, zur Erzeugung von Kraftstoffen verwendet werden. Elektrolytisch erzeugter Wasserstoff läßt sich entweder direkt als Energieträger im Verkehr einsetzen oder zusammen mit Kohlendioxid zur Synthese von synthetischen, kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen. Wegen der heutigen Stromerzeugungsstrukturen und der Nutzungskonkurrenz durch direkte elektrische Verbraucher ist die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff jedoch nur eine sehr langfristige Option.

Abstract

A substantial part of the energy consumption could be covered by biomass. With the assumption, that 50 % of biomass, usable for energy purposes, are employed for fuel generation – and 2 million hectares agricultural area in Germany are available for energy plants – approx. 7 % of the present country's fuel consumption for transportation may be substituted by biofuels. Taking into account the agricultural areas of the EU, this potential appears substantially higher, approx. 11 % for EU-15 and 17 % for EU-27. The world-wide potential is estimated to approx. 27 %. In countries with decreasing fuel consumption for transport like Germany, the substitution potentials can be exceeded in the future.

Due to the limited availability of agricultural area, an important selection criterion for future fuels is the specific fuel yield per hectare cultivated area. The specific fuel yield differs substantially and ranges between approx. 11 MWh for bio-diesel made from rape seed and 40 MWh for hydrogen from *Miscanthus* (per hectare and year). Thus, considering an average mileage of 12,000 km, one hectare cultivated area can supply fuel for 1.2 vehicles (assuming bio-diesel from rape seed and present average fuel consumption of 8-l-Diesel equivalent) to 11 vehicles in future (hydrogen from *Miscanthus*, 3-l-Diesel equivalent).

The conversion technologies which lead to high yields per hectare are fermentative processes for the production of methane containing product gases (substitute natural gas, SNG) and thermochemical gasification processes for the production of hydrogen and synthetic fuels from synthesis gas. However, thermochemical conversion is in a developing stage so far, whereas production technologies of bio-ethanol, bio-diesel and bio-gas are state of the art. Depending on the availability of technologies, first priority will be given to renewable fuels which are compatible

with the current fuel supply and distribution infrastructure. These are in short term bio-diesel as neat fuel and/or as blend, as well as ethanol and/or the octane booster ETBE (Ethyl-Tertiary-Butyl-Ether) added to petrol. Medium term possible renewable fuels are Fischer-Tropsch hydrocarbons (e. g. petrol and diesel substitutes), methanol, dimethylether (DME) and SNG. Hydrogen will possibly become a generally accepted fuel in the long term only, due to its specific infrastructure requirements.

Renewable electricity as source for hydrogen may have a substantial contribution to renewable transportation fuel generation in the future, as it is not subject to the availability limitations of the biomass resources. Electrolytic hydrogen can directly be used as transportation fuel, or together with CO₂ for the synthesis of carbon based fuel. Due to the competition between direct consumption of electricity and use for electrolysis, electrolytic hydrogen will be only a long term option.

1. Einleitung: Warum regenerative Kraftstoffe?

Der Verkehrsbereich verursacht einerseits einen hohen Anteil am CO₂-Eintrag in die Atmosphäre, andererseits bewirken die Abgase des Verkehrs insbesondere in Ballungsräumen eine hohe lokale Belastung durch Luftschadstoffe. Neben der Effizienzsteigerung und Emissionsminderung konventioneller Verbrennungskraftmaschinen muß längerfristig eine grundsätzliche Änderung des Kraftstoffangebots stattfinden, die sowohl globale klimarelevante Auswirkungen als auch lokale Schadstoffbelastungen vermeidet. Dazu gehört die Einführung neuer Antriebstechniken (z. B. Brennstoffzellen), aber auch die Weiterentwicklung konventioneller verbrennungsmotorischer Konzepte, die längerfristig mit einem steigenden Anteil an regenerativen Kraftstoffen¹ versorgt werden. Ein weiterer Grund für die Einführung von regenerativen Alternativen im Kraftstoffmarkt ist die nahezu völlige Abhängigkeit des Verkehrsbereichs vom Rohöl. Während sowohl der Strom- als auch der Wärmebedarf von einem breiten Primärenergiemix gedeckt werden, ist die Kraftstoffherzeugung für den Verkehr in der EU-15 mit über 99 % fast ausschließlich vom Rohöl abhängig.

Für die Erzeugung von Wärme und Strom aus erneuerbaren Energien existiert eine Vielzahl von Optionen, während dies für C-basierte Kraftstoffe nur sehr eingeschränkt gilt. Von den verschiedenen Möglichkeiten, diese Kraftstoffe bereitzustellen, kommt aufgrund der Verfügbarkeit des organisch eingebundenen Kohlenstoffs und aus Kostengründen auf absehbare Zeit nur die Erzeugung aus Biomasse in Frage. Erst sehr langfristig stehen neben den biogenen Ressourcen die regenerativ erzeugte Elektrizität und auch CO₂ als »Rohstoff« (z. B. aus Luft oder Rauchgasen) für eine Herstellung von Kraftstoffen zur Verfügung, die keiner Ressourcenlimitierung unterliegen.

Die Erschließung erneuerbarer Energie für den Verkehrsbereich fand jedoch in der energiepolitischen Diskussion bisher kaum Beachtung. Wenige Ausnahmen sind z. B. in Deutschland Biodiesel und in Brasilien Ethanol. Neben diesen Kraftstoffen kommen aber eine Reihe weiterer kohlenstoffhaltiger Verbindungen in Betracht, die sich aus regenerativen Ressourcen herstellen lassen: Methanol und Dimethylether sowie flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe wie synthetische Benzin-/Diesel-Kraftstoffe und methanhaltige Gase.

Die Frage, ob und wie erneuerbare Energien, vor allem Biomasse, im Verkehrsbereich nutzbar gemacht werden können und welcher regenerative Kraftstoff der geeignetste ist, hängt von verschiedenen Rahmenbedingungen ab, die derzeit nicht abschließend bewertet werden können. Die CO₂-Vermeidungskosten bei der Gewinnung biogener Kraftstoffe sind deutlich

¹ Als 'regenerative Kraftstoffe' werden hier die Energieträger bezeichnet, die sich aus erneuerbarer Primärenergie herstellen lassen und sich insbesondere für die Anwendung im Verkehrsbereich eignen.

höher als bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse. Hinzu kommt, daß – wegen der relativ hohen CO₂-Emissionen bei der Elektrizitätserzeugung in Deutschland – regenerativer Strom aus Biomasse deutlich mehr CO₂ vermeidet als die Erzeugung von Kraftstoff aus Biomasse. Aus den genannten Gründen sowie aufgrund der Ressourcenlimitierung wird es zukünftig eine Nutzungskonkurrenz um die Biomasse geben. Hier stellt sich die Frage, welcher Stellenwert einer Diversifikation bezüglich der Rohstoffbasis im Kraftstoffmarkt und damit der Versorgungssicherheit zukünftig zugemessen wird. Von der Beantwortung dieser Fragen wird die weitere Entwicklung des Marktanteils regenerativer Kraftstoffe entscheidend abhängen.

Um den Anteil alternativer² und regenerativer Kraftstoffe zu steigern, wurden seitens der deutschen und europäischen Politik Rahmenbedingungen geschaffen, die die Marktdurchdringung entscheidend mitbestimmen werden. In Deutschland sind regenerative Kraftstoffe seit dem 1. 1. 2004 vollständig – auch in Höhe ihres Anteils in Kraftstoffmischungen – von der Mineralölsteuer befreit.

Die Zielquoten der Europäischen Union (EU 2001) für die Anteile alternativer Kraftstoffe am gesamten Kraftstoffmarkt im Verkehrsbereich bis zum Jahr 2020 sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1 Zielquoten alternativer Kraftstoffe in der Europäischen Union

| Jahr | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 |
|---------------------|------|------|------|------|
| biogene Kraftstoffe | 2 % | 6 % | 7 % | 8 % |
| Erdgas | 0 % | 2 % | 5 % | 10 % |
| Wasserstoff | 0 % | 0 % | 2 % | 5 % |
| Gesamt | 2 % | 8 % | 14 % | 23 % |

Um diese hohen Anteile zu erzielen, sind enorme Anstrengungen nötig, bei denen die Wahl der »richtigen« Kraftstoffpfade von wesentlicher Bedeutung ist. Im Rahmen des vorliegenden Beitrages werden die aussichtsreichsten Optionen regenerativer Kraftstoffe, deren Eigenschaften und Herstellungspfade sowie die primärenergetischen Potentiale und Kosten beschrieben.

2. Ressourcen für die Erzeugung regenerativer Kraftstoffe

Biomasse bietet vielfältige Möglichkeiten der energetischen Nutzung. Die Bandbreite reicht von der Wärme-/Stromerzeugung durch Verbrennung, über die Herstellung von festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen für den Einsatz in der Kraft-Wärme-Kopplung, bis zur Herstellung von Kraftstoffen für den Transportsektor, wobei aus technischer Sicht auch hier mehrere Konversionspfade möglich sind. Es stellt sich die Frage, wann es zu einer Konkurrenzsituation um die Nutzung von Bioenergieträgern in den Nutzungssektoren kommen wird und wie gegebenenfalls Prioritäten zu setzen sind. Das Biomassepotential setzt sich aus den unterschiedlichsten Einsatzstoffen zusammen, welche nicht für alle Konversionsverfahren

² Im Unterschied zu den 'regenerativen Kraftstoffen' können 'alternative Kraftstoffe' sowohl aus fossiler als auch aus erneuerbarer Primärenergie hergestellt werden.

gleichermaßen geeignet sind. Deshalb wird sich durch technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen eine Potentialaufteilung einstellen. Zusätzlich existieren energiepolitische Rahmenbedingungen, die jedoch – sind sie erst einmal festgelegt – nur sehr schwer zu ändern sind.

Offen ist, welcher Anteil des Biomasse-Potentials zukünftig einerseits für die Strom- und Wärmeerzeugung und andererseits zur Herstellung von Kraftstoffen zu verwenden ist (Abb. 1). In diversen Potentialstudien wird der auf die Kraftstoffherzeugung entfallende Anteil pauschal mit 50 % angegeben.

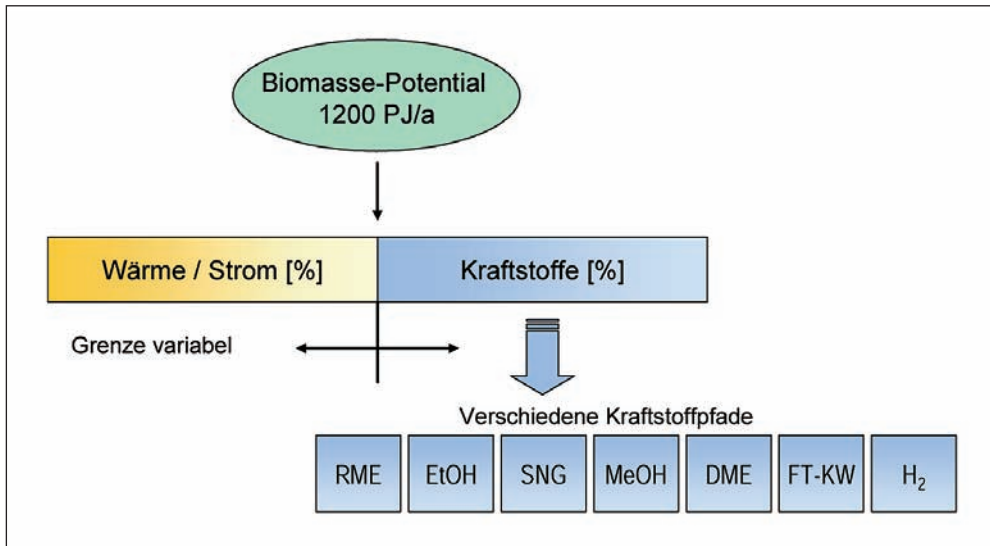


Abb. 1 Technisches Biomassepotential in Deutschland und Nutzungsmöglichkeiten in den Sektoren Wärme, Strom und Kraftstoffe. Anmerkung: RME – Rapsölmethylether, Biodiesel; EtOH – Ethanol; SNG – Erdgassubstitut, *Substitute Natural Gas*; MeOH – Methanol; DME – Dimethylether, Kraftstoff für Dieselmotoren; FT-KW – Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe, synthetische Benzin-/Diesel-Kraftstoffe

Im Folgenden sind wichtige Kriterien für die Betrachtung einer Potentialaufteilung aufgeführt:

- Anforderungen an den Aufbau neuer Versorgungsstrukturen im Wärmemarkt;
- Diversifizierung bei den Energieträgern für den Verkehr;
- räumliche Verteilung des Biomasseaufkommens;
- Verfügbarkeit von Kohlenstoff außerhalb der fossilen Ressourcen (Biomasse ist der einzige regenerative Energieträger, der Kohlenstoff in konzentrierter Form enthält);
- CO₂-Minderungspotential in den verschiedenen Nutzungspfaden;
- Kosten der Biomasseumwandlung;
- bestehende politische Zielsetzungen (z. B. Verdopplungsziel für die Erneuerbaren Energien, Ausbauziel für den Biomasseeinsatz zur Kraftstoffproduktion (EU 2001).

2.1 Technisches Biomassepotential

Die in Deutschland und Europa vorhandenen Biomassepotentiale sind in einer Vielzahl von Studien abgeschätzt worden. Das technische Biomassepotential in Deutschland ist basierend auf diesen Ergebnissen und eigenen Recherchen in Abbildung 2 dargestellt (*ReFuelNet* 2004). Danach beträgt das technische Potential im Mittel etwa 1 260 PJ/a. Damit ließen sich rein rechnerisch 8,7 % des gegenwärtigen Primärenergieverbrauchs oder – bei einer mittleren Konversionsrate von Biomasse in Kraftstoffe von 50 % – etwa 23 % des heutigen Kraftstoffverbrauchs decken.

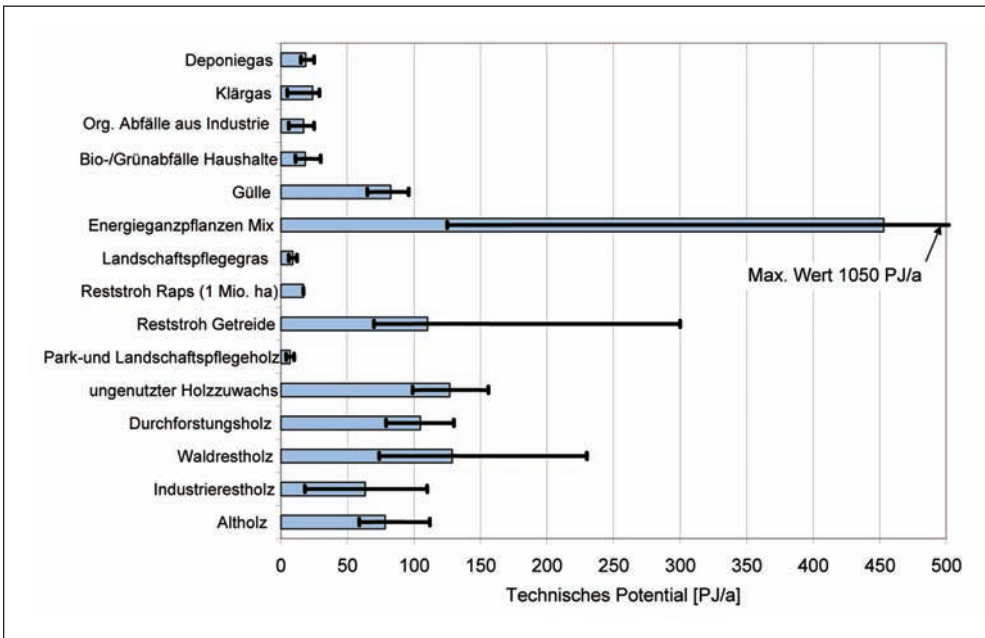


Abb. 2 Zusammensetzung des Technischen Biomassepotentials (1260 PJ/a) in Deutschland.
Anmerkung: Angegeben ist jeweils der Mittelwert und die Bandbreite verschiedener Studienergebnisse.

Das Biomassepotential besteht zum überwiegenden Teil aus holzartiger Biomasse (43 %), wovon etwa ein Viertel auf den ungenutzten Holzzuwachs entfällt. Ebenfalls erheblich ist das Aufkommen an Reststroh aus der Landwirtschaft und insbesondere das Potential des gezielten Anbaus von Energiepflanzen. Der hier angegebene Betrag basiert auf der Annahme, daß in Deutschland dauerhaft auf etwa 2 Mio. Hektar nachwachsende Rohstoffe oder Energiepflanzen angebaut werden können. In der Literatur finden sich jedoch teilweise niedrigere, mit bis zu 4 Mio. Hektar, aber auch deutlich höhere Angaben (*ReFuelNet* 2004). (Zum Vergleich: Die derzeit genutzte Ackerfläche in Deutschland beträgt ca. 11,5 Mio. Hektar.)

2.2 »Freies« Biomassepotential für die Kraftstoffbereitstellung

Von dem technischen Biomassepotential kann nur ein Teil für die Erzeugung von regenerativen Kraftstoffen verwendet werden. Zu berücksichtigen sind dabei bereits etablierte und ab-

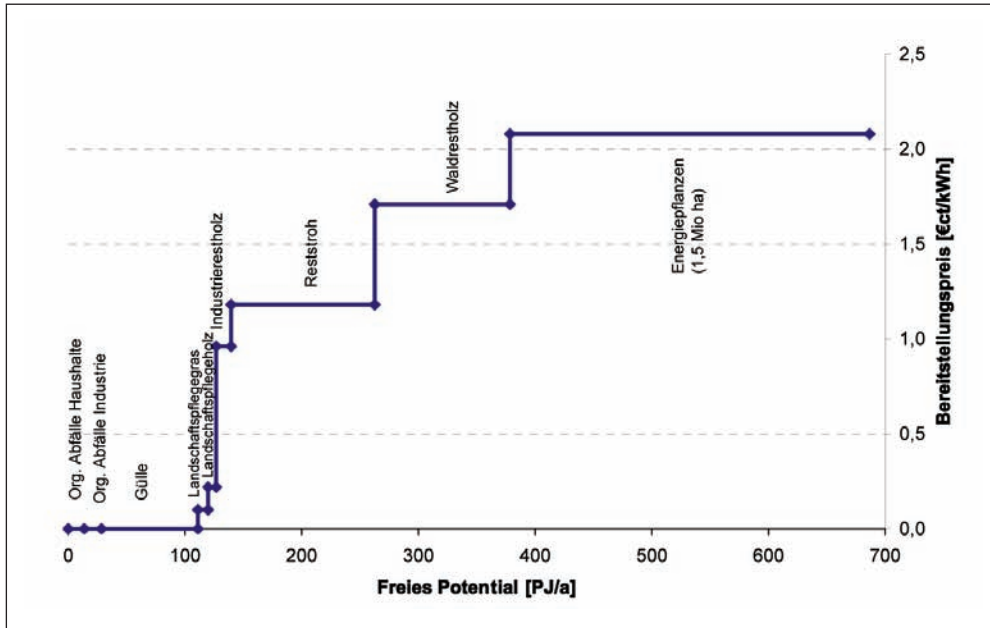


Abb. 3 Kosten-Potential-Kurve für das »freie« Biomassepotential in Deutschland

sehbare Stoffströme für die Wärmebereitstellung und Stromerzeugung. Hierbei handelt es sich einerseits um traditionell gewachsene Strukturen wie die Holznutzung im privaten Bereich oder im holzbe- und -verarbeitenden Gewerbe. Andererseits wurden und werden durch Förderprogramme auf Bundes- und Landesebene oder das Erneuerbare-Energien-Gesetz gezielt bestimmte Anwendungen unterstützt. Es ist davon auszugehen, daß im Zuge des durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz induzierten Baus von Holz(heiz)kraftwerken in zwei bis drei Jahren die Potentiale von Altholz praktisch vollständig erschlossen sein werden. Unter Berücksichtigung bereits etablierter Biomassestoffströme im Bereich der Wärme- und Stromerzeugung reduziert sich das »freie« Potential auf etwa die Hälfte des oben genannten technischen Potentials.

Wie realistisch die Ausschöpfung der Ressourcen ist, hängt von zahlreichen weiteren Randbedingungen ab, nicht zuletzt von den Kosten. Abbildung 3 zeigt dazu die Kosten-Potential-Kurve für das »freie« Nutzungspotential, das mit gegenwärtigen bzw. absehbaren Bereitstellungskosten korreliert wurde. Nennenswerte Potentiale für mobile Anwendungen finden sich bei Gülle und Reststroh aus der Landwirtschaft (insgesamt ca. 200 PJ/a). Die Potentiale bei Waldrestholz und Energiepflanzen sind etwa doppelt so groß, mit bis zu 2 Eurocent/kWh aber deutlich teurer. Bei einem angenommenen Konversionsgrad der Bereitstellung regenerativer Kraftstoffe aus Biomasse von 50 % bedeutet dies, daß sich allein der Biomassekostenanteil je Liter Benzinäquivalent auf ca. 0,40 Euro beläuft.

Bezogen auf den heutigen Kraftstoffverbrauch in Deutschland und den Annahmen, daß 50 % des »freien« Biomassepotentials für die Erzeugung von Kraftstoffen mit einem durchschnittlichen energetischen Wirkungsgrad von 50 % verwendet werden (Faktor »Anteil × Ef-

fizienz« = 0,25) ergibt sich ein Substitutionspotential von 7 % (siehe Tab. 2). Der Faktor »Anteil × Effizienz« berücksichtigt neben der Effizienz der Umwandlung der Primärressource zu Kraftstoff den Anteil der Biomasse, der für die Kraftstofferzeugung verwendet werden kann. Der in der Spalte »EU-27« und »Welt« geringfügig höhere Faktor beinhaltet das Verhältnis von Biomasseaufkommen und Bevölkerungsdichte. Aufgrund limitierter Transportwege und eines geringeren Eigenverbrauchs stehen bei geringerer Bevölkerungsdichte mehr biogene Ressourcen für die Kraftstofferzeugung zur Verfügung. Wegen der deutlich höheren Energiedichte lassen sich die regenerativ erzeugten Kraftstoffe besser transportieren als die Biomasse, aus der sie erzeugt werden.

Das »freie« Biomassepotential wird auch weltweit durch den Verbrauch von Biomasse für energetische Zwecke (insbesondere in den Ländern der 3. Welt) stark reduziert. Mit ca. 45 EJ/a trägt die Biomasse derzeit zu immerhin ca. 11 % zur Deckung des Weltprimärenergieverbrauchs bei (IEA 2001) – bei einem weltweiten Verbrauch an Kraftstoffen von 70,2 EJ/a.

Zum Vergleich sind Abschätzungen der Biomassepotentiale und der sich ergebenden Kraftstoffsubstitutionspotentiale auch für die EU-15 (11 %), die EU-27 (17 %) sowie weltweit (27 %) in Tabelle 2 dargestellt. Bezogen auf den momentanen Verbrauch kann also immer nur ein Teil des Kraftstoffbedarfs aus biomassestämmigen Ressourcen gedeckt werden. Dies gilt insbesondere für industrialisierte Länder mit einem hohen Energieverbrauch und limitierter landwirtschaftlicher Fläche. Die prozentualen Substitutionspotentiale können aber erheblich gesteigert werden, wenn die Bereitstellung regenerativer Kraftstoffe mit einer Effizienzsteigerung/Verbrauchsreduzierung der Fahrzeugantriebe einhergeht (z. B. »3-l-Auto«). Dies gilt vor allem für Länder wie Deutschland mit einem zurückgehenden Verbrauch an Kraftstoffen für den Verkehr. Andererseits ist weltweit ein steigender Verbrauch durch ein stark zunehmendes Verkehrsaufkommen zu verzeichnen, der zumindest kurzfristig durch eine Effizienzsteigerung nicht aufgefangen werden kann.

Tab. 2 Deutsche, europäische und weltweite Substitutionspotentiale regenerativer Kraftstoffe aus Biomasse

| | Deutschland | EU-15 | EU-27 ^[3] | Welt |
|--|-------------|-------|----------------------|-------|
| Kraftstoffverbrauch ^[1] [EJ/a] | 2,7 | 10,5 | 12,0 | 70,2 |
| Technisches Biomassepotential [EJ/a] | 1,2 | 6,8 | 8,9 | 109,0 |
| »Freies« Biomassepotential [EJ/a] | 0,7 | 4,6 | 6,9 | 63,8 |
| Faktor ^[2] : »Anteil × Effizienz« | 0,25 | 0,25 | 0,3 | 0,3 |
| Kraftstoff-Substitutionspotential [EJ/a] | 0,2 | 1,2 | 2,1 | 19,1 |
| Kraftstoff-Substitutionspotential [%] | 7 | 11 | 17 | 27 |

[1] Kraftstoffverbrauch im Verkehrsbereich (1999). [2] Der Faktor »Anteil × Effizienz« berücksichtigt den Anteil von Biomasse, der zur Erzeugung von Kraftstoffen verwendet wird und die energetische Effizienz der Konversion. [3] Inklusive Rumänien und Bulgarien.

2.3 Kraftstoff-Flächenerträge bei unterschiedlichen Herstellungspfaden

Da zumindest in Deutschland landwirtschaftliche Anbauflächen nur begrenzt zur Verfügung stehen, ist der pro Fläche erzielbare Kraftstofftertrag für die Kraftstoffherstellung von besonderer Bedeutung. Wie aus Abbildung 4 hervorgeht, gibt es bezüglich der erzielbaren Flächenerträge erhebliche Unterschiede zwischen den Herstellungspfaden verschiedener Kraftstoffe. Die Flächenerträge sind als erzielbare Energie an Kraftstoff pro Hektar und Jahr auf-

getragen. Die verschiedenen Kraftstoffe benötigen zur ihrer Herstellung unterschiedliche Mengen an nicht erneuerbarer Energie, was durch den zweiten, kleineren Balken in Abbildung 4 symbolisiert wird, bei dem der nicht erneuerbare Energieanteil von den Bruttoerträgen abgezogen ist. Zusätzlich ist die Variationsbreite bei den Nettoerträgen dargestellt (DREIER 2000, *ReFuelNet* 2004, SCHINDLER und WEINDORF 2003, ZSW 2004).

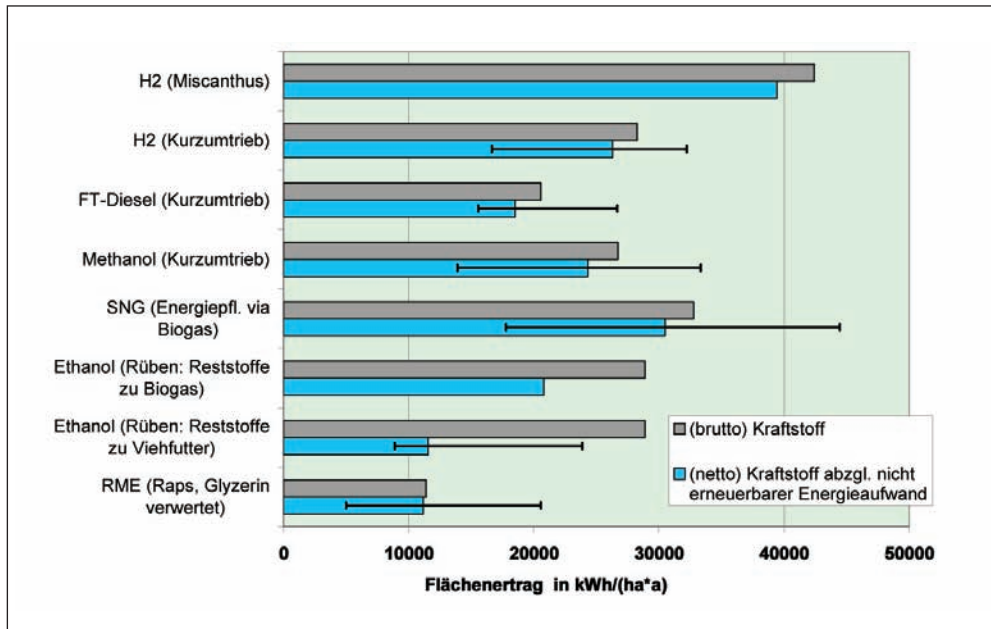


Abb. 4 Flächenerträge an Kraftstoff pro Hektar und Jahr für verschiedene Kraftstoffpfade – brutto und netto (abzüglich der zur Herstellung benötigten, nicht erneuerbaren Energie). Anmerkung: mitteleuropäische Klimabedingungen. Die angegebenen Bandbreiten resultieren aus verschiedenen Berechnungen. H2 – Druckwasserstoff bei 250 bar; SNG – Erdgassubstitut bei 250 bar

Die Netto-Kraftstoffenerträge mit den höchsten Erträgen sind mit Herstellungsverfahren zu erzielen, die über eine primäre Gaserzeugung ablaufen (Synthesegas- bzw. Biogaserzeugung). Bei Verfahren, die nur bestimmte Pflanzenteile wie Öl, Zucker und Stärke nutzen (RME, Ethanol), sind die Flächenerträge kleiner. Die Bandbreite reicht unter mitteleuropäischen Klimabedingungen hierbei von ca. 11 MWh/(ha × a) für Biodiesel aus Raps bis zu ca. 40 MWh/(ha × a) für die Erzeugung von Wasserstoff aus *Miscanthus* über die thermochemische Vergasung.

Für den derzeit schon genutzten Kraftstoff Ethanol sind zwei unterschiedliche Herstellungsvarianten mit identischem Brutto-Kraftstoffenertrag angegeben, die sich aber im Nettoertrag unterscheiden. Die Differenzen resultieren aus der unterschiedlichen Nutzung der Rest- bzw. Nebenprodukte. In einem Fall wird Biogas aus den anfallenden Reststoffen gewonnen, was den Einsatz an nicht erneuerbarer Energie vermindert und somit netto einen höheren Ertrag ermöglicht als bei einer stofflichen Verwertung als Futter.

Um aufzuzeigen, in welcher Bandbreite die Anzahl von Fahrzeugen liegt, die pro Hektar Anbaufläche versorgt werden können, seien zwei extreme Beispiele mit einem sehr hohen und

einem sehr niedrigen Flächenertrag bei unterschiedlichem Energiebedarf für den Fahrentrieb kurz dargestellt. Unterstellt man einen durchschnittlichen Verbrauch eines Fahrzeugs mit 8 l Diesel pro 100 km und eine jährliche Fahrstrecke von 12000 km, reicht ein Hektar Anbaufläche im Fall von Biodiesel zur Versorgung von ca. 1,2 Fahrzeugen. Bei zukünftigen, energie-sparenden Fahrzeugen mit einem Verbrauch von 3-l-Dieseläquivalent (konventionell oder Brennstoffzellen-Antrieb) und gleicher jährlicher Fahrstrecke können immerhin 11 Fahrzeuge bedient werden, wenn Wasserstoff über eine thermochemische Vergasung von *Miscanthus* hergestellt wird. Ohne sich bereits jetzt auf einen konkreten Pfad festzulegen, soll dieses Zahlenbeispiel verdeutlichen, daß die Einführung »flächeneffizienter« Kraftstoffe von »energieeffizienten« Fahrzeugantrieben begleitet werden muß. (Zum Vergleich: Ein Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche reicht unter mitteleuropäischen Klimabedingungen bei den heutigen Konsumgewohnheiten in Deutschland im Durchschnitt zur Versorgung von ca. 5 Einwohnern mit Nahrungsmitteln.)

2.4 Bedeutung regenerativ erzeugter Elektrizität für die Kraftstoffherzeugung

Auch die Verfügbarkeit von erneuerbarer Elektrizität ist für die Erzeugung regenerativer Kraftstoffe von entscheidender Bedeutung. Hierbei steht nicht die elektrolytische Wasserstoffherzeugung zum Spitzenlastausgleich bei der Elektrizitätsversorgung im Vordergrund, sondern der Import regenerativen Stroms. Die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff zur Dämpfung der Fluktuation regenerativer Strombereitstellung ist ein allenfalls langfristig relevanter Aspekt. Bei regenerativen Stromanteilen bis etwa 30 % in Deutschland sind keine Überschüsse zu erwarten (LANGNISS 1997, NITSCH und TRIEB 2000, QUASCHNING 1999). Erst bei Überschreiten dieses Anteils wird Überschußelektrizität verfügbar sein. Diese Überschüsse können zwar eine hohe Leistung aufweisen, stellen jedoch nur Strommengen in der Größenordnung zwischen 5 und 30 TWh/a bereit.

Langfristig zeichnet sich mit der Möglichkeit des Imports erneuerbar erzeugten Stroms über Hochspannungsleitungen eine weitere Option ab, den Anteil erneuerbarer Energieträger in Deutschland zu erhöhen. In manchen Ländern sind bereits heute die erneuerbaren Energiepotentiale nur durch Export oder verstärkte Ansiedlung energieintensiver Industrien zu erschließen (z. B. Norwegen und Island), da diese Länder fast ausschließlich regenerativen Strom nutzen. Nachfolgend sind beispielhaft technische Potentiale für einen möglichen Import regenerativ erzeugten Stroms in TWh/a angegeben: Windkraft Europa: 400–3000; Windkraft Marokko: 300–600; Wasserkraft Norwegen: 60; Wasserkraft Island 30; Wasserkraft GUS: 1300 und Solarstrom aus Nordafrika: $> 10^6$ (NITSCH und TRIEB 2000). (Zum Vergleich: Der deutsche Stromverbrauch lag 2003: bei 589 TWh/a; *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen* 2004).

In Nordafrika bestehen enorme Solarstrompotentiale, die durch solarthermische und gegebenenfalls auch durch Photovoltaik-Kraftwerke erschlossen werden können. Bereits 1 % der dort nutzbaren technischen Potentiale könnte rechnerisch den gesamten heutigen Weltstrombedarf decken. Natürlich ist eine solche Konzentration auf eine einzige Ressource wenig sinnvoll, aber das Zahlenbeispiel zeigt die große Bedeutung dieser Region für eine zukünftige regenerative Stromversorgung Europas im Rahmen eines Nord-Süd-Verbunds. Zudem ist der Export regenerativ erzeugter Elektrizität für die betreffenden Regionen auch mit einer wirtschaftlichen und infrastrukturellen Entwicklung verbunden.

Die regenerative Elektrizität kann zur Erzeugung von elektrolytischem Wasserstoff verwendet werden, der drei verschiedene Verwertungswege zuläßt:

- Wasserstoff wird direkt als Sekundärenergieträger eingesetzt.
- Wasserstoff kann zur Deckung des Wasserstoffdefizits bei der Erzeugung synthese gasstämmiger, kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe aus Biomasse verwendet werden. Da der H₂-Anteil in biomassestämmigen Synthesegasen zu gering ist (vgl. Kap. 3.2), wird durch Zugabe von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff die Menge an Kraftstoff je nach Verfahrensvariante um ein Mehrfaches gesteigert. So ist beispielsweise bei der Methanolsynthese über einen Biomasse-Vergasungsprozeß im Fall der H₂-Zugabe eine 3-fach höhere Produktmenge zu erzielen (SPECHT et al. 1999b). Die Einbindung zusätzlichen Wasserstoffs bietet somit die Möglichkeit, eine hohe Konversion von Biomasse-Kohlenstoff in Kraftstoff-Kohlenstoff (> 80 %) zu erzielen.
- Wasserstoff wird zusammen mit Kohlendioxid als Edukt zur Synthese kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe eingesetzt (ohne die Nutzung biogener Ressourcen als Kohlenstoffquelle).

3. Regenerative Kraftstoffe und deren Bereitstellungspfade

Neben Benzin und Diesel kommen eine Reihe weiterer Kraftstoffe für den Verkehrsbereich in Frage, von denen die wichtigsten kurz beschrieben werden. Welche regenerativen Kraftstoffe am ehesten Benzin und Diesel im Verkehr zu substituieren vermögen, hängt von folgenden Kriterien ab:

- Versorgungssicherheit/Diversifizierung der Ressourcen;
- CO₂- und Schadstoff-Emissionen (der gesamten Systemkette, »well-to-wheel«);
- Lokalemissionen (vor allem in verkehrsbelasteten Ballungsräumen);
- Flächenertrag an Kraftstoff pro landwirtschaftlicher Nutzfläche;
- energetische Effizienz der gesamten Systemkette;
- Infrastrukturerfordernisse/Komplexität im Fahrzeug;
- Reichweite des Fahrzeugs mit einer Tankfüllung;
- Kraftstoffgestehungskosten/CO₂-Vermeidungskosten;
- Eignung für verschiedene Antriebssysteme (Verbrennungsmotor/Brennstoffzelle);
- Akzeptanz, Toxizität, Sicherheit;
- Beschäftigungseffekte.

3.1 Kraftstoffoptionen

Die einzigen heute in größeren Mengen produzierten Kraftstoffe aus Biomasse für den Verkehr sind Pflanzenölmethylester (in Deutschland im wesentlichen Rapsölmethylester, RME) und Ethanol, die im Folgenden kurz dargestellt werden. Anschließend werden die heute kaum verbreiteten Kraftstoffe Wasserstoff, Methanol, Dimethylether, synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe und methanhaltige Gase (SNG) als Alternativen zu den erdölstämmigen Kraftstoffen beschrieben.

Pflanzenöle/Pflanzenölester

Bei der Nutzung biogener Kraftstoffe spielt in Deutschland derzeit nur der Rapsölmethylester (sogenannter Biodiesel) eine Rolle. Biodiesel hat in Deutschland zurzeit einen Anteil am gesamten Kraftstoffmarkt (Otto-, Diesel- und Flugturbinenkraftstoff) von 0,8 %, der Anteil am Markt für Dieselmotorkraftstoff beträgt 1,7 % (STAISS 2003). Biodiesel wird heute an über 1700 öffentlichen Tankstellen angeboten und ist somit derzeit der einzige flächendeckend verfügbare regenerative Kraftstoff in Deutschland. Nur etwa 40 % des Biodiesels werden über Tankstellen verkauft, während 60 % an Fahrzeugflottenbetreiber des Transport- und Güterverkehrs abgesetzt werden.

Zur Anwendung in Dieselmotoren wird das durch Pressung/Extraktion gewonnene Pflanzenöl mit Methanol umgeestert, um so einen Kraftstoff zu erzeugen, der in einem Großteil der heute existierenden Dieselmotoren einsetzbar ist. Das unveresterte Öl ist ausschließlich in speziell adaptierten Motoren verwendbar.

Die Biodieselbranche kann auf eine positive Entwicklung in den vergangenen Jahren zurückblicken. Neben den steuerpolitischen Rahmenbedingungen werden insbesondere die motor- und abgastechnischen Anforderungen die weitere Entwicklungsperspektive von Biodiesel bestimmen. Biodiesel muß sich den technischen Herausforderungen stellen, die vor allem durch die europäische Gesetzgebung zur Verschärfung der abgasrechtlichen Anforderungen als Voraussetzung für die Typenzulassung entsprechender Motoren vorgegeben werden. Die zurzeit gültigen Grenzwerte können mit Biodiesel noch ohne technische Maßnahmen erreicht werden. Zukünftig müssen Fahrzeuge aber die abgasrechtlichen Anforderungen nach Euro IV bzw. Euro V erfüllen. Aufgrund zukünftiger Abgasgrenzwerte, die im Wechselbetrieb Diesel/Biodiesel nicht mehr ohne weiteres erreicht werden, und der aktuellen Änderung des Mineralölsteuergesetzes, wonach seit dem 1. 1. 2004 auch Kraftstoffmischungen in Höhe des Biokraftstoff-Anteils steuerbefreit sind, ist dem Vertriebsweg über eine Zumischung zu Dieselmotorkraftstoff (bis 5 Vol. % RME) der Vorzug zu geben.

Aufgrund der geringen Flächenerträge haben die Kraftstoffe Biodiesel und Pflanzenöl nur ein begrenztes Substitutionspotential und sollten – neben der Zumischung zu Diesel – dort eingesetzt werden, wo der spezifische ökologische Vorteil der biologischen Abbaubarkeit von Biodiesel/Pflanzenöl zum Tragen kommt (z. B. bei der Substitution von Dieselmotorkraftstoff in sensiblen Umweltbereichen wie Landwirtschaft, Wasserschutzgebiete, Schifffahrt).

Ethanol

Weltweit hat zurzeit Ethanol die größte Bedeutung als biogener Kraftstoff. Brasilien ist mit dem »Proalcool«-Programm der größte Ethanolproduzent und -nutzer im Verkehrsbereich. Die Ethanolproduktion in Brasilien betrug im Jahr 2001 ca. 12 Milliarden Liter und entsprach damit ca. 12 % des gesamten Kraftstoffbedarfs für den Verkehr in Brasilien (BEN 2002). Auch in den USA wird Ethanol als Kraftstoffzusatz produziert. Die Menge von ca. 7 Milliarden Liter im Jahr 2001 entsprach ca. 1,5 % des Benzinabsatzes in den USA (Ethanol 2004).

Ethanol kann als Zusatz für handelsüblichen Ottokraftstoff eingesetzt werden (z. B. E5: 5 Vol. % Ethanol in Benzin), ohne daß Umstellungen an der Infrastruktur bzw. den Fahrzeugen erforderlich sind. Auch höhere Ethanolkonzentrationen (E85) bzw. reines Ethanol sind als Kraftstoff für Ottomotoren prinzipiell geeignet, erfordern aber adaptierte Verbrennungsmotoren. In E85-tauglichen Fahrzeugkonzepten wird die Kraftstoffart automatisch erkannt und die

Parameter der Motorsteuerung automatisch angepaßt, was es ermöglicht, sowohl konventionellen Kraftstoff als auch E85 zu nutzen. Ein weiterer Verwertungsweg für Ethanol ist die Erzeugung des Antiklopfmittels Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether (ETBE), das Benzin bis zu 15 Vol. % zugesetzt werden kann.

Wasserstoff

Wasserstoff ist ein idealer Kraftstoff zur Versorgung von Brennstoffzellen, aber auch von konventionellen Energiewandlern wie Verbrennungsmotoren, der aus einer Vielzahl fossiler und regenerativer Primärenergieträger zugänglich ist. Aus diesem Grund wird Wasserstoff als der zukünftige Energieträger schlechthin betrachtet. Die Nachteile von Wasserstoff sind jedoch die Infrastrukturerfordernisse für Speicherung und Transport. Ein weltweiter, vollständiger Ersatz von konventionellen Kraftstoffen durch Wasserstoff ist auch in den nächsten Jahrzehnten nicht absehbar. Eine Fokussierung allein auf die Option Wasserstoff als Energieträger sollte daher, zumindest kurz- bis mittelfristig, nicht verfolgt werden.

Methanol

Die Verwertungswege für Methanol reichen von einer Beimischung zu konventionellen Kraftstoffen bis hin zu reinem Methanol als Kraftstoff, das als Antrieb für zukünftige Brennstoffzellenantriebe geeignet ist oder sich für Fahrzeuge mit otto- und dieselmotorischem Antrieb eignet. Weitere Möglichkeiten sind die Verwendung von Methanol als Edukt zur Produktion von Dieseleratzkraftstoffen (zusammen mit Pflanzenölen), die Erzeugung des Kraftstoffes Dimethylether, die Herstellung von Kohlenwasserstoffen über den MTG-Prozeß (Methanol-To-Gasoline) oder die Erzeugung des Antiklopfmittels MTBE (Methyl-Tertiär-Butyl-Ether).

Bei der Verwendung von Methanol für Brennstoffzellen wird zwischen der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC), bei der das Methanol direkt an der Anode umgesetzt wird, und der indirekten Methanol-Brennstoffzelle unterschieden, bei der in einem vorgeschalteten Reformier Wasserstoff aus Methanol erzeugt wird. Gelingt die Kommerzialisierung der DMFC, werden sich die Chancen für Methanol als Kraftstoff deutlich erhöhen, da die Komplexität der Brennstoffzellen-Peripherie gegenüber einem Brennstoffzellen-Antrieb mit einer vorgelagerten Reformierung stark abnehmen wird.

Gegenüber den konventionellen Kraftstoffen hat Methanol einen entscheidenden Nachteil: Methanol ist zwar flüchtig, kann jedoch aufgrund korrosiver Eigenschaften nicht wie Benzin- und Dieselmotorkraftstoffe über die bestehenden Verteilungsstrukturen (Kraftstofflager, Pipelines, etc.) vertrieben werden.

Dimethylether (DME)

Dimethylether ist ein Gas, wird aber bei moderaten Drücken wie das weit verbreitete LPG (*Liquefied Petroleum Gas*, Propan/Butan, Auslegungsdruck 30 bar) gehandhabt. Hiermit kann auch die Infrastruktur für LPG mit geringfügigen Modifikationen genutzt werden. Wegen seiner hohen Cetan-Zahl ist DME ein ausgezeichneter Kraftstoff für adaptierte Dieselmotoren. Mit DME werden die hohen dieseltypischen Wirkungsgrade erreicht, aufgrund der nicht vor-

handenen C-C-Bindungen und des Sauerstoffgehaltes ist das Abgas jedoch praktisch partikelfrei. DME wird vor allem als Kraftstoff für den Schwerlastverkehr vorgeschlagen, für den nur eine relativ geringe Anzahl Tankstellen erforderlich wäre.

Synthetische Benzin-/Dieselkraftstoffe

Flüssige Kohlenwasserstoffe haben den großen Vorteil, daß sie ohne Einschränkungen über die konventionellen Transportsysteme vertrieben werden können und sich sofort in die bestehende Infrastruktur integrieren lassen. Kurzfristig lassen sich synthetische Kohlenwasserstoffe zunächst aus Erdgas über GTL-Prozesse (*Gas-To-Liquids*) herstellen und mittelfristig aus Biomasse über BTL-Verfahren (*Biomass-To-Liquids*). Diese Kraftstoffe können als Reinkraftstoffe oder als Zumischungen zu den konventionellen Kraftstoffen vermarktet werden. Längerfristig lassen sich auch adaptierte, aromatenfreie und olefinarme »Designerkraftstoffe« für adaptierte Kolbenmotoren herstellen, die die Voraussetzung für weitere Schadstoffreduzierungen verbrennungsmotorischer Konzepte bilden. Aufgrund der paraffinartigen Zusammensetzung hat dieser Kraftstoff den maximalen Wasserstoffgehalt und ist wegen des katalytischen Syntheseweges praktisch schwefelfrei. Nachteilig ist der gegenüber anderen Kraftstoffen aufwendige Herstellungsprozeß sowie eine nur sehr eingeschränkte Eignung für zukünftige Brennstoffzellen-Antriebe.

Erdgassubstitut (SNG)

Eine Vorreiterrolle zur Verwendung von regenerativ erzeugten, methanhaltigen Gasen als Energieträger spielt die derzeit steigende Verbreitung von Erdgas im Verkehrsbereich. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der Einsatz von Erdgas im Verkehr eine Diversifikation bezüglich der fossilen Ressourcen erlaubt, die Lokalemissionen deutlich geringer anfallen als bei vergleichbaren Dieselfahrzeugen und die Fahrzeuge kommerziell verfügbar sind. Weltweit werden heute über 1 Mio. Fahrzeuge mit Erdgas betrieben. Ein weiterer Grund in Deutschland ist die fiskalische Besserstellung von Erdgas gegenüber Benzin/Diesel. Da Methan gegenüber Wasserstoff eine mehr als dreifach höhere volumetrische Energiedichte aufweist, ist die gasförmige Speicherung zur Erzielung hoher Fahrzeugreichweiten deutlich einfacher möglich. Bei Verwendung von adaptierten Gasmotoren kommt der Vorteil von Methan bezüglich der geringen spezifischen CO₂-Emissionen direkt zum Tragen.

Für den flächendeckenden Ausbau der Infrastruktur plant die Gasindustrie, ca. 1 000 Erdgastankstellen in Deutschland zu errichten. Diese Tankstellen werden an strategisch wichtigen Standpunkten aufgestellt, die an die Erdgas-Versorgung angeschlossen sind (und zukünftig mit dezentralen Reformern zur Wasserstofferzeugung ausgerüstet werden können). Diese Option eröffnet die Möglichkeit, als Transportmedium für regenerative Energie Methan zu verwenden, so daß die vorhandene Verteilungsinfrastruktur verwendet werden kann, ohne in eine Transportinfrastruktur für Wasserstoff zu investieren.

Bislang wird SNG als Kraftstoff im Verkehrsbereich nur in wenigen Ländern (vor allem in Schweden und der Schweiz) angewendet (WELLINGER und LINDBERG 2004). Hierbei handelt es sich um aufbereitetes Biogas, das entweder direkt oder über eine Einspeisung in das Erdgasnetz – so daß es an beliebiger Stelle des Erdgasnetzes formal als SNG entnommen werden kann – als Kraftstoff für Fahrzeuge zur Verfügung steht.

3.2 Technische Bereitstellungspfade

Mittelfristig wird es eine verstärkte Notwendigkeit der Einführung erneuerbarer Energien in den Verkehrssektor geben. Dazu bieten sich eine Reihe unterschiedlicher Umwandlungsketten sowohl auf Basis erneuerbar erzeugten Stroms, von Biomasse als auch auf Basis der Kombination von beiden an. In Abbildung 5 sind die Hauptpfade für die Kraftstoffbereitstellung aus erneuerbarer Energie dargestellt. Die Herstellungsverfahren lassen sich grob einteilen in: extraktive, fermentative und thermochemische Verfahren sowie die Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff.

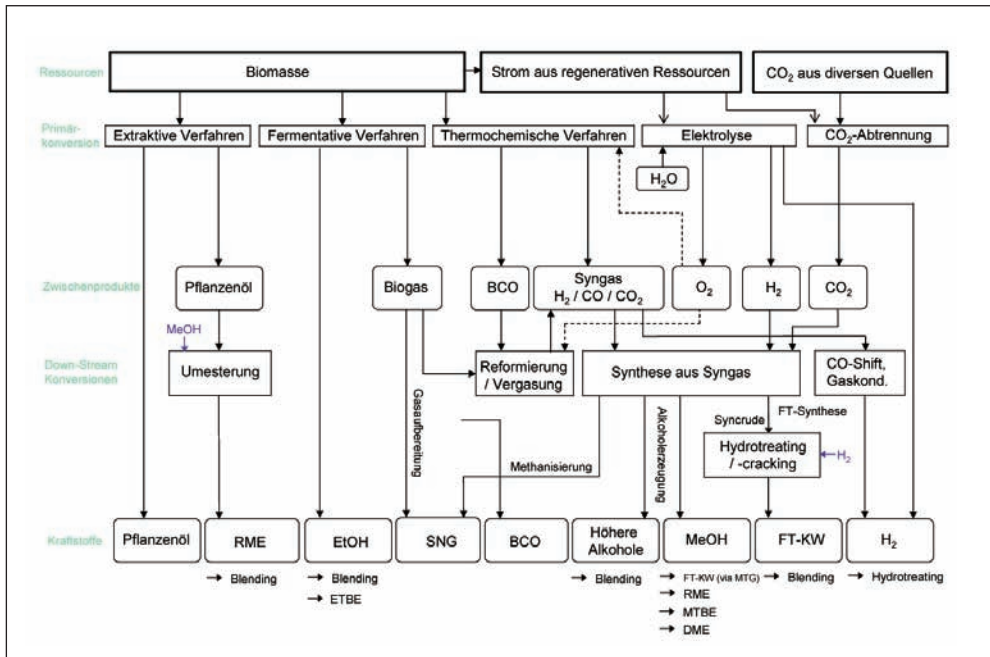


Abb. 5 Herstellungspfade regenerativer Kraftstoffe. Anmerkung: Blending – Zusatz für Benzin-/Dieselkraftstoffe; MTBE, ETBE – Methyl- bzw. Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether, Kraftstoffzusätze zur Erhöhung der Oktanzahl; Syngas – Synthesegas; Syncrude – wachtreiches Primärprodukt der Fischer-Tropsch-Synthese; MTG – *Methanol-To-Gasoline*, Herstellung von Kohlenwasserstoffen aus MeOH; DME – Dimethylether, Kraftstoff für Dieselmotoren; RME – Rapsölmethylester, Biodiesel; SNG – Erdgassubstitut, *Substitute Natural Gas*; BCO – *Bio Crude Oil*, Bio-Pyrolyseöl; FT-KW – Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe

Kraftstoffe aus Ölpflanzen

Pflanzenöl wird durch Pressen/Extraktion von Ölsaaten gewonnen und kann direkt in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Diese Anwendung beschränkt sich jedoch auf Fahrzeuge mit speziell adaptierten Motoren. Weitaus bedeutender ist der Einsatz von Biodiesel. In Deutschland wird Biodiesel hauptsächlich durch die Umesterung von Rapsöl mit Methanol hergestellt (Rapsölmethylester, RME), es können aber auch andere biomassestämmige Öle

eingesetzt werden. Der Biodieselabsatz in Deutschland betrug im Jahr 2003 ca. 0,65 Mio. t (bei einer Produktionskapazität für Biodiesel von ca. 1,2 Mio. t) (SCHNEIDER 2004). Typische Anlagengrößen reichen von 5000 t/a bis über 100000 t/a bei Neuanlagen.

Ethanol durch alkoholische Gärung

Ethanol wird durch Fermentation zucker- und stärkehaltiger Pflanzen gewonnen. Neben stärkehaltigen Pflanzen, wie z. B. Mais, sind Zuckerrohr und -rüben die am häufigsten verwendeten Ausgangsmaterialien für die Ethanolproduktion. Während zuckerhaltige Pflanzen direkt vergoren werden, muß bei Getreide die Stärke zunächst enzymatisch in Zucker umgewandelt werden. In Tabelle 3 sind die europa- und weltweit produzierten Ethanolmengen wiedergegeben.

Tab. 3 Ethanolproduktion in 10^6 Litern pro Jahr (BERG 2001)

| Jahr | 2001 | 2000 | 1999 | 1998 | 1997 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Welt | 31392 | 29936 | 31071 | 31963 | 32961 |
| Brasilien | 11900 | 11400 | 12982 | 14122 | 15493 |
| USA | 7580 | 7050 | 6605 | 6450 | 5886 |
| Europa | 4153 | 4024 | 4073 | 4140 | 4308 |
| Frankreich | 800 | 812 | 754 | 779 | 767 |
| Deutschland | 295 | 285 | 340 | 364 | 375 |

Ein relativ neues Verfahren ermöglicht den Einsatz von zellulosehaltiger Biomasse für die Ethanolproduktion, was das Potential möglicher Einsatzstoffe erheblich erweitert (Holz, Getreidestroh, ertragsstarke Energiepflanzen wie z. B. *Miscanthus*). Beim Einsatz von cellulosehaltiger Biomasse, wie z. B. Stroh oder Holzhackschnitzel, muß zunächst deren Struktur aufgebrochen werden, was durch Erhitzen unter Säurezugabe erfolgt. Danach kann die Cellulose durch chemisch-enzymatischen Aufschluß für die Verzuckerung und Vergärung umgewandelt werden. Lignin fällt als Nebenprodukt bei dem Aufschlußprozeß an. Die Produktion aus nicht zucker- und stärkehaltigen Pflanzen könnte einen Durchbruch für die Ethanolherzeugung aus Biomasse bedeuten, das Verfahren ist aber noch nicht kommerzialisiert.

Erdgassubstitut aus der anaeroben Vergärung

SNG kann durch Aufbereitung von Biogas gewonnen werden, welches durch anaerobe Fermentation von organischen Reststoffen oder speziell zur Vergärung angebaute Energiepflanzen entsteht. Biogas ist ein Gemisch aus den Hauptbestandteilen Methan (CH_4), Kohlendioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O) sowie Spuren weiterer Begleitstoffe (H_2S , Siloxane, etc.). In der Mehrzahl der Anwendungsfälle erfolgt derzeit eine motorische Nutzung des Biogases in Form von Blockheizkraftwerken zur Stromerzeugung. Alternativ kann die Nutzung von Biogas als regenerativer Kraftstoff direkt oder über eine Einspeisung in das bestehende Erdgasnetz erfolgen. Hierzu muß das Biogas durch Abtrennung von H_2O , CO_2 , N_2 und H_2S sowie gegebenenfalls weiterer Komponenten aufbereitet werden. Zur Abtrennung werden Waschverfahren oder die Druckwechseladsorption (PSA) eingesetzt. Wie Erdgas ist SNG ein

Gasgemisch, in dem neben dem Hauptbestandteil Methan gewisse Fremddanteile anderer Gase (inerte Komponenten, höhere Kohlenwasserstoffe, etc.) toleriert werden – eine Anreicherung auf fast 100 % Methan ist deshalb nicht notwendig. Neben der Erzeugung aus Biogas ist SNG auch synthetisch über eine thermochemische Vergasung zugänglich.

Kraftstoffe aus Synthesegas / Synthesegaserzeugung

Neben den extraktiven und fermentativen Verfahren besitzen insbesondere die thermochemischen Verfahren zur Verwertung der Biomasse eine herausragende Bedeutung, weil dieser Weg die Verwertung des gesamten Pflanzenmaterials zuläßt (Ganzpflanzennutzung). Bei den extraktiven bzw. fermentativen Verfahren wird immer nur ein Teil der Biomasse genutzt (z. B. Öl- oder Stärkeanteil). Bei den Herstellungsverfahren über Synthesegas kann eine Vielzahl biogener Ressourcen verwertet werden, so daß die ökologische Vielfalt erhalten bleibt. Monokulturen wie z. B. beim Anbau ölhaltiger bzw. zucker- und stärkehaltiger Pflanzen könnten hierdurch vermieden werden. In einem langfristigen Szenario eröffnet der Weg über CO₂ und Wasserstoff (CO-freies Syngas) eine weitere Option für die Synthese kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe, ohne daß hierbei die Ressourcen einer Limitierung unterliegen.

Nicht nur auf der Edukt-, sondern auch auf der Produktseite erschließt der Weg über das Synthesegas eine größtmögliche Flexibilität. Die Kraftstoffe mit dem zukünftig höchsten Anwendungspotential sind: Wasserstoff, Methanol, DME, synthetische Benzin/Diesel-Kraftstoffe und SNG, die über die Zwischenstufe des Synthesegases herstellbar sind. Die Technologie »Synthesegaserzeugung aus Biomasse – Kraftstoffherstellung aus Synthesegas« ist zur Zeit jedoch in dezentralen Anlagen (< 50 MW) nicht kommerziell verfügbar. Die Vergasung von Kohle ist im Bereich großer Anlagen Stand der Technik. Diese Technologie ist jedoch nicht ohne weiteres auf kleine, dezentrale Anlagen zu übertragen.

Der Primärschritt bei der Synthesegaserzeugung aus Biomasse ist eine thermochemische Konversion. Ziel ist hierbei die Zerlegung der Biomasse in ein Produktgas mit den Hauptkomponenten Wasserstoff und Kohlenmonoxid, das sich als Eduktgas zur Erzeugung synthetischer Kraftstoffe einsetzen läßt (vgl. Abb. 5). Als Vergasungsmittel können Luft, Sauerstoff, Wasserdampf und Wasserstoff (sowie teilweise Mischungen dieser Gaskomponenten) eingesetzt werden. Die größte Herausforderung für die Erzeugung von Kraftstoffen aus Biomasse über eine thermochemische Vergasung ist die Erzeugung eines »synthesetauglichen« Gases, das hohen Anforderungen zu genügen hat. Das Synthesegas muß frei von Teer, Partikeln und Katalysatorgiften sein sowie neben einem geringen Inertgasanteil einen hohen Wasserstoffgehalt aufweisen. Bisherige Verfahren zur Gaserzeugung aus Biomasse sind nicht auf die Herstellung synthesetauglicher Gase optimiert, sondern auf die Verbrennung bzw. Verstromung des erzeugten Produktgases.

Aufgrund der Reaktionsgleichungen zur Erzeugung von Methanol bzw. längerkettigen Alkanen (aus CO + 2 H₂ bzw. CO₂ + 3 H₂) folgt, daß ein bestimmtes Verhältnis der Gaskomponenten H₂/CO/CO₂ für einen hohen Umsatz bei der Synthese eingehalten werden muß. Der Stöchiometriefaktor S ($S = p_{H_2} - p_{CO_2} / (p_{CO} + p_{CO_2})$) des Synthesegases sollte für die Methanol- und Fischer-Tropsch-Synthese deshalb auf S = 2 eingestellt sein. Einen noch höheren Wasserstoffanteil erfordert die synthetische Herstellung von Methan mit einem Stöchiometriefaktor von S = 3. Ziel der thermochemischen Vergasung mit einer nachfolgenden Kraftstoffsynthese ist deshalb die Erzeugung eines wasserstoffreichen, konditionierten Produktgases.

Prinzipiell ist bei der thermochemischen Vergasung von Biomasse zwischen autothermen und allothermen Verfahren zu unterscheiden. Bei autothermen Verfahren wird die Energie für die endotherme Vergasung durch eine Teilverbrennung der Edukte direkt in den Prozeß eingebracht (direkte Vergasung). Um das Produktgas nicht durch Stickstoff zu verdünnen, kann bei den autothermen Verfahren nur mit Sauerstoff (nicht mit Luft) vergast werden. Das Produktgas enthält hierbei auch den Abgasstrom aus der Teilverbrennung, so daß trotz Vergasung mit Sauerstoff, der erforderliche Stöchiometriefaktor nicht erreicht wird. Zur Einstellung der Stöchiometrie ist deshalb eine nachgeschaltete CO₂-Abtrennung erforderlich, oder es erfolgt nur eine Teilkonversion des Synthesegases zu Kraftstoff, und der nicht umgesetzte (wasserstoffarme bzw. kohlenoxidreiche) Restanteil wird z. B. für die Koproduktion von elektrischer Energie genutzt. Eine weitere Möglichkeit ist die unter Kapitel 2.4 beschriebene Zugabe von elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff zur Einstellung der Stöchiometrie.

Höhere Wasserstoffanteile in der thermochemischen Vergasung lassen sich mit allothermen Prozessen erzielen, bei denen die notwendige Prozeßenergie von außen (über einen Wärmeübertrager oder über einen Wärmeträger) in den Vergasungsteil eingebracht wird (indirekte Vergasung). Die aufwendigere Prozeßführung bei den allothermen Verfahren hat den Vorteil, daß das Abgas des wärmeliefernden Prozesses nicht mit dem Produktgas gemischt ist und so ein wasserstoffreicheres Gas mit bis zu 55 Vol. % H₂ resultiert. Auch bei den allothermen Verfahren reicht der Wasserstoffgehalt jedoch nicht aus, um den gewünschten Stöchiometriefaktor zu erzielen.

Nachfolgend sind einige Entwicklungen skizziert, die ein Synthesegas für eine nachfolgende Konversion zu regenerativen Kraftstoffen liefern.

Im Verfahren von Choren (WOLF 2002) wird eine autotherme Niedertemperaturvergasung mit einer autothermen Flugstromvergasung, in der die in der Niedertemperaturstufe erzeugten Produkte Pyrolysegas und -koks umgesetzt werden, gekoppelt. Dieses zweistufige Verfahren benötigt zum Betrieb Sauerstoff als Vergasungsmittel. Das erzeugte, fast teerfreie Produktgas wird nach CO₂-Abtrennung in einem Syntheseschritt zu Methanol bzw. Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffen konvertiert.

Der FICFB-Prozeß (*Fast Internally Circulating Fluidised Bed*) der Universität Wien (HOFBAUER und RAUCH 2002), der im 8-MW-Maßstab in Güssing in Österreich realisiert wurde, besteht aus zwei kommunizierenden Wirbelschichten, in denen ein inerter Wärmeträger (z. B. Quarzsand) zirkuliert. Während in einem Wirbelbett Biomasse allotherm mit Wasserdampf unter Zuführung des heißen Wärmeträgers vergast wird, erfolgt in der zweiten Wirbelschicht die Wärmezufuhr zum Erhitzen des Wärmeträgers durch Verbrennen der Vergasungsrückstände mit Luft. Bei diesem Verfahrenskonzept sind die Gasströme getrennt, so daß das Produktgas nicht durch das Abgas des Verbrennungsteils verdünnt wird. Dieser Prozeß wird zur Zeit mit einer nachgeschalteten Methansynthese zur Erzeugung von Erdgassubstitut getestet, eine Erweiterung um eine Fischer-Tropsch-Anlage ist geplant (EU 2003).

Auch das Verfahren der gestuften Reformierung (MÜHLEN et al. 2002) ist ein zweistufiger Prozeß mit Trennung der Gasströme, bei dem das in der ersten Stufe erzeugte Pyrolysegas in einem nachgeschalteten Reformier mit Dampf allotherm zu einem Synthesegas konvertiert wird. Der in der Pyrolyse mitentstehende feste Rückstand (Koks) liefert die Prozeßwärme durch Verbrennung mit Luft in einer separaten Brennkammer, in der ein inerter Wärmeträger (z. B. Stahl- oder Keramikugeln) erhitzt wird, um die Reaktionswärme für die endothermen Prozesse Reformierung und Pyrolyse zu liefern.

In einem speziell für die nachfolgende Synthese entwickelten Prozeß zur Erzeugung kon-

ditionierter Synthesegase nach dem Konzept der absorptionsunterstützten Wasserdampfvergasung mit einem CO₂-absorbierendem Wirbelbettmaterial – auch hier mit zwei gekoppelten Wirbelbetten nach dem FICFB-Konzept – wurden kontinuierliche Wasserstoffgehalte im erzeugten Produktgas von ca. 70 Vol. % nachgewiesen (MARQUARD-MÖLLENSTEDT et al. 2004).

Ein weiterer Verfahrensansatz zur Erzeugung wasserstoffreicher Produktgase aus Biomasse ist die hydrothermale Vergasung, bei der Biomasse in überkritischem Wasser bei 600–700 °C und ca. 250 bar umgesetzt wird und nach prozeßintegrierter CO₂-Abtrennung hohe Wasserstoffgehalte von über 80 Vol. % resultieren (SCHMIEDER et al. 2000).

Von HENRICH und Mitarbeitern (2002) wird ein Verfahrenskonzept bearbeitet, bei dem aufgrund des Anfalls der Biomasse dezentral ein Biopyrolyseöl (BCO) mit hoher Energiedichte durch eine Flashpyrolyse hergestellt wird (vgl. Abb. 5), um anschließend, nach Transport, in zentral angeordneten Flugstromdruckvergasern zu Synthesegas konvertiert zu werden.

Beim ZSW wurde eine Anlage zur Herstellung von Methanol aus einem CO-freien Synthesegas, bestehend aus Kohlendioxid und elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff, aufgebaut (SPECHT et al. 1998). In einer weiteren Demonstrationsanlage wurde Biogas zu einem Synthesegas reformiert und anschließend zu Methanol umgesetzt (MARQUARD-MÖLLENSTEDT et al. 2002).

Herstellung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen

Wasserstoff wird im wesentlichen aus Synthesegas hergestellt. Über die Wassergas-Shift-Reaktion wird der CO-Anteil im Synthesegas mit Wasserdampf in Wasserstoff und CO₂ konvertiert und anschließend Wasserstoff vom Restgas (CO₂, Rest-CO, Wasserdampf, evtl. N₂, nicht umgesetztes Edukt) über eine Druckwechseladsorption (PSA) abgetrennt.

Die Herstellung von Methanol erfolgt praktisch ausschließlich über die sogenannte Niederdruck-Synthese bei einem Druck von bis zu 100 bar und Temperaturen von 250 bis 280 °C unter Verwendung von Katalysatoren auf Cu/ZnO-Basis. Aus thermodynamischen Gründen kann nur ein Teil des eintretenden Synthesegases zu Methanol konvertiert werden. Das Syntheserestgas wird rezykliert, um eine möglichst hohe Kohlenstoff-Konversion zu erzielen. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine genaue Einstellung der Stöchiometrie des Synthesegases. Im Gegensatz zu Erdgas als Edukt für die Synthese, ist bei biomassestämmigen Synthesegasen die Einstellung der Stöchiometrie nur über eine CO₂-Abtrennung möglich. Die energetischen Wirkungsgrade für die Erzeugung von Methanol aus Biomasse erreichen – in Abhängigkeit von der Verfahrensführung und den verwendeten Ausgangsmaterialien – Werte von bis zu 55 % (LARSON und KATOFISKY 1994, SPECHT et al. 1999a). Alternativ kann eine Auslegung mit niedrigeren energetischen Wirkungsgraden (bezogen auf Methanol) gewählt werden, bei der das Syntheserestgas zur Co-Generation von Strom verwendet wird (STUCKI 1996, MARQUARD-MÖLLENSTEDT et al. 2002).

Dimethylether kann entweder aus Methanol (*Methanol Dehydration Technology*) oder aus Synthesegas (*Single-Step DME Synthesis*) hergestellt werden. Der indirekte Herstellungspfad, bei dem zunächst konventionell Methanol erzeugt wird, mit anschließender katalytischer Umsetzung zu DME, ist Stand der Technik. Derzeit werden einige kleinere Pilotanlagen betrieben, bei denen DME auch direkt an einem speziell entwickelten Katalysator erzeugt wird.

Aus Synthesegas sind auch Kohlenwasserstoffe nach der Fischer-Tropsch-Synthese zugänglich. Die Reaktionsbedingungen der Fischer-Tropsch-Synthese sind 200–300 °C bei ei-

nem Druck bis 25 bar unter Verwendung von Eisen- und Cobalt-basierten Katalysatoren. Die Primärprodukte sind nur zum Teil die gewünschten Kohlenwasserstoff-Fractionen, sondern vor allem langkettige Kohlenwasserstoffe (wachsreiches »Syn crude«), die in einem weiteren Verfahrensschritt durch die Zugabe von Wasserstoff in kürzerkettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden müssen. Bei der hydrierenden Spaltung – wie auch zuvor bei der Fischer-Tropsch-Synthese – wird eine Produktbandbreite verschiedener Kohlenwasserstoffketten erzeugt. Hier unterscheidet sich die Herstellung flüssiger Kohlenwasserstoffe z. B. von der Methanolsynthese, bei der nur eine bestimmte chemische Verbindung erzeugt wird. Bei einer dezentralen Kraftstoffherzeugung ist es technisch sehr aufwendig, aufgrund der Produktbandbreite bei der Fischer-Tropsch-Synthese, definierte Kraftstoffqualitäten zu erzeugen, die direkt für die Nutzung im Fahrzeug verwendet werden können.

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Kohlenwasserstoffen ist der MTG-Prozess (*Methanol-to-Gasoline*), bei dem Methanol an Zeolith-Katalysatoren umgesetzt wird. Methanol wird bei Temperaturen von 350–450 °C und geringem Überdruck von einigen bar zunächst zu Dimethylether konvertiert, der über die Stufe der leichten Olefine schließlich zu Benzin-Fractionen reagiert.

Auch methanreiche Gase (SNG) können aus Synthesegas durch eine sogenannte Methanisierung hergestellt werden. Eine Alternative hierzu ist die hydrierende Druckvergasung von Biomasse, die bereits im ersten Primärschritt ein Gas mit einem hohen Methananteil liefert. In einem nachfolgenden Verfahrensschritt wird nur der Restanteil im Gas bei einer Temperatur von ca. 400 °C methanisiert (MOZAFFARIAN und ZWART 2001, STUCKI 2003).

Neben biomassestämmigen, CO-haltigen Synthesegasen können für die Methanol-, DME-, Methan- und die Fischer-Tropsch-Synthese auch CO-freie Synthesegase verwendet werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, kohlenstoffbasierte Kraftstoffe auch aus CO₂ und H₂ zu erzeugen. Alle heute verwendeten, auf fossiler Basis hergestellten Kraftstoffe sind prinzipiell auch auf regenerativem Wege aus Biomasse, aus erneuerbarer Elektrizität oder aus einer Kombination der beiden Energieträger zugänglich.

4. Kosten und CO₂-Emissionen regenerativer Kraftstoffe

Der Einsatz regenerativer Kraftstoffe muß sich neben den ökologischen Effekten auch an der Kostensituation orientieren. In Abbildung 6 ist dargestellt, daß die Umwandlung regenerativer Primärenergieträger in Kraftstoffe auf absehbare Zeit noch mit Zusatzkosten gegenüber den heutigen Kosten für Diesel bzw. Benzin verbunden ist. Im Allgemeinen sind die Herstellungsprozesse für regenerative Kraftstoffe komplizierter und energetisch weniger effizient (und damit teurer), da es sich um chemische Konversionsprozesse handelt, während die Gewinnung von Diesel/Benzin zum wesentlichen Teil nur ein physikalischer Abtrennprozeß ist. Zudem liegen die reinen Rohstoffkosten für Energiepflanzen mit ca. 0,02 Euro/kWh (vgl. Abb. 3) – bei deutlich schlechteren Umwandlungswirkungsgraden zu Kraftstoff – höher als die derzeitigen Rohölkosten (30 US-\$/Barrel entsprechen ca. 0,016 Euro/kWh).

Die Kosten von Kraftstoffen auf Biomasse-Basis bewegen sich in einer Bandbreite zwischen 0,05 und 0,15 Euro/kWh und sind somit deutlich höher als die Herstellungskosten von Benzin/Diesel. Die Kosten reichen bis ca. 0,5 Euro/kWh für Flüssigwasserstoff aus photo-voltaisch erzeugtem Strom (und damit ca. 5 Euro pro Liter Benzin-/Dieseläquivalent).

Die Bereitstellung der Kraftstoffe ist mit unterschiedlich hohen Energieaufwendungen

und Umweltauswirkungen verknüpft, die aus der Gewinnung der Primärenergie, dem Herstellungsprozeß, dem Transport der Produkte, den Verwendungsmöglichkeiten von Nebenprodukten sowie der Kraftstoffnutzung resultieren. Erneuerbare Kraftstoffe zeichnen sich vor allem durch einen geringen Verbrauch erschöpflicher Ressourcen und damit niedrigen CO₂-Emissionen aus. Im Vergleich zu den Benzin- und Dieselherstellungsketten kann eine deutliche CO₂-Einsparung erzielt werden. Die Aufwendungen bei Kraftstoffen auf Biomassebasis hängen vor allem davon ab, ob Reststoffe oder Energiepflanzen eingesetzt werden und wie die Nebenprodukte verwendet werden. Zudem sind, auch bei Kraftstoffen auf Basis erneuerbaren Stroms, die Transportketten und andere nachgelagerte Prozessschritte von Belang.

Entsprechend dem reduzierten Verbrauch fossiler Primärenergieträger liegen die durch Herstellung und Verbrennung freigesetzten Klimagase bei erneuerbaren Kraftstoffen deutlich niedriger. Während für die regenerativen Kraftstoffe Einsparungen von bis zu 90 % bezüglich der klimarelevanten Emissionen möglich sind, führt die Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus fossilen Primärenergieträgern (Erdgas, Kohle) zu höheren CO₂-Emissionen gegenüber den konventionellen Kraftstoffen Benzin/Diesel aus Erdöl. Insbesondere die Nutzung von Kohle zur Herstellung von Fischer-Tropsch-Kraftstoffen ist mit drastisch höheren CO₂-Emissionen verbunden (um den Faktor 2,5!). Auch die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen oder Wasserstoff aus Erdgas bedingt – bezogen auf den erzeugten Sekundärenergieträger (*»well-to-tank«*) – ca. 20 % höhere CO₂-Emissionen gegenüber Benzin/Diesel, die in der gesamten Energiekette (*»well-to-wheel«*) durch energieeffiziente Antriebstechnologien (z. B. Brennstoffzellen) wieder kompensiert werden müssen.

Die Herstellung von Biodiesel führt zu etwas höheren CO₂-äquivalenten Emissionen, als man aufgrund des Energieverbrauchs vermuten würde. Dies ist vor allem auf die von der Art des Landbaus (z. B. Düngemiteleinsetz) abhängigen Lachgasemissionen zurückzuführen (REINHARDT und ZEMANEK 2000). Bei Ethanol ist ein erheblicher Anteil nicht erneuerbarer Energie zur Erzeugung notwendig. In diesen Fällen fällt die Einsparung klimarelevanter Gase geringer aus als bei den Herstellungspfaden über Synthese- bzw. Biogas als Zwischenprodukt oder auf Basis erneuerbaren Stroms.

Gegenüber dem Referenzfall Benzin/Diesel in Abbildung 6 können aus der Kostendifferenz und den eingesparten klimarelevanten Emissionen für die verschiedenen regenerativen Kraftstoffe die CO₂-Vermeidungskosten berechnet werden. Die in Abbildung 6 eingezeichneten Geraden bezeichnen CO₂-Vermeidungskosten mit 250, 500 und 750 Euro/t_{CO₂-Äq.} bezogen auf den heutigen Referenzfall (30 US-\$/Barrel).

Die niedrigsten CO₂-Vermeidungskosten ergeben sich für die Nutzung der fossilen Ressource Erdgas. Erdgas weist aufgrund der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffs pro Kilowattstunde geringere CO₂-Emissionen auf als Benzin/Diesel. Je wasserstoffreicher der (fossile) Brennstoff ist, desto niedriger ist die pro Kilowattstunde resultierende CO₂-Menge. Selbst in komprimierter Form ist Erdgas kostenmäßig etwas günstiger als Benzin/Diesel, so daß in diesem Fall sogar negative CO₂-Vermeidungskosten resultieren (ohne Berücksichtigung weiterer Transaktionskosten).

Die geringsten CO₂-Vermeidungskosten für die Erzeugung und Nutzung regenerativer Kraftstoffe resultieren für unverestertes Pflanzenöl mit ca. 120 Euro/t_{CO₂-Äq.}. Für Biodiesel und für Erdgassubstitut aus Biogas betragen die mittleren CO₂-Vermeidungskosten ca. 230 Euro/t_{CO₂-Äq.}, für Ethanol sowie Wasserstoff bzw. Methanol aus Biomasse ca. 330 Euro/t_{CO₂-Äq.} und für Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe mindestens 400 Euro/t_{CO₂-Äq.}. Bei der Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom sind mit Ausnahme der Erzeugung von

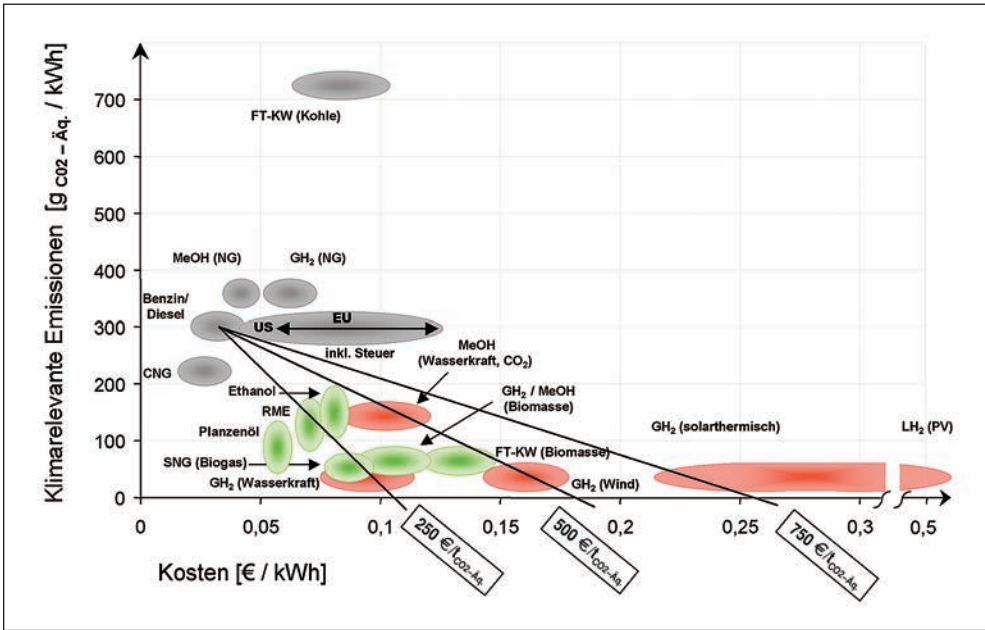


Abb. 6 Kosten und Treibhausgas-Emissionen verschiedener fossiler und regenerativer Kraftstoffe. Anmerkung: Kraftstoffe aus fossilen Energieträgern (grau), aus Biomasse (grün), aus regenerativ erzeugtem Strom (rot); in Klammern sind die Primärressourcen angegeben: PV – Photovoltaik; Werte ohne Steuern, Ausnahme Benzin/Diesel ohne und mit Steuern in US und EU; Bezugsgröße: Rohölpreis 30 US-\$/Barrel; MeOH – Herstellung aus Erdgas (NG), aus Holz, aus Kraftwerks-CO₂ und elektrolytisch hergestelltem H₂; GH₂ – Wasserstoff gasförmig bei 250 bar; LH₂ – Flüssigwasserstoff; CNG – Druckerdgas (250 bar), SNG – Erdgassubstitut (250 bar). Die Geraden bezeichnen CO₂-Vermeidungskosten mit 250, 500 und 750 Euro/t_{CO₂-Äq.}; Quellen: DREIER 2000, SCHINDLER und WEINDORF 2003, GM 2002, GREET 2004, VES 2001, ReFuelNet 2004, ZSW 2004/

Wasserstoff aus Wasserkraft mit ca. 250 Euro/t_{CO₂-Äq.} die CO₂-Vermeidungskosten deutlich höher und betragen für Wasserstoff aus Windenergie und für Methanol aus elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff (aus Wasserkraft) und abgetrenntem CO₂ aus den Rauchgasen konventioneller Kraftwerke ca. 500 Euro/t_{CO₂-Äq.}. Für solaren Wasserstoff resultieren sogar CO₂-Vermeidungskosten von mindestens 750 Euro/t_{CO₂-Äq.}.

Damit liegen die Kosten zur Vermeidung klimarelevanter Emissionen im Verkehrsbereich durch regenerative Kraftstoffe deutlich über anderen Maßnahmen, wie z. B. der Substitution von fossilen Energieträgern durch Biomasse im Wärmemarkt mit bis zu 50 Euro/t_{CO₂-Äq.} oder durch den Einsatz von Biomasse zur Stromerzeugung mit 50–100 Euro/t_{CO₂-Äq.}.

5. Perspektiven

Mit regenerativen Kraftstoffen sind drastische CO₂-Einsparungen von über 90 % möglich, die allein mit der Effizienzsteigerung der Antriebsaggregate nicht zu erzielen wären. Biogene Ressourcen sind zwar nicht unbegrenzt vorhanden, vermögen aber doch nennenswerte Anteile von 7 % für Deutschland bis 27 % weltweit (bezogen auf den heutigen Kraftstoffverbrauch

für den Verkehr) zu decken. Langfristig kommt auch regenerativ erzeugte Elektrizität für die Erzeugung von Kraftstoffen in Betracht.

Wie wird sich vor dem Hintergrund der ambitionierten Zielvorgaben der Europäischen Union der Anteil verschiedener regenerativer Kraftstoffe am Gesamtverbrauch zukünftig gestalten? Wann welcher regenerative Kraftstoff eine Marktdurchdringung erfahren wird, hängt u. a. von den vermiedenen CO₂-Emissionen, den CO₂-Vermeidungskosten und der Verfügbarkeit verschiedener Technologien ab.

Ein wesentlicher Faktor für den Zeitpunkt des Einsatzes regenerativer Kraftstoffe ist der ökoeffiziente Einsatz der regenerativen Primärenergieträger. Dieser hängt davon ab, wieviel CO₂-Emissionen oder andere Umweltwirkungen vermieden werden können, indem regenerative Energieträger verwendet werden. Während in Deutschland 1 kWh Strom im derzeitigen, relativ ineffizienten und kohlelastigen Erzeugungssystem zu ca. 0,7 kg CO₂ führt, verursacht 1 kWh Benzin bzw. Diesel lediglich ca. 0,3 kg CO₂. Die Substitution konventionellen Stroms durch regenerative Energieträger ist also unter Klimagesichtspunkten mehr als doppelt so effizient wie der Ersatz von konventionellen Kraftstoffen (SPECHT et al. 2002). Der optimale Einsatz von regenerativ hergestellten Kraftstoffen im Verkehr ist unter diesen Gesichtspunkten allerdings eine Funktion der Zeit. Einerseits werden die zunehmende Durchdringung des Kraftwerksparks durch klimaneutrale Energieträger und die Substitution von Kohle durch Erdgas zu sinkenden spezifischen CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung führen. Gebremst wird dieser Rückgang jedoch durch den Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland. Andererseits werden Benzin/Diesel-Kraftstoffe durch zunehmende Ressourcenverknappung und zusätzliche Umwandlungsschritte (synthetische Kraftstoffe aus Erdgas/Kohle) sowie durch die steigenden Anforderungen an die chemische Zusammensetzung der Kraftstoffe zu wachsenden Emissionen führen. Aus Gründen der Ökoeffizienz erweist sich der Einsatz erneuerbarer Energieträger zumindest auf einer langfristigen Zeitskala deshalb als dringend geboten.

Mit den Vermeidungskosten von Klimagasen allein läßt sich der Einsatz regenerativer Kraftstoffe derzeit nicht rechtfertigen, da die CO₂-Vermeidung im Verkehrsbereich besonders teuer ist. Zukünftig wird jedoch jeder Energieverbrauchssektor, auch der Verkehrsbereich, seinen Beitrag zur Senkung klimarelevanter Emissionen leisten müssen. Von strategischer Bedeutung für die Bewertung des Einsatzes regenerativer Primärenergieträger im Verkehr ist allerdings die zukünftige Preisentwicklung, da sich durch eine relative Verschiebung der Preisentwicklungen im mobilen und stationären Bereich, also beispielsweise durch einen früheren überproportionalen Anstieg der Rohölkosten durch kürzere Reichweiten, eine Verschiebung des Zeitpunktes ergeben kann, zu dem der Einsatz im mobilen Sektor attraktiver wird. Eine Studie von Prognos (SCHLESINGER 2001) geht beispielsweise von einer Verdreifachung der Rohölpreise bis 2050 aus, während der Strompreis moderat ansteigen wird. Damit wird die Substitution von rohölbasierten Kraftstoffen zukünftig attraktiver.

Neben den Kriterien der CO₂-Vermeidung zur Einführung regenerativer Kraftstoffe spielen jedoch auch weitere Gesichtspunkte eine wesentliche Rolle. Wird der Kriterienkatalog um die Diversifizierung der Ressourcen und der daraus resultierenden Versorgungssicherheit erweitert, so ergeben sich für die Verwertung regenerativer Energieträger andere Präferenzen. Während im Strom- und Wärmemarkt eine Vielzahl von Substitutionsmöglichkeiten besteht, ist die Reduzierung der Rohöl-Abhängigkeit im Verkehrsbereich weitaus schwieriger. Gerade diese Tatsache spricht für einen verstärkten Einsatz regenerativer Primärenergieträger für die Erzeugung von Kraftstoffen.

Die Mineralölsteuerbefreiung für Biokraftstoffe in Deutschland wird dazu führen, daß die Mineralölkonzerne regenerative Anteile den konventionellen Kraftstoffen zumischen. Aufgrund der vorhandenen Infrastruktur werden kurzfristig verstärkt Biodiesel (als Reinkraftstoff und als Zumischung bis 5 Vol. % zu konventionellem Dieselmotorkraftstoff) sowie Ethanol (als Zumischung bis 5 Vol. % zu Benzin bzw. zur Erzeugung des »Oktanboosters« ETBE) Anteile am Markt gewinnen. Wegen der relativ geringen Netto-Flächenerträge von ca. 11 MWh/(ha × a) ist das Wachstumspotential von Biodiesel (und je nach Herstellungsart auch für Ethanol) jedoch begrenzt. Mittelfristig werden – neben Erdgassubstitut aus Biogas – synthetische Kraftstoffe eine verstärkte Marktdurchdringung erfahren, sofern es gelingt, an die Biomasse angepaßte Konversionstechnologien zu etablieren. Erst sehr langfristig (>2050?) wird erwartet, daß Wasserstoff wesentliche Anteile gewinnen kann, da die Infrastrukturerfordernisse große ökonomische Herausforderungen darstellen. Fraglich ist hierbei, wann dieser Wasserstoff aus regenerativen Ressourcen hergestellt wird, oder – was wahrscheinlicher ist – die Herstellung zunächst aus fossilen Rohstoffen erfolgt, mit den daraus resultierenden klimarelevanten Emissionen.

Die Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse zur Erzeugung von Kraftstoffen ist auch vor dem Hintergrund der EU-Osterweiterung von Interesse, um im Rahmen eines agrarpolitischen Umbaus – unter Wahrung ökologischer Randbedingungen und des Lebensmittelanbaus – neue Erwerbsquellen für die Landwirtschaft zu schaffen. Nicht zu vernachlässigen sind hierbei die Beschäftigungseffekte. Für die EU-15 wird geschätzt, daß ein Anteil von 1 % Biokraftstoffen 45 000 bis 75 000 Arbeitsplätze generieren wird (LINKOHR 2003).

Literatur

- BEN (Balanco Energetico Nacional) 2002, MME, Ministerio das Minas e Energia, Brasilia, Brazil (2002)
- BERG, C.: World Ethanol Production 2001. www.distill.com/world_ethanol_production.htm
- DREIER, T.: Ganzheitliche Systemanalyse und globale Potenzialanalyse biogener Kraftstoffe. Dissertation TU-München, Ife Schriftenreihe Bd. 42. Herrsching: E&M Verlag 2000
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: www.ag-energiebilanzen.de (2004)
- Ethanol: www.ethanolRFA.org (2004)
- EU (Europäische Kommission): Grünbuch – Hin zu einer europäischen Strategie für Versorgungssicherheit. In: Weissbuch – Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellung für die Zukunft; Über alternative Kraftstoffe für den Straßenverkehr und ein Bündel von Maßnahmen zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen. Brüssel: COM 547 (2001)
- EU: Integrated Project SES6-CT-2003-502705 der Europäischen Union im 6. Forschungsrahmenprogramm (2003)
- GM: Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study. LB-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, (2002), <http://www.lbst.de/gm-wtw/> (2004)
- GREET: Transportation Fuel Cycle Model. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, <http://www.transportation.anl.gov/greet/> (2004)
- HENRICH, E., DINJUS, E., MEIER, D., and WEIRICH, F.: A new concept for biomass gasification at high pressure. Proceedings 12th European Conference on Biomass, published on CD. Amsterdam (2002)
- HOFBAUER, H., und RAUCH, R.: Zweibett-Wirbelschichtvergasung in Güssing (A) mit 2 MW_e/4,5 MW_{th} – Konzept, Betriebserfahrungen und Wirtschaftlichkeit. 7. Holzenergie Symposium, ETH Zürich, Schweiz. Zürich: ETH 2002
- IEA (International Energy Agency): Key World Energy Statistics from IEA. Paris (2001)
- LARSON, E., and KATOFKY, R.: In: BRIDGWATER, A. (Ed.): Advances in Thermochemical Biomass Conversion. London: Chapman and Hall 1994
- LANGNISS, O., NITSCH, J., LUTHER, J., und WIEMKEN, E.: Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung – Ein solares Langfristszenario für Deutschland. Proceedings des Workshops »Strategien für eine, nachhaltige Energieversorgung« 12. 12. 1997. Freiburg: Forschungsverbund Sonnenenergie 1997
- LINKOHR, R.: Regenerative Kraftstoffe aus Sicht der Politik. Proceedings der Fachtagung »Regenerative Kraftstoffe – Entwicklungstrends, F&E-Ansätze, Perspektiven«, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, 13./14. 11. 2003, S. 137. Stuttgart (2003)

- MARQUARD-MÖLLENSTEDT T., BAUMGART, F., und SPECHT, M.: Herstellung von regenerativem Methanol aus Biogas. DGMK-Tagungsbericht 2002-2, 189 (2002)
- MARQUARD-MÖLLENSTEDT, T., SICHLER, P., SPECHT, M., MICHEL, M., BERGER, R., HEIN, K. R. G., HÖFTBERGER, E., RAUCH, R., und HOFBAUER, H.: Wasserstoffherstellung durch absorptionsunterstützte Wasserdampf-Vergasung von Biomasse. DGMK-Tagungsbericht 2004-1, 177 (2004)
- MOZAFFARIAN, M., and ZWART, R.: Production of substitute natural gas by biomass hydrogasification. Proceedings of the World Conference on Biomass for Energy and Industry, Spain: Sevilla, 1601 (2001)
- MÜHLEN, H.-J., MAYER, M., und SCHMID, C.: Gestufte Reformierung biogener Reststoffe – Erste Betriebserfahrungen mit der 1 MW-Versuchsanlage »Der Blaue Turm« in Hertlen. DGMK-Tagungsbericht 2002-2, 103 (2002)
- NITSCH, J., und TRIEB, F.: Potenziale und Perspektiven regenerativer Energieträger. Gutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, DLR Institut für Technische Thermodynamik. Stuttgart (2000)
- SCHLESINGER, M.: Szenarienerstellung – soziodemografische und ökonomische Rahmendaten. Zwischenbericht für die Enquete-Kommission Nachhaltige Energieversorgung des Deutschen Bundestages, Prognos AG, Basel (2001)
- QUASCHNING, V.: Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert. Habilitationsschrift, Technische Universität Berlin, Berlin (1999)
- ReFuelNet*: Abschlussbericht des Kompetenznetzwerks: Regenerative Kraftstoffe ReFuelNet. Stuttgart: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, www.refuelnet.de (2004)
- REINHARDT, G., und ZEMANEK, G.: Ökobilanz Bioenergieträger: Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen. Berlin: Erich Schmidt 2000
- SCHINDLER, T., und WEINDORF, W.: Biomasse als Basis einer neuen regionalen Energieversorgungsstruktur: Potenziale, Techniken, Kosten. 1. Aachener Anwenderforum für Bioenergienutzung in Stadt und Region, 29. April 2003, Aachen; <http://www.eurosolar.org/new/de/downloads/SchindlerKopie.pdf> (2004)
- SCHMIEDER, H., ABELN, J., DINJUS, E., KRUSE, A., KLUTH, M., PETRICH, G., SADRI, E., and SCHACHT, M.: Hydrothermal gasification of biomass and organic waste. *J. Supercritical Fluids* 17, 145 (2000)
- SCHNEIDER, S., FALKENBERG, D., und KALTSCHMITT, M.: Erneuerbare Energien in Deutschland – Stand 2003. BWK 4 (2004)
- SPECHT, M., BANDI, A., und PEHNT, M.: Regenerative Kraftstoffe – Bereitstellung und Perspektiven. Themen 2001: Integration Erneuerbarer Energien in Versorgungsstrukturen. Forschungsverbund Sonnenenergie 114, Berlin (2002)
- SPECHT, M., BANDI, A., BAUMGART, F., LINKOHR, C., und STAISS, F.: Kombinierte Nutzung von Biomasse und Wasserkraft. Endbericht, Forschungsauftrag (1999a)
- SPECHT M., BANDI, A., BAUMGART, F., MURRAY, C. N., and GRETZ, J.: Synthesis of methanol from biomass/CO₂ resources. In: ELIASSON, B., RIEMER, P. W. F., and WOKAUN, A. (Eds.): *Greenhouse Gas Control Technologies*; p. 723. Amsterdam: Pergamon 1999b
- SPECHT M., STAISS, F., BANDI, A., and WEIMER, T.: Comparison of renewable transportation fuels, liquid hydrogen and methanol, with gasoline – energetic and economic aspects. *Int. J. Hydrogen Energy* 23, 387 (1998)
- STAISS, F.: *Jahrbuch Erneuerbare Energien 02/03*. Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Biebrich, Radebeul (2003)
- STUCKI, S.: Biometh – Methanolproduktion aus Biomasse-Abfällen in der Schweiz. Schlussbericht, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, Schweiz (1996)
- STUCKI, S.: Proceedings der Fachtagung: Regenerative Kraftstoffe – Entwicklungstrends, F&E-Ansätze, Perspektiven. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung. 13./14. 11. 2003. S. 101. Stuttgart (2003)
- VES: »Kraftstoff der Zukunft«*, Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. <http://www.bmwbw.de/Mobilitaet-.643.2458/.htm> (2004)
- WELLINGER, A., and LINDBERG, A.: biogas upgrading and utilisation. In: IEA Bioenergy, Bd. 24: *Energy from Biological Conversion of Organic Waste*. www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37/Dokumente/Biogas%20upgrading.pdf 2004
- WOLF, B.: Von der Kohle- zur Biomassevergasung. DGMK-Tagungsbericht 2002-2, 53 (2002)
- ZSW: Berechnungen des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung: Stuttgart (2004)

Dr. Michael SPECHT
Zentrum für Sonnenenergie- und
Wasserstoff-Forschung
Industriestraße 6
70565 Stuttgart
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 711 7870218
Fax: +49 711 7870200
E-Mail: michael.specht@zsw-bw.de

Fossile Kohlenwasserstoffe – Wirklichkeit und Wahrnehmung heute und morgen

Dietrich H. WELTE (Jülich)

Mit 12 Abbildungen und 3 Tabellen



Zusammenfassung

Fossile Kohlenwasserstoffe waren in den letzten 50 Jahren weltweit der wichtigste Energieträger und werden dies in den nächsten 50 Jahren auch bleiben. Aufgrund der heutigen weltweiten Reserve- und Ressourcensituation mit einer Reichweite von Erdöl und Erdgas von 50+ Jahren und der gegebenen, weltweiten Nutzungsinfrastruktur, ist diese Aussage sehr gut begründet. In 10 bis 20 Jahren von heute kann mit einer Überschreitung des Fördermaximums (*depletion midpoint*) gerechnet werden, bei Erdöl deutlich früher als bei Erdgas. Damit ist langfristig eine Preiserhöhung von Erdöl und Erdgas vorprogrammiert. Die weltweit ungleiche Verteilung der Kohlenwasserstoffvorräte macht eine gesicherte Energieversorgung, speziell für ein Importland wie Deutschland, zu einem Politikum allerersten Ranges. Die Politik und die Wirtschaft sind hier in der Verantwortung, und auch die Geowissenschaftler. Seit dem Ersten Weltkrieg ist Energiepolitik auch Weltpolitik, und kein Industrieland darf sich heute ungestraft dieser Erkenntnis verschließen.

Eine sinnvolle und von der Bundesregierung getragene Energiestrategie hinsichtlich der fossilen Kohlenwasserstoffe ist unverständlicherweise nicht zu erkennen. Die gegenwärtige Absage an die Kernenergie ist aus energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Überlegungen nicht nachvollziehbar. Die hochgehandelten und politisch aufgewerteten »erneuerbaren« Energien, so sinnvoll sie in einem begrenzten Rahmen sind, können das Versorgungsproblem nicht lösen. Die Entscheidung für einen realistischen anpassungsfähigen Energiemix ist dringlicher denn je.

Die von der internationalen Erdölindustrie prognostizierte Reduktion der Gesteinskosten von Erdöl, von derzeit etwa 8 – 10 Dollar/Barrel auf ein Niveau von etwa 4 – 5 Dollar/Barrel, ist nur mit einer verbesserten Aufsuchungs- und Gewinnungstechnik möglich. Die wichtigsten Kostenelemente in der Exploration/Produktion sind zur Zeit der Erwerb von Konzessionen und die Bohrungstätigkeit. Die Forschung ist daher gefragt, das Explorations-/ Produktionsrisiko zu vermindern und eine präzisere Bewertung von Reserven und Ressourcen zu gewährleisten. Die Verfügbarkeit einschlägiger, international wettbewerbsfähiger Forschungskompetenz an mehr als einem Standort in Deutschland und deren direkte Zusammenarbeit mit der Industrie sind deshalb notwendig. Die Verankerung in der Hochschullehre ist ebenfalls zwingend.

In der Vergangenheit wurden sowohl die Bewertung von Reserven und Ressourcen als auch die Betrachtung von Unsicherheiten im wesentlichen auf der Basis einer statistischen Analyse von Erfahrungswerten aus Aufsuchung und Gewinnung durchgeführt. Die jüngsten Fortschritte in der numerischen Simulation geologischer Prozesse erlauben es, sowohl die Bewertung von Reserven und Ressourcen als auch die Bewertung der geologischen Unsicherheitsfaktoren auf eine neue, verbesserte Grundlage zu stellen. Der Grund dafür ist einfach, aber für die Ergebnisse von großer Bedeutung. In der Vergangenheit wurden auf der Basis von weltweiten Klassifikationen von Sedimentbecken und der für Kohlenwasserstoffvorkommen wichtigen Einflußparameter Statistiken erstellt, um die Wahrscheinlichkeit von größeren und kleineren Lagerstätten zu ermitteln. Das heißt, die durch das Prozeßgeschehen (Bildung der Kohlenwasserstoffe, Migration und Akkumulation) miteinander verknüpften Einflußparameter wurden isoliert und unabhängig voneinander betrachtet.

Das neue verbesserte Verständnis einschlägiger geologischer Prozesse hingegen, deren Quantifizierung und numerische Simulation, betrachten die in Wechselwirkung verknüpfte Prozeßkette und erlauben daher eine maßgeschneiderte Einzelprognose für jede Fallstudie. Diese Vorgehensweise erlaubt in Verbindung mit der Vorhersage der Produktmenge (Erdöl und Erdgas) und der Produktqualität, unter Einbeziehung finanzieller Aspekte, auch eine bessere Abschätzung des Gesamtrisikos im 'Upstream-Bereich'. Am Beispiel des 'North Slope', Alaska, wird diese Vorgehensweise näher erläutert.

Abstract

Carbon dioxide emissions from the usage of fossil hydrocarbons are made responsible as the main cause for global warming by large parts of society, the media and politics, in Germany and elsewhere. Yet, it is certain that for decades to come, fossil hydrocarbons, i.e. petroleum, will be the major source of energy. In view of this dilemma it is important to look at some facts concerning the need to provide sufficient energy on one hand and to protect our climate on the other.

Paleoclimate research has proven that throughout the history of the earth the change between warm and cold periods is a normal phenomenon. During the last 2 million years there were more than 10 changes between glacial and interglacial periods with differences in temperature of more than 10 °C. This was the time when the species »homo sapiens« evolved on earth. We know that there are numerous extraterrestrial and terrestrial reasons for climate changes. Changing concentrations of green house gases (e.g. CH₄, CO₂, H₂O ...) in the atmosphere of the earth are only one bundle of possible causes to alter the climate. It is furthermore important to realize that long before mankind could influence the atmosphere naturally changing carbon dioxide levels have been recorded throughout the history of the earth. This means, that there are also non-anthropogenic causes to increase and lower, carbon dioxide concentrations. The impact

of carbon dioxide upon our climate, as compared to other known factors influencing the climate of the earth, so far cannot be quantified.

However, as we know that carbon dioxide is a greenhouse gas, it is necessary and prudent to minimize anthropogenic carbon dioxide emissions.

In the 1970s the »Club of Rome« (The Limits to Growth, Dennis L. MEADOWS et al., Universe Books, New York, 1972) stressed the fact that petroleum on earth is finite and predicted that by the turn of the century the world would run out of petroleum. Today we are certainly aware of the finiteness of petroleum. However, we also know that petroleum will be available for another 50 years or more. Germany is one of the big consumers of petroleum products and we import nearly all of our oil consumption and over 80 % of the gas consumption. In 2002 Germany spent about 30 billion Euro (30 milliards Euro) for petroleum import. In the foreseeable future of the next decades Germany will continue its dependency on petroleum for most of its energy consumption. The world wide annual production of crude oil is at present about $3,5 \times 10^9$ t and gas consumption is 2500×10^9 cubic meters. As oil and gas are finite, there will be a turning point in production rates of petroleum, meaning that annual petroleum production after reaching a maximum starts to decline. This is called the »depletion midpoint«. Depletion midpoint for crude oil will be reached in about 10 to 20 years from now. Gas will last somewhat longer, but is also finite.

The USA is the biggest consumer of crude oil in the world. They use about one quarter of the yearly crude oil production and about 60 % of this consumption is imported. China, a country with strong economic growth, will equalize the US-consumption in about 10–15 years. Some time around the year 2020 these two nations will consume half of the world crude oil production. Demand for petroleum in developing and threshold countries will certainly grow. It is therefore easy to predict fierce competition for petroleum and petroleum related products at the latest in the years 2020–2025.

When evaluating the oil and gas potential and other natural raw materials a distinction is made between »reserves« (... proven amount of oil and gas which is economically producible by current technology...) and »resources« ...probable amounts, on the basis of geological reasoning, but not necessarily producible with current technology and at competitive economic cost).

The methodology of reserve- and resource-assessment has changed over the last decades. Previously these assessments were made by comparison between known petroleum producing sedimentary basins or regions and by a statistical analogy with the new, yet unexplored or scarcely explored region. The new resource assessment technology is based on statistics and on numerical process simulation of petroleum generation, migration and entrapment of the target region under consideration. If the Club of Rome would have had access to this new assessment technology they probably would not have made the mistake to predict the end of petroleum availability for the turn of the century.

An example for modern resource assessment is presented for the »National Petroleum Reserve Alaska«. Such a modern assessment of the petroleum potential is based on the reconstruction and numerical simulation of the chain of processes which are together responsible for the formation and preservation of petroleum accumulations in the subsurface. It starts with an analysis and quantification of the generation of petroleum within the source rocks of this particular region in Alaska, it reconstructs possible migration pathways and determines type and quantity of petroleum which migrates through permeable and porous rocks into potential reservoirs. In addition the uncertainties of important parameters governing the processes is determined and carried through the entire process simulation. The final outcome of such an exercise is a map showing the amount and quality of petroleum for each drainage area and the degree of certainty this quantity can be expected. Technologies like this are very important for the petroleum industry in the future. They help to gain more certainty for the gigantic investments necessary to find and develop new petroleum resources and to turn them into reserves and producing fields.

This technology described here was mainly developed in Europe and to a large degree especially in Germany. In order to be an attractive partner for countries with petroleum resources Germany would be well advised to support research and development for the upstream petroleum business and to be willing to invest in petroleum resource development. Many nations will be competing for adequate petroleum import for decades to come, and Germany is very poorly positioned for this competition as compared to other industrialized countries. Furthermore, official present day German energy policy seems to ignore the needs to secure future petroleum supply. China, for example¹, is aggressively securing future hydrocarbon supplies by restructuring its domestic oil and gas exploration and production industry and encouraging increasing international activities. German policies and strategies in this respect do not exist.

In addition the government decided to close down nuclear and »old« hard-coal power plants within the next 15 to 20 years. Within the same time span most German gas fields, producing at present about 18 % of our national demand for gas, will be exhausted. Hence at about this time, around the year 2025, a large part of the German domestic energy supply will have disappeared and this will occur at a dramatic moment for world energy supplies.

1 Examples are China's new gas supply agreement with Australian NW-shelf partners (for 25 years) and China's entry into the Saudi Arabian gas market.

1. Einleitung

Klimawandel und Energieversorgung werden ganz besonders in Deutschland und auch in anderen Ländern kontrovers behandelt. Die fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl und Kohle, die mit Abstand den größten Teil der Energieversorgung in Deutschland und auch weltweit tragen, werden wegen ihres Kohlendioxid-Ausstoßes im Urteil vieler für den Klimawandel verantwortlich gemacht. Auf diesem Hintergrund gilt es, sich mit einigen Fakten vertraut zu machen.

Wir wissen aus der Erdgeschichte, daß es immer einen Wechsel zwischen Eiszeiten und Warmzeiten auf der Erde gegeben hat (siehe BERNER und STREIF 2001). Selbst innerhalb der großen Eiszeiten pendelte das Klima zwischen Kalt- und Warmzeiten. Etwa in den letzten zwei Millionen Jahren des Quartärs gab es mehr als 10 Wechsel von Glazial- zu Interglazialperioden mit globalen Temperaturdifferenzen von über 10 °C. Gerade diese Zeit besonders großer Instabilität des Klimas war die Zeit der Entwicklung des *Homo sapiens*. Heute leben wir in der Warmzeit eines Eiszeitalters. Für natürliche Klimaveränderungen gibt es viele Einflußfaktoren. Dazu gehören die Verschiebung der Kontinente und Gebirgsbildungsvorgänge, die Exzentrizität der Erdbahn um die Sonne und Änderungen der Sonnenaktivität im Laufe der Zeit. Auch Änderungen in der Zusammensetzung der Erdatmosphäre, insbesondere der Treibhausgase wie Methan und Kohlendioxid (CO₂), beeinflussen das Klima auf der Erde. Wir wissen, daß z. B. ein wachsender CO₂-Gehalt in der Erdatmosphäre eine Erwärmung der Atmosphäre verursachen kann. Wir wissen aber leider immer noch nicht, inwieweit das CO₂ ein entscheidender Faktor für eine Klimaänderung ist. Schwankende CO₂-Gehalte in der Erdatmosphäre sind aus der geologischen Vergangenheit auch vor dem Eingreifen des Menschen gut bekannt. Das Auf und Ab des CO₂-Pegels in der Erdatmosphäre belegt, daß es neben den Ursachen für einen nicht-anthropogen verursachten Anstieg des Kohlendioxids auch Regelmechanismen gab und gibt, die die CO₂-Gehalte wieder auf ein niedrigeres Niveau zurückführen können.

Als Fazit aus oben Gesagtem sollte festgehalten werden, daß wir die Wichtigkeit des Kohlendioxids gegenüber anderen klimaverändernden Faktoren, entgegen einer vorherrschenden Meinung in Gesellschaft und Politik, noch immer nicht richtig einschätzen können. Da aber feststeht, daß Kohlendioxid als Treibhausgas wirkt, gebietet es die Klugheit, den CO₂-Ausstoß so niedrig wie möglich zu halten. Auch im Sinne der Ressourcenschonung ist eine Senkung des Energieverbrauchs auf der Basis fossiler Kohlenwasserstoffe sinnvoll und nötig.

2. Reserven und Ressourcen

Im Zusammenhang mit der Bewertung von Rohstoffen ist es in den Geowissenschaften und im Bergbau üblich, eine Unterscheidung zwischen dem Ausdruck Reserven und Ressourcen zu machen. Dieses gilt auch für die Energierohstoffe Erdöl, Erdgas und Kohle. Reserven sind demnach geologisch-technisch nachgewiesene Mengen von Erdöl, Erdgas oder Kohle, die mit der heutigen Technologie wirtschaftlich gewinnbar sind. Als Ressourcen bezeichnet man Rohstoffe, deren technische oder wirtschaftliche Gewinnung noch unsicher ist, die aber auf Grund geologischer Indikatoren erwartet werden können (GERLING et al. 2003).

Wir erinnern uns alle an die Prognosen des *Club of Rome* aus der Veröffentlichung *Die Grenzen des Wachstums* von Dennis MEADOWS in den 70er Jahren. Es ist ohne Zweifel der

Verdienst des *Club of Rome*, darauf aufmerksam gemacht zu haben, daß die Grenzen des Wachstums unserer wirtschaftsorientierten Gesellschaften in gewisser Weise durch die Endlichkeit von Rohstoffen gegeben sind. Die Endlichkeit der fossilen Energierohstoffe erregte besondere Aufmerksamkeit. Eine Problematik, die dem *Club of Rome* vermutlich damals nicht bekannt war, war die Frage der methodischen Zuverlässigkeit der Reserven- und Ressourcenabschätzung. Auf der vom *Club of Rome* ausgewählten Informationsbasis hat in der Studie *Die Grenzen des Wachstums* die Prognose gelautet, daß bei einem statischen Verbrauch die bekannten Erdöl- und Erdgasreserven noch ca. 30 Jahre ausreichen würden. Bei einem exponentiellen Verbrauch würden Öl und Gas nur 20 Jahre und bei einer Annahme möglicher weiterer Reserven etwa für 50 Jahre reichen. Auf der Basis der damaligen Prognostik müßten zur Zeit die Erdöl- und Erdgasreserven bereits kurz vor der endgültigen Erschöpfung stehen.

Mit dieser Fehleinschätzung des *Club of Rome* möchte ich auf eine Problematik aufmerksam machen, die auch heute noch nicht zufriedenstellend gelöst ist. Während Reserven in der Erdölindustrie weltweit nach ganz bestimmten methodischen Verfahren festgelegt werden müssen und in ihrer Aussage weitgehend zuverlässig sind, ist die Frage der Ressourcenbestimmung nicht so klar geregelt bzw. veraltet. Die klassische Abschätzung der Ressourcen geschah im wesentlichen auf Grund geologischer Daten und auf Erfahrungswerten mit einer statistischen Basis. Für die Exploration ausersiehene Sedimentbecken und deren Unterteile wurden kategorisiert und mit bereits erdölproduzierenden Sedimentbecken des gleichen Typs hinsichtlich ihrer entscheidenden Parameter (Erdölmuttergestein, Reservoirgesteine, Fallenstrukturen etc.) miteinander verglichen. Auf dieser Basis erfolgte dann eine Bewertung über das Kohlenwasserstoffpotential, das in einem noch nicht erforschten Sedimentbecken erwartet werden konnte. Die Ressourcenbewertung geschah also statisch statistisch. Eine moderne Ressourcenbewertung ist jedoch maßgeschneidert auf das jeweilige Untersuchungsobjekt bezogen und dynamisch im Sinne des geologischen Prozeßverständnisses. Dieses Thema der direkten Objektbezogenheit und des Prozeßverständnisses wird zu einem späteren Zeitpunkt behandelt.

Wie eingangs erwähnt, sind Erdöl und Erdgas nach wie vor die mit Abstand wichtigsten Energierohstoffe. Bezüglich Erdöl und Erdgas ist Deutschland ein Importland und die Importabhängigkeit wird weiter steigen. Abbildung 1 zeigt die Importabhängigkeit Deutschlands und den Grad der Selbstversorgung für die einzelnen Primärenergierohstoffe. Während die Eigenproduktion von Erdöl in Deutschland kaum eine Rolle spielt, werden immerhin zur Zeit noch ca. 18 % des Erdgasbedarfs aus heimischer Produktion beigesteuert. In den nächsten 10–15 Jahren werden jedoch die deutschen Erdgasfelder weitgehend erschöpft sein. Die deutsche Steinkohleproduktion wird aus wirtschaftlichen Gründen weiterhin drastisch zurückgefahren werden müssen. Um eine gute Vergleichsbasis der einzelnen Energierohstoffe zu gewährleisten, sind die Mengenangaben in Abbildung 1 in SKE, d. h. in Steinkohleeinheiten, als Energieäquivalente dargestellt. Eine Tonne SKE entspricht 0,70 Tonnen Erdöl bzw. 923 Nm³ Erdgas. Der Energieinhalt einer Tonne SKE sind 29,3 GJ. Abbildung 1 zeigt weiterhin deutlich, daß die beiden anderen wichtigen Energieträger in Deutschland die Kernenergie und die heimische Braunkohle sind. Die alternativen bzw. erneuerbaren Energien spielen auch heute in der Energiebilanz nur eine untergeordnete Rolle.

Betrachtet man in den Abbildungen 2 und 3 das weltweite Gesamtpotential für konventionelles Erdöl bzw. Erdgas und die entsprechende regionale Verteilung, so zeigt sich, daß beim Erdöl die größten Reserven in Saudi-Arabien und Rußland zu finden sind und weiterhin im Mittleren und Nahen Osten. Hinsichtlich der Reserven und Ressourcen für Erdgas spielt

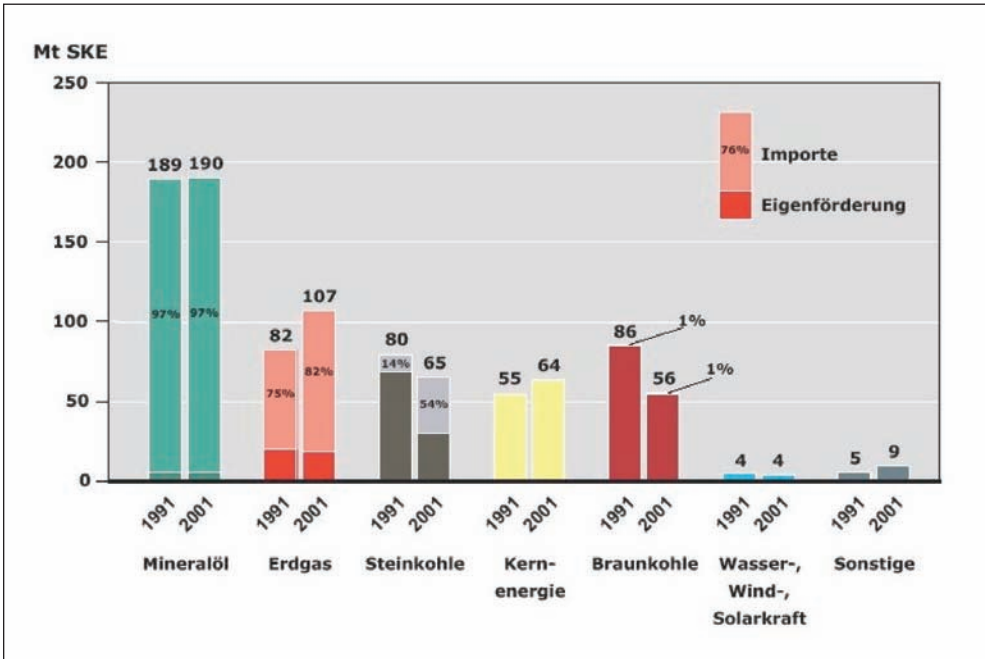


Abb. 1 Importabhängigkeit und Selbstversorgungsgrad Deutschlands bei einzelnen Primärenergie-Rohstoffen in den Jahren 1991 und 2001 (GERLING und BARTHEL 2003, BGR Hannover)

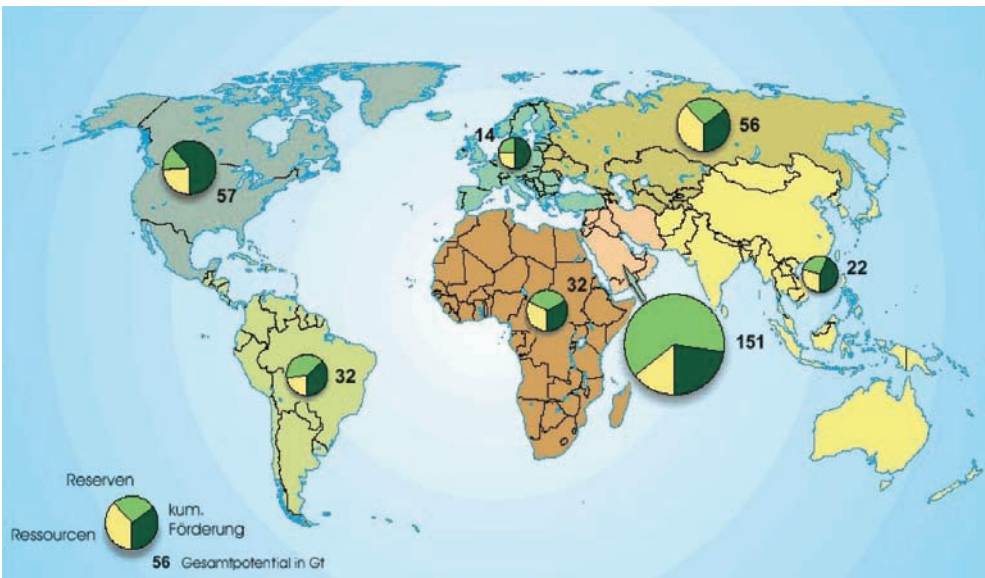


Abb. 2 Gesamtpotential konventionelles Erdöl 2001 (364 Gt): Regionale Verteilung (GERLING und BARTHEL 2003, BGR Hannover)

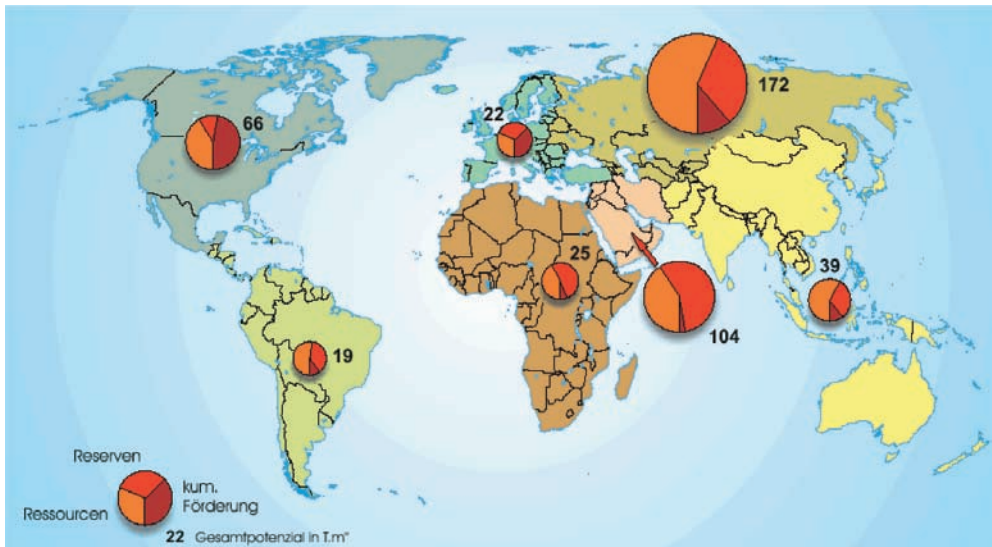


Abb. 3 Gesamtpotential konventionelles Erdgas 2001 (447 Tm³): Regionale Verteilung (GERLING und BARTHEL 2003, BGR Hannover)

Rußland weltweit die dominierende Rolle, danach folgt der Iran bzw. der Mittlere Osten. Es wird aus diesen Darstellungen außerdem deutlich, daß die USA und Kanada, die auf ihrem Territorium liegenden Reserven bzw. Ressourcen bereits am stärksten abgebaut haben. In den Abbildungen 4 und 5 sind jeweils die 20 wichtigsten Länder mit ihren Erdöl und Erdgasvorkommen dargestellt. Eine kluge nationale (und europäische) Energiepolitik sollte in Kooperation mit der Industrie eine politisch-wirtschaftliche Langfriststrategie mit den nötigen Rahmenbedingungen mit diesen Ländern aufbauen.

Der Energiebedarf und die Energiepolitik der großen Industriestaaten haben eine globale Dimension. In diesem Sinne ist Energiepolitik Weltpolitik. Auf diesem Hintergrund sollen nachfolgend die wichtigsten Elemente der deutschen Energiesituation zusammengefaßt werden (Tab. 1). Die Welterdölförderung beträgt zur Zeit etwa 3,5 Milliarden Tonnen pro Jahr, und der Verbrauch wird zunächst weiter steigen. Die Weltgasförderung beträgt 2500 Milliarden Kubikmeter pro Jahr und zeigt ebenfalls steigende Tendenz. Die Erdöl- und Erdgasvorräte sind aber endlich, und die entsprechende Produktion wird von einem bestimmten Zeitpunkt an rückläufig sein müssen. Man rechnet damit, daß in etwa 10–20 Jahren das Maximum der Produktion erreicht wird. Dies wird als *Depletion Midpoint* bezeichnet. Dieser Scheitelpunkt wird beim Erdgas später erreicht werden als beim Erdöl. Die Reichweite von Erdöl und Erdgas ist an eine Reihe von Parametern gebunden, z. B. auch an die Preissituation. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Erdöl- und Erdgasvorräte noch für ca. 50 oder mehr Jahre ausreichen werden, um die Hauptlast der Energieversorgung weltweit zu tragen. Die für die nächsten Jahrzehnte prognostizierte Dominanz von Erdöl und Erdgas hat eine Reihe von Gründen. Dazu gehören neben anderen Faktoren vor allen Dingen die weltweit etablierte Infrastruktur in Gebrauch und Transport und die, auch in unterentwickelten Ländern, leichte Handhabbarkeit. Wegen der hohen Energiedichte sind Erdölprodukte die idealen Treibstoffe

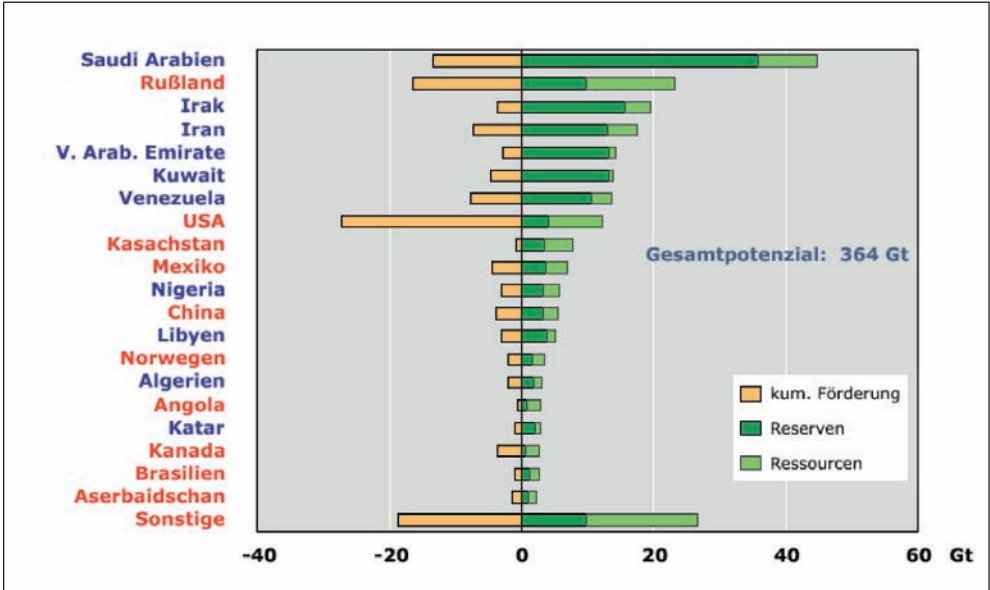


Abb. 4 Gesamtpotenzial konventionelles Erdöl 2001: Die 20 wichtigsten Länder (GERLING und BARTHEL 2003, BGR Hannover)

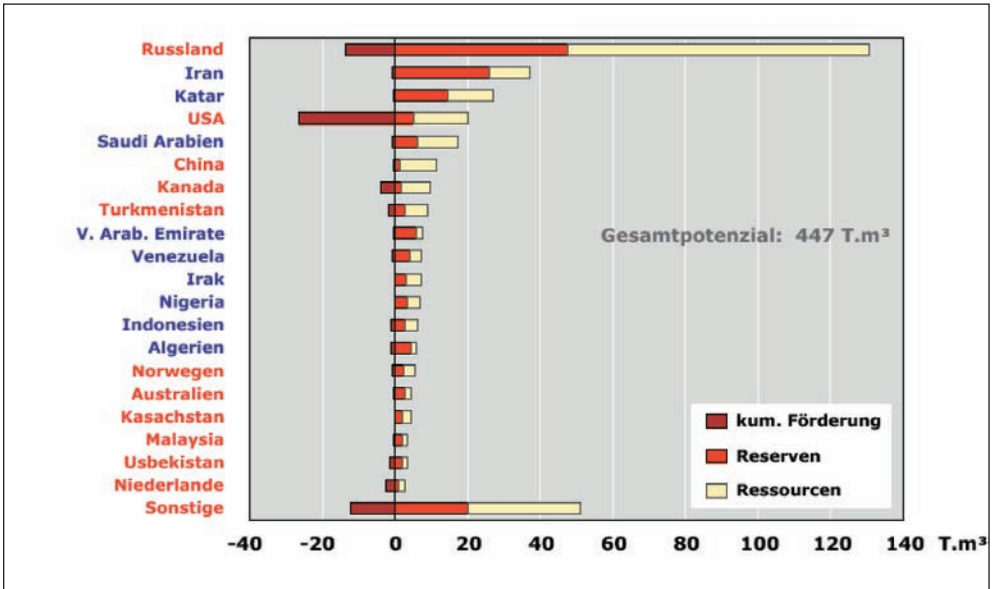


Abb. 5 Gesamtpotenzial konventionelles Erdgas 2001: Die 20 wichtigsten Länder (GERLING und BARTHEL 2003, BGR Hannover)

für den weltweiten Verkehr. Das Erdgas wiederum erfreut sich zunehmender Beliebtheit wegen der 'sauberen' Handhabbarkeit und wegen seines relativ geringen CO₂-Ausstoßes bei der Verbrennung.

Tab. 1 Elemente der deutschen Energiesituation

| | |
|--|---|
| – heutige Welt-Erdölförderung: | ~ 3,5 × 10 ⁹ t/Jahr |
| – heutige Welt-Erdgasförderung: | ~ 2500 × 10 ⁹ m ³ /Jahr |
| – Reichweite Erdöl/Erdgas: | ~ 50+ Jahre |
| – in ~ 10–20 Jahren wird das Maximum (<i>Depletion Midpoint</i>) der Erdöl/Erdgas-Förderung erreicht sein, Erdöl später als Erdgas | |
| – der Energiebedarf der Welt wächst (langsam) weiter ... | |
| – für Erdöl/Erdgas muß ein Ersatz gefunden werden ... | |
| – erneuerbare Energien können helfen, den Bedarf zu decken, sind aber nicht die Lösung des Problems | |

3. Moderne Methoden bei der Reserve- und Ressourcenprognose

Deutschland, ein Land mit nur ganz wenigen Energierohstoffen, ist gut beraten, sich für die notwendigen Energieimporte geeignete Lieferpartner auszusuchen. Mit einem Blick auf die eingangs gezeigte Verteilung der Erdöl- und Erdgasreserven und Ressourcen in der Welt (Abb. 2–5) ist unschwer nachzuvollziehen, daß mögliche Partnerländer als Energielieferanten im Gegenzug auch an Technologie und Kapital interessiert sein werden. In diesem Sinne muß Deutschland auch in Sachen Erdöl und Erdgas ein Hochtechnologieland bleiben und sollte auf eine starke Wirtschaftskraft bauen können. Die Pflege der einschlägigen Technologie in Forschung und Lehre, die zum Teil eine ganz spezifische Hochtechnologie ist, macht unser Land in vielerlei Hinsicht als Kooperationspartner wesentlich attraktiver. Ein Industrieland wie Deutschland, das noch auf lange Sicht seinen Energiebedarf vorwiegend auf der Basis fossiler Kohlenwasserstoffe decken müssen, kann nicht auf einschlägiges Know-how ohne internationalen Gesichtsverlust verzichten.

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Arbeitsphilosophie in der Kohlenwasserstoffexploration gewandelt. Bis in die 80er Jahre des letzten Jahrhunderts bestanden die Grundprinzipien der Erdölexploration vorwiegend darin, daß man im Untergrund die Behälter, d. h. die sogenannten Erdöl- und Erdgasfallen, durch Seismik bestimmt hat, um diese 'Behälter' dann anzubohren und auf Erdöl und Erdgas zu testen. Eine Vorhersage, ob diese Behälter auch mit Kohlenwasserstoffen gefüllt sind, war sehr schwierig und ungenau. Seitdem die Prozesse der Kohlenwasserstoffbildung, die Migration der Kohlenwasserstoffe im Untergrund und die Bildung von Lagerstätten besser verstanden werden, hat sich eine neue Methodik in der Ressourcenprognose etabliert. Die damit einhergehende Technologie und deren Implementierung in der internationalen Erdölindustrie wurden maßgeblich in Europa, und hier vor allen Dingen in Deutschland, entwickelt.

Mit dem rasch wachsenden Verständnis der Erdöl- und Erdgasbildung und den damit einhergehenden chemischen Reaktionen, mit dem Wissen um den Transport der Kohlenwasserstoffe durch Gesteinsschichten unterschiedlicher Permeabilität und Porosität und schließlich mit den Kenntnissen über die Lagerstättenbildung, rückte die numerische Simulation einschlägiger geologischer Prozesse in greifbare Nähe. Immer schneller werdende Prozessoren und die zunehmende Speicherkapazität der Rechner taten ihr übriges, um diese Technologie

in der Erdölindustrie zu etablieren. Damit war in den letzten 10 Jahren die numerische Simulation geologischer Prozesse zum dritten methodischen Standbein der Geowissenschaften geworden, neben der Beobachtung in der Natur und den Experimenten im Laboratorium (Abb. 6).

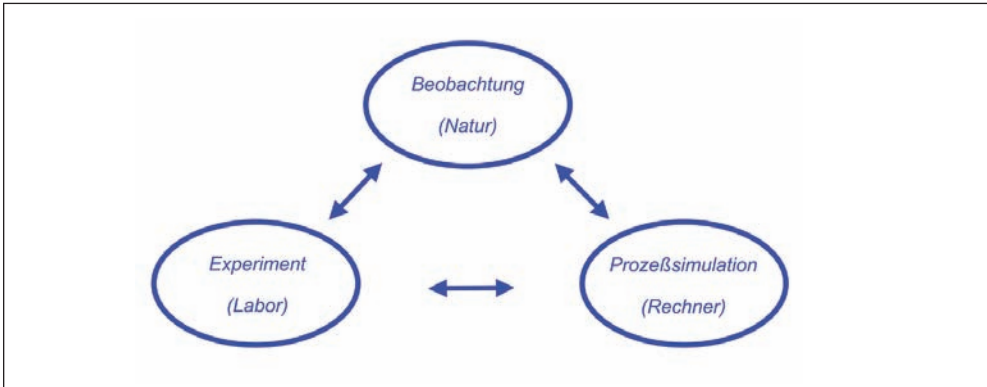


Abb. 6 Die numerische Simulation geologischer Prozesse wurde zum dritten methodischen Standbein der Geowissenschaften

Die in der Erdölindustrie angewandte Methodik der geologischen Prozeßsimulation läuft hier unter dem Namen "Petroleum Systems Modeling". Eine Übersicht über die Bausteine bzw. Module der Petroleum Systems Prozeßsimulation ist in Tabelle 2 dargestellt. Die wichtigsten Prozesse, die in der numerischen Simulation berücksichtigt werden müssen, sind die Bildung von Erdöl und Erdgas (*Petroleum Generation*), die Lösung von Kohlenwasserstoffen in den jeweiligen Phasen Gas, Öl oder Porenwasser (*Petroleum Dissolution*), die Wanderung von Öl und Gas durch den Porenraum der Gesteine (*Petroleum Migration*) und schließlich die Ansammlung von Öl und Gas in möglichen Lagerstätten (*Petroleum Accumulation*). Diese verschiedenen Prozesse sind in der Tabelle 2 auf der rechten Seite genannt. Auf der linken Seite sind die modularen Bausteine der Prozeßsimulation aufgelistet. Die Entstehung von Erdöl und Erdgas im Untergrund aus dem festen organischen Vorläufermaterial, dem Kerogen, kann anhand einer ausgefeilten chemischen Reaktionskinetik und auf der Basis einer Rekonstruktion der Wärmegeschichte des betreffenden Muttergesteins berechnet werden (*Heat Flow Analysis* und *Chemical Kinetics*). Wenn Erdöl und Erdgas im Erdölmuttergestein gebildet werden und später in Zonen geringeren Drucks und niedrigerer Temperaturen in Richtung Oberfläche transportiert werden, dann spielt die Frage von Phasenübergängen eine wichtige Rolle. Auch für die Mengenermittlung und die Bestimmung der letztendlichen Zusammensetzung von Erdöl und Erdgas in der Lagerstätte ist die Kenntnis des Phasenverhaltens nötig. Eine detaillierte Druckanalyse für das sich stark ändernde Druckumfeld im Untergrund ist nicht nur für die Transportvorgänge selbst, sondern auch für die Frage der Schaffung zusätzlicher Wegsamkeiten, z. B. durch Rißbildung, ein wichtiges Element (*Pressure Analysis* und *Fluid Flow Modeling*).

Tab. 2 Die Bausteine (Module) der ‘Petroleum Systems’ -Prozeß-Simulation. Ein interdisziplinäres Konzept (T. HANTSCH, IES GmbH)

| | |
|--|------------------------|
| 7. Risk Analysis Statistics and Stochastics | |
| 6. Accumulation Analysis Volumetrics on Drainage Areas | Petroleum Accumulation |
| 5. Fluid Flow Modeling Darcy Flow and Diffusion | Petroleum Migration |
| 4. Pressure Analysis (+Compaction) Differential Equations | |
| 3. PVT Modeling Flash Iteration Method | Petroleum Dissolution |
| 2. Chemical Kinetics Multicomponent Reactions | |
| 1. Heat Flow Analysis Differential Equations | Petroleum Generation |

Der letzte Schritt in der Prozeßreihe (Tab. 2) ist die eigentliche Bildung von Erdöl- und Erdgas-Akkumulationen (*Accumulation Analysis*). Der Explorationsgeologe ist in erster Linie daran interessiert zu wissen, wieviel Öl oder Gas welcher Qualität erwartet werden kann. Um solche Aussagen sinnvoll machen zu können, muß das gesamte Einzugs- oder Drainagegebiet der betreffenden Lagerstätte erfaßt werden. Der Weg von Erdöl und Erdgas aus dem Drainagegebiet durch die permeablen Gesteinsschichten in die möglichen Lagerstätten, wird sowohl hinsichtlich der Qualität als auch der Menge der Kohlenwasserstoffe und für den entsprechenden Zielort berechnet. Die Speichervolumina jeder einzelnen Lagerstätte in dem dazugehörigen Drainagegebiet, die dort ankommenden Gesamtmengen der Kohlenwasserstoffe und mögliche Verluste auf dem Weg zwischen Muttergestein und Lagerstätte werden verglichen und zueinander in Beziehung gesetzt (*Accumulation Analysis*).

Da die meisten geologischen und geophysikalischen Informationen und Daten entweder Interpretationsergebnisse aus Messungen (z. B. der Geophysik) darstellen oder extrapolierte Informationen über Regionen sind, in denen ein direkter Meßvorgang nicht möglich ist, besteht für diese Daten und Informationen eine gewisse Unsicherheit. Diese Unsicherheiten müssen, soweit möglich, quantifiziert werden, damit der Explorationsgeologe das Risiko der nötigen Investitionen beurteilen kann (*Risk Analysis* in Tab. 2). In der modernen Prozeßanalyse und der damit verknüpften Risikoanalyse der geologischen Daten wird immer die gesamte Prozeßkette betrachtet. Auf diese Weise besteht bei der modernen Ressourcenprognose die Möglichkeit, die gigantischen Investitionen (in Größenordnungen von 10 bis 10³ Millionen US-Dollar) für Exploration und Produktion in neuen Gebieten, gegenüber dem möglichen Erfolg, sehr viel genauer als bisher abzuschätzen.

Es ist anzunehmen, daß der *Club of Rome* seinerzeit keine solche Fehleinschätzung gemacht hätte, wenn er schon Kenntnis über die modernen Prognosetechniken gehabt hätte.

Die Prozeßzusammenhänge für die neue Prognosetechnik werden am besten durch die inhärente Logik des ‘Petroleum Systems Modeling’ repräsentiert (Abb. 7). Ein geeigneter Vorschlag dazu und für eine logische Vorgehensweise stammt von MAGOON (1988) vom *United States Geological Survey* (USGS). Die verschiedenen Einflußparameter werden in drei verschie-

denen Kategorien zusammengefaßt. Die sogenannte ‘Charge’, wobei im wesentlichen Aspekte der Kohlenwasserstoffbildung in den Erdölmuttergesteinen betrachtet werden. Der zweite Themenkreis befaßt sich mit der eigentlichen Kohlenwasserstofffalle und dem einschlägigen Reservoirgestein (Trap). Dabei wird die Frage der Geometrien, der Speicherqualität der Lagerstätte und der Abdeckschichten näher beleuchtet. Damit ist dann das Petroleumsystem statisch beschrieben. Als dritter Aspekt kommt die Frage der Dynamik der einzelnen Prozesse und deren Verknüpfung in Betracht. Dieses läuft unter dem Stichwort ‘Timing’, d. h. daß die Zeitabhängigkeit und die Zuordnung der einzelnen Prozesse beleuchtet werden.

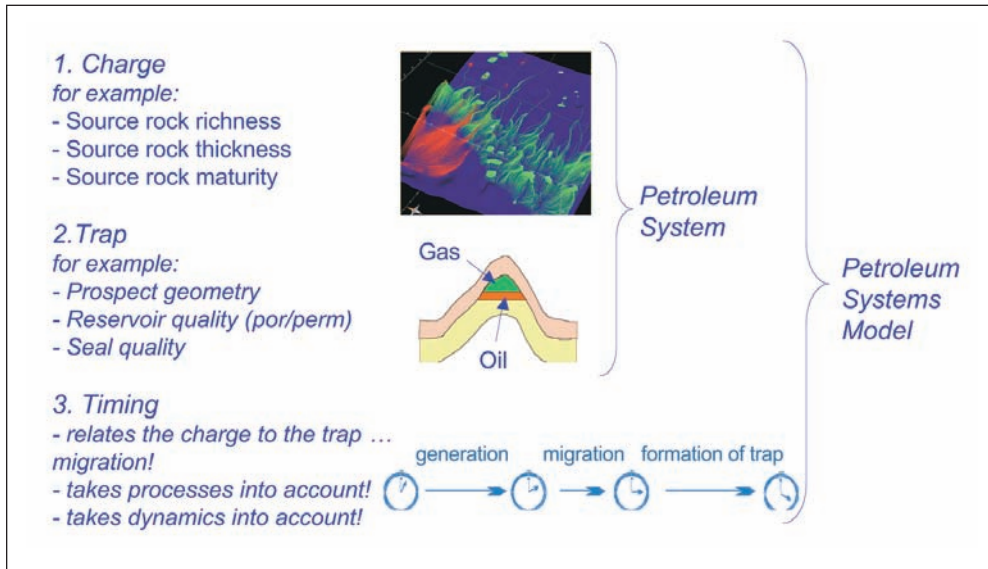


Abb. 7 Inhärente Logik des *Petroleum Systems Modeling*

Dieses Modell berücksichtigt alle wichtigen Explorationsrisikofaktoren und erlaubt darüber hinaus deren Quantifizierung. Damit wird es zu einem wichtigen Instrument in der Erdölindustrie. Nicht nur als begleitendes Führungsinstrument für Explorationskampagnen und die Feldesentwicklung, sondern auch für die Finanzplanung und die Risikobewertung. Eine strikte Anwendung dieser Technologie erlaubt es für ein bestimmtes Sedimentbecken, das für die weitere Exploration interessant ist, eine Unterteilung nach Drainagegebieten (*Drainage Areas*) für Petroleum-Systeme zu definieren. Nach vollzogener Petroleum-Systems-Prozeßsimulation für dieses Gebiet kann für jede existierende Erdölfalle bzw. das jeweilige Reservoir, das zu erwartende Kohlenwasserstoffvolumen definiert werden. Die Unsicherheit bzw. Wahrscheinlichkeit, mit der man eine bestimmte Menge von Erdöl oder Erdgas finden wird, ist ebenfalls angegeben (Abb. 8). In vielen Erdölfirmen werden die oben beschriebenen Prozeßsimulationen inzwischen routinemäßig angewendet. Dadurch hat sich in bestimmten Erdöl- und Service-Firmen eine große Datenmenge angesammelt, die es erlaubt, für größere Regionen, z. B. auch ganze Länder, recht genaue ‘Reserve-Ressourcen-Schätzungen’ durchzuführen.

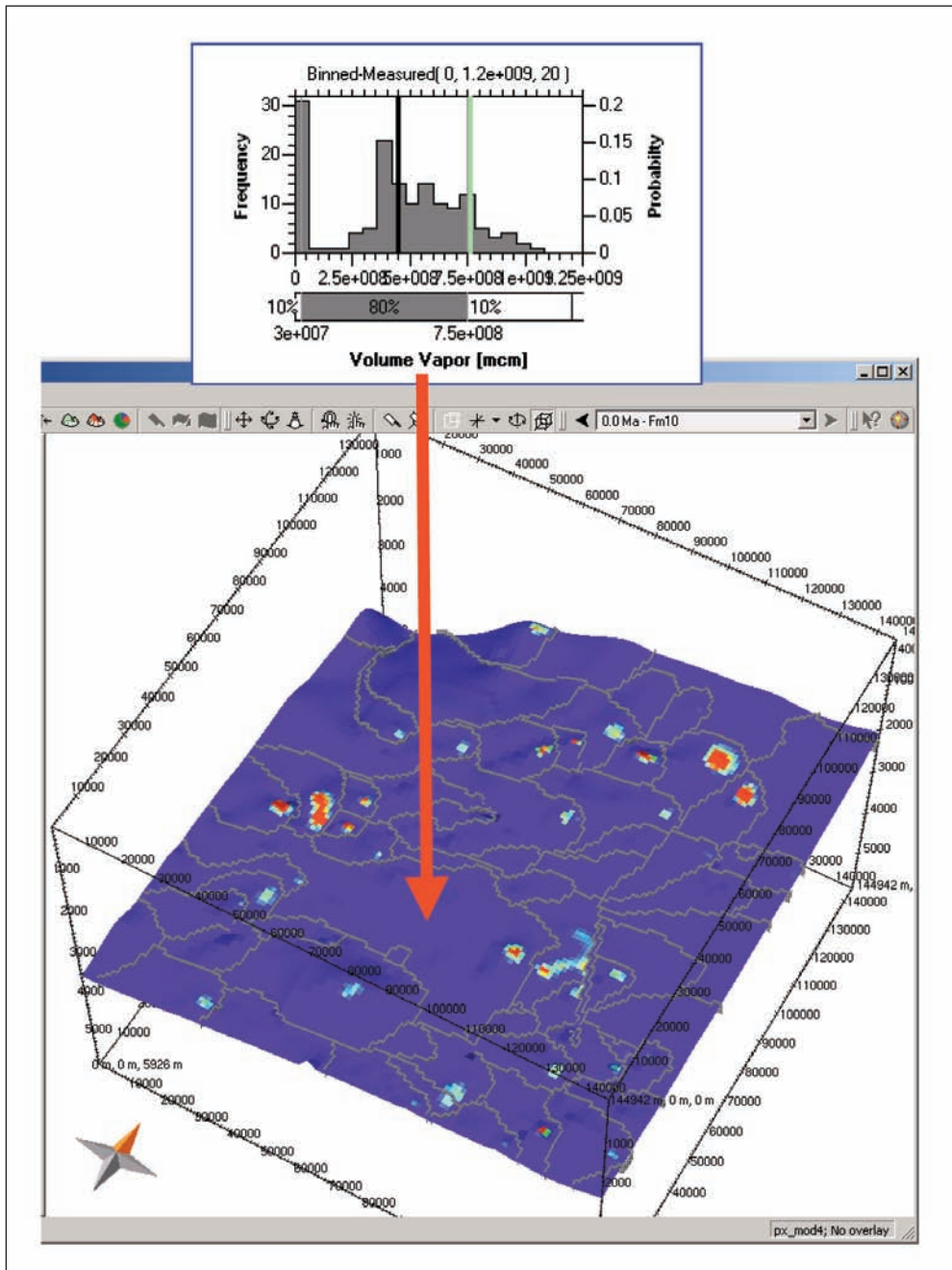


Abb. 8 Statistische Bewertung der Akkumulationsmengen an Kohlenwasserstoff in einer "Drainage Area" (Einzugsgebiet) (A. KAUEAUF, IES GmbH)

4. Anwendung der modernen Reserve- und Ressourcenprognose auf die »National Petroleum Reserve Alaska«

Die Lage eines Untersuchungsgebietes, für das eine moderne Reserve-Ressourcenprognose durchgeführt wurde, ist in Abbildung 9 dargestellt. Es handelt sich um einen Ausschnitt der »National Petroleum Reserve Alaska« (NPRA), die im Westen an die *Alaska National Wildlife Reserve* (ANWR) angrenzt. In dieser Region gibt es bereits mehrere große Öl- und Gasfelder, von denen das *Prudhoe-Bay*-Feld und das *Point-Barrow*-Feld wohl die bekanntesten sind. Vom *Prudhoe-Bay*-Ölfeld reicht die große *Transalaska-Pipeline* nach Süden. Die Prognosestudie für diese Region wurde in Zusammenarbeit mit dem USGS durchgeführt, unter der Leitung von Les MAGOON. Für die einschlägigen Simulationsrechnungen der Studie wurde die *PetroMod*-Software der IES GmbH genutzt. Verständlicherweise können hier nur einige Ausschnitte aus dieser Studie gezeigt werden. Der Sinn dieses Beispiels besteht darin, die Grundprinzipien und möglichen Ergebnisse einer solchen Prognosestudie dem Leser verständlich zu machen.

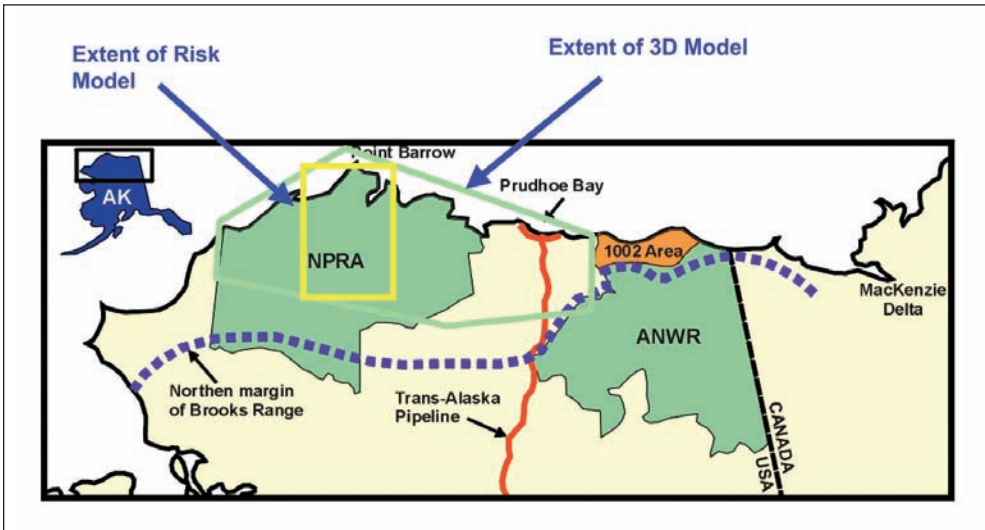


Abb. 9 Lage des Untersuchungsgebietes »National Petroleum Reserve Alaska« (LAMPE et al. 2003)

Die Abbildung 10 zeigt das geologische 3D-Model, das für diese Prognosestudie erstellt wurde. Auf der linken Seite ist die stratigraphische Abfolge der dort anzutreffenden Gesteinsformationen wiedergegeben. Die für die Erdöl- und Erdgasbildung wichtigen Erdölmuttergesteine sind die kretazischen Tonsteine (shales HRZ) und die darunter liegende »Pebble Shale Unit«. Der jurassische Kingakshale und die triassische Shublikformation haben ebenfalls Erdölmuttergesteinscharakter. Auf der rechten Seite der Abbildung 10 sind in dem farbigen 3D-Model nur einige wichtige Gesteinsschichten gezeigt, um die komplexen Geometrien zu erkennen und um ein Verständnis für das Gesamtsystem zu erhalten. Zuunterst ist das Basement (Grundgebirge) dargestellt, das auch die Untergrenze des gesamten Petroleumsystems darstellt. Als wichtiges Muttergestein ist die triassische Shublikformation eingetragen. Die im oberen Bereich des 3D-Modells wiedergegebenen sogenannten »Foresets«, oder sedimentären

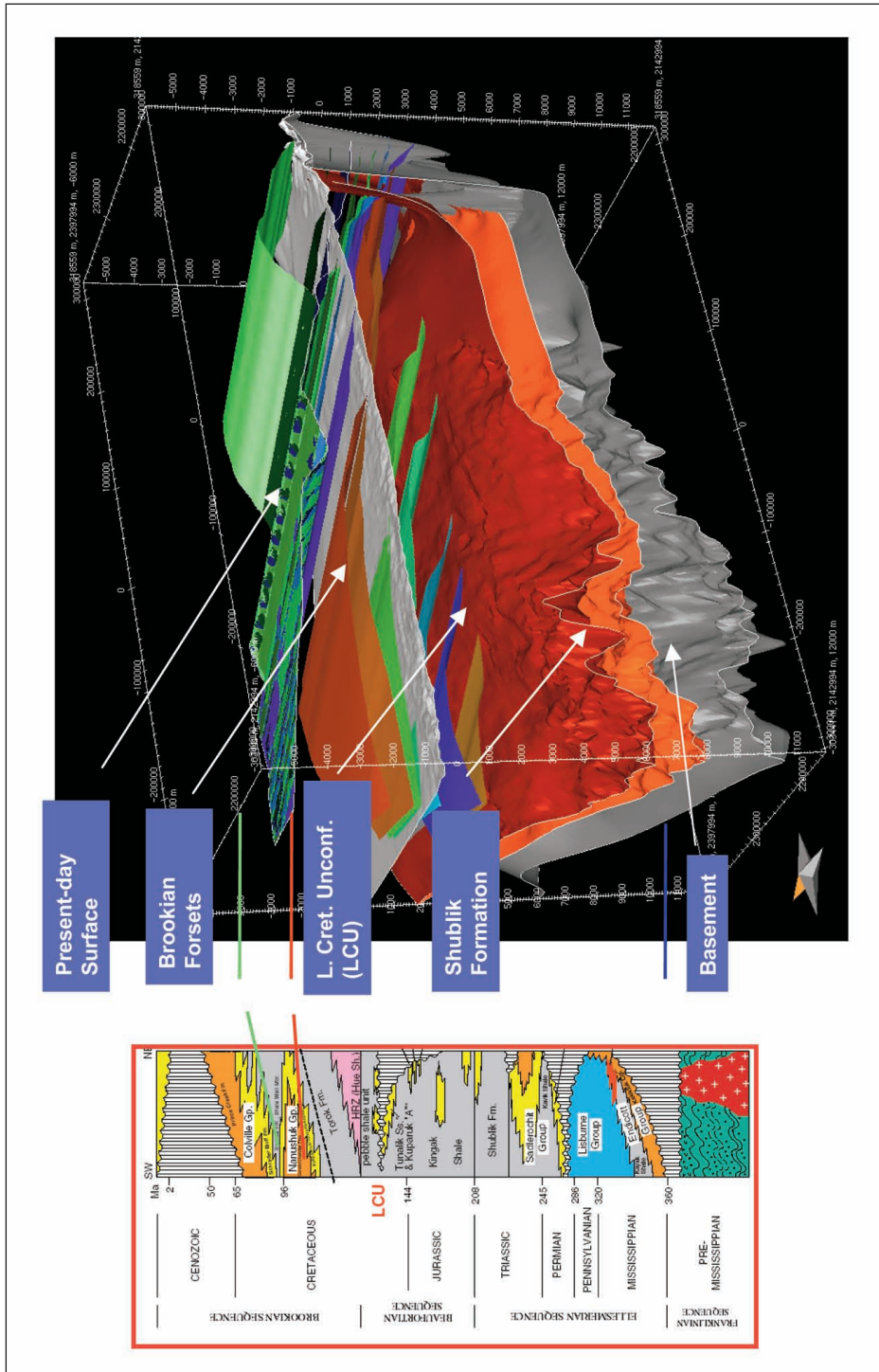


Abb. 10 Geologisches 3D-Modell des Untersuchungsgebietes in Alaska (LAMPE et al. 2003)

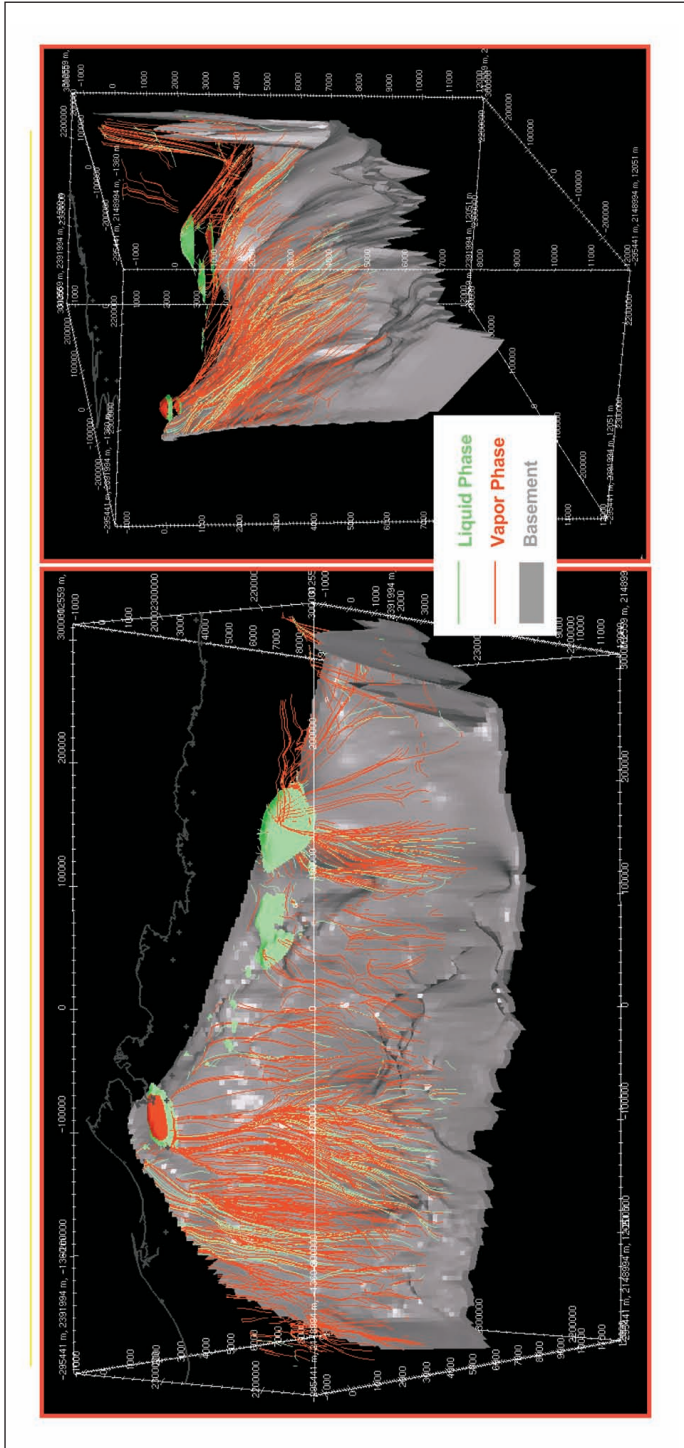


Abb. 11 Berechnete Migrationspfade und gefüllte Reservoirlokalationen im Untersuchungsgebiet in Alaska (LAMPE et al. 2003). Major migration pathways of liquid and vapor phases are mainly directed from South to North. Spilling and secondary migration pathways (caused by geometry changes induced by the foresets) run perpendicular to the major direction of migration.

Schüttungsfächer, sind deshalb von Bedeutung, da sie bei der Entwicklung des Beckens eine wichtige Rolle für die Absenkung bzw. Inversion gespielt haben. Dieser Bereich soll hier jedoch nicht näher erläutert werden. Die sichtbaren komplexen Geometrien der einzelnen Schichten entsprechen dem heutigen Zustand des Beckens. Man muß sich darüber im klaren sein, daß etwa die triassische Shublikformation, die in der Zeit der Trias in einem flachen Meeresbecken abgelagert wurde, im Laufe der Jahrmillionen abgesenkt wurde und daher heute die hier dargestellte Tiefenlage einnimmt. Im Laufe dieser Absenkung, von bis zu mehreren Tausend Metern, und der damit einhergehenden Temperaturerhöhung, wurde dann in der Shublikformation Öl und Gas gebildet. Die Prozeßsimulation für die Ressourcenprognose durchläuft für jede Schicht die für sie typische Absenkung und Temperaturerhöhung und verknüpft alle Prozesse, die mit der Erdölbildung, der Erdölmigration und der Ansammlung von Öl und Gas in Reservoirstrukturen einhergehen. Die geographischen Grenzen, für die ein solches 3D-Modell erstellt wurde, sind auf der Abbildung 9 wiedergegeben.

Die entscheidende Information für zukünftige Explorationsbemühungen bzw. auch für die Information, die einem Prognosemodell zugrunde liegen sollte, ist die Frage, inwieweit vorhandene Strukturen mit Erdöl oder Erdgas beschickt und gefüllt worden sind. Das Migrationsverhalten der flüssigen und gasförmigen Phase der Kohlenwasserstoffe, die im Wasser gefüllten Porenraum der Gesteine dem Auftrieb folgend in höhere Lagen streben, ist daher wichtig zum Verständnis der Füllung von Reservoirstrukturen. Die Schichten, die einen Transport von Erdöl oder Erdgas erlauben, weisen eine deutlich höhere Porosität und Permeabilität auf als andere Gesteine. Sie werden daher als 'Carrierrocks' oder Transportgesteine bezeichnet. Die Daten über die petrophysikalische Variabilität, insbesondere Porosität und Permeabilität, und natürlich die Gegebenheiten des Druckfeldes und der jeweiligen Temperatur gehen in die Simulationsrechnungen mit ein. Abbildung 11 zeigt die berechneten Migrationspfade für Gas und Öl und die letztendlich gefüllte Lagerstätte. Im Untersuchungsgebiet verlaufen die Hauptmigrationspfade von Süd nach Nord. In der Abbildung 11 sind zwei verschiedene Raumrichtungen der gleichen Lagerstätte gezeigt.

Während der Migration von Erdöl und Erdgas und bei der Produktion aus einer Lagerstätte treten die bekannten Phasenveränderungen auf. Die Komponentenmischung in der Öl- bzw. Gasphase ändert sich in beiden Fällen mit den jeweiligen Druck- und Temperaturbedingungen. Ausschlaggebend für den Marktwert ist jeweils die Zusammensetzung der Förderprodukte an der Erdoberfläche. Die sogenannten 'Flash Calculations' erlauben eine Vorabrechnung der jeweiligen Produktzusammensetzung, für jeden beliebigen Punkt im geologischen Untergrund oder für die Bedingungen der Erdoberfläche und den Transport. Abbildung 12 zeigt zwei übereinanderliegende, kohlenwasserstoffgefüllte Reservoirs aus dem Untersuchungsgebiet in Alaska. Die beiden einschlägigen Reservoir-Sandsteine sind die maßgeblichen Förderhorizonte in der Region. Das obere Reservoir in Abbildung 12 wurde überwiegend durch Kohlenwasserstoffe aus der Shublik-Formation gefüllt. Die Zusammensetzung der Füllung kann dem oberen runden Diagramm entnommen werden. Wenn diese Öl/Gasmischung an die Oberfläche transportiert wird, ändert sich die Zusammensetzung so, wie sie im unteren runden Diagramm gezeigt ist (Abb. 12). Das heißt, in der Gasphase sind im allgemeinen weniger C₃₊-Komponenten, und in der Ölphase werden hochmolekulare und polare Komponenten (z. B. Asphaltene) unterdrückt.

Insgesamt konnte durch die hier vorgestellten Rechnungen das Reserve- und Ressourcenpotential im ganzen Untersuchungsgebiet von Alaska erheblich verbessert und verfeinert werden.

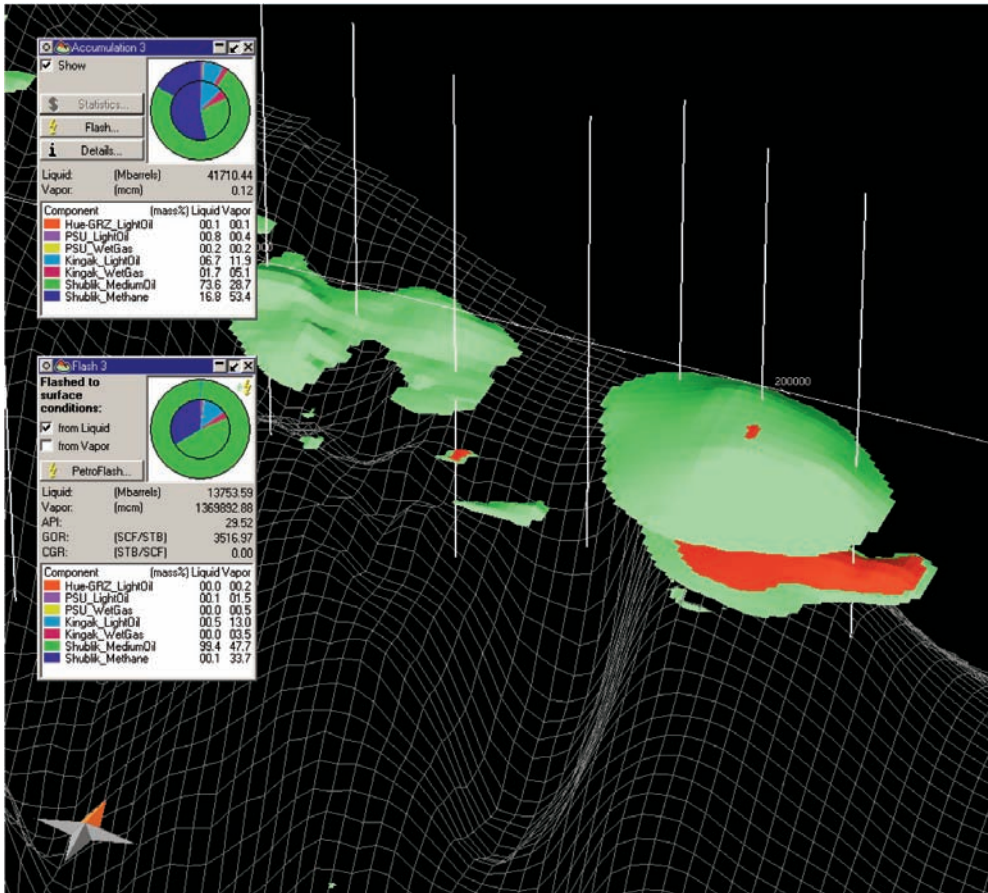


Abb. 12 Gefüllte Reservoirs im Untersuchungsgebiet in Alaska (LAMPE et al. 2003)

5. Deutsche Energiepolitik und Globalisierung

Energiepolitik ist Weltpolitik. Die zunehmende Globalisierung wird den Wettbewerb der Länder untereinander verschärfen. Deutschland als hochtechnisiertes Industrieland und Energieimportland (Import von Kohlenwasserstoffen in 2002 im Wert von ca. 30 Milliarden Euro), muß eine realistische und vorausschauende Energiepolitik betreiben, um im Konkurrenzkampf der Nationen zu bestehen. In diesem Zusammenhang gilt es, die Fakten der Energiepolitik zu berücksichtigen und sozusagen "die Zeichen an der Wand" richtig zu lesen. Die USA, die aus unserer Sicht ein ineffizientes Energieverbrauchszenario haben, konsumieren zur Zeit etwa ein Viertel der jährlichen Welterdölproduktion. Dieser exzessive Verbrauch von Erdölprodukten muß durch eine nahezu 60%ige Importquote befriedigt werden. Die heimischen Erdölreserven in den USA werden in ca. 10–15 Jahren zur Neige gehen. Bereits heute gibt es gewisse Engpässe der Erdgasversorgung und der Bedarf steigt. In etwa dem gleichen

Zeitraum, d. h. in ca. 10–15 Jahren, wird der Erdölbedarf in China die Größe erreicht haben, wie in den USA. Dies bedeutet, daß irgendwann um das Jahr 2020 die USA und China zusammen ungefähr die Hälfte der Welterdölförderung verbrauchen werden. Andere Wirtschaftsräume, die ähnlich wie China ein überproportionales Wirtschaftswachstum haben, werden ebenfalls auf dem Weltöl- oder Gasmarkt als Konkurrenten auftreten. Auch wenn der Erdölpreis Schwankungen unterworfen sein wird, ist dennoch davon auszugehen, daß Erdölpreise hoch bleiben und eine insgesamt steigende Tendenz aufweisen werden. Der internationale Währungsfonds hat sich mit der Thematik des globalen Wirtschaftswachstums und den Ölpreisen befaßt. Nach Ansicht des internationalen Währungsfonds wird ein Ölpreisanstieg von \$ 5,- pro Barrel das globale Wirtschaftswachstum um ca. 0,3 % reduzieren. Die deutsche Volkswirtschaft, die zur Zeit durch ihre hohe Arbeitslosigkeit und ihr schlechtes Wirtschaftswachstum besonders anfällig ist, würde unter steigenden Ölpreisen empfindlich leiden.

Obleich der *Club of Rome* hinsichtlich der Verfügbarkeit von Erdöl in Richtung auf ein bestimmtes Zeitfenster eine eklatante Fehlprognose gemacht hat, gilt es, nicht zu übersehen, daß er die Frage der Endlichkeit der Rohstoffe und möglicher Auswirkungen richtig eingeschätzt hat. In diesem Sinne ist das Problem der Erreichung der maximalen Erdölförderung in ca. 10–20 Jahren, d. h. des 'Depletion Midpoint', ernstzunehmen. Dieser Zeitpunkt wird zusammenfallen mit der weiter oben gemachten Feststellung, daß die USA und China zusammen etwa die Hälfte der Welterdölproduktion benötigen werden. Bedenkt man ferner, daß es ca. 10–15 Jahre dauert, bis aus Ressourcen echte Reserven geworden sind, so ist unschwer zu erkennen, daß wir einer unsicheren Zeit hinsichtlich der Energieversorgung mit fossilen Kohlenwasserstoffen entgegengehen (siehe Tab. 3).

Tab. 3 Globale Aspekte der Versorgung mit fossilen Kohlenwasserstoffen. ... die Zeichen an der Wand ...

- die USA verbrauchen ca. ein Viertel der Welterdölproduktion, 60 % des Bedarfes werden importiert;
- in ca. 10 Jahren werden die heimischen Erdölreserven der USA erschöpft sein;
- die USA haben bereits heute ein Erdgasversorgungsproblem ... der Bedarf steigt;
- in ca. 10 Jahren wird China (bei gleich bleibendem Wirtschaftswachstum) in etwa einen Erdölverbrauch wie die USA haben;
- ein Ölpreisanstieg um 5 \$ je Barrel erniedrigt das globale Wirtschaftswachstum um 0,3 % (Internationaler Währungsfonds);
- in ca. 10–20 Jahren wird der »Depletion Midpoint« der globalen Erdöl-/Erdgasproduktion erreicht sein;
- es dauert ca. 10 Jahre, um von Ressourcen zu Reserven zu kommen.

In Anbetracht der gegenwärtigen deutschen Energiepolitik muß man zu dem Schluß kommen, daß die Bundesregierung von all den oben genannten Fakten keine Notiz genommen hat. Der Ausstieg aus der Atomkraft, d. h. die Schließung der Kernkraftwerke in den nächsten 15–20 Jahren ist politischer Beschluß. Im gleichen Zeitraum sollen 'alte' Steinkohlekraftwerke geschlossen werden. Deutschland, das zur Zeit noch ca. 18 % des Erdgasbedarfs aus eigenen Gasfeldern deckt, wird im gleichen Zeitraum diese Gasfelder erschöpft haben. Die Logik dieser Politik der Schließung von Kernkraftwerken und Steinkohlekraftwerken hängt vorrangig mit der CO₂-Diskussion, generellen Umweltängsten und der Furcht vor einem 'Atom-Gau' zusammen. Sowohl das CO₂, das aus wissenschaftlicher Sicht in seiner Klimawirkung noch immer nicht richtig eingeschätzt werden kann, als auch die Frage der Unsicherheit von Kernkraftwerken sind keine 'Inselprobleme' für Deutschland, sondern grenzübergreifende Probleme ganzer Kontinente.

Hinsichtlich der Energieeffizienz nimmt Deutschland eine Spitzenstellung ein. Trotz dieser Erfolge, oder gerade wegen dieser Erfolge, muß Energiepolitik aber realistisch bleiben und darf nicht weltfremd ideologisch sein. Leider macht jedoch die Energiepolitik weder einen realistischen Eindruck, noch ist sie in sich selbst logisch. Ein Zeichen für Unlogik ist die Tatsache, daß Erdöl und Erdgas nach dem Energieinhalt besteuert werden. Bei gleichem Energieinhalt produziert aber Erdöl zweimal so viel CO₂ wie Erdgas. Das heißt also, daß das umweltverträglichere Erdgas steuerlich bestraft wird. Die Förderung erneuerbarer Energien durch die Bundesregierung ist an und für sich eine richtige und zukunftsweisende Entscheidung. Diese Förderung sollte jedoch objektiv und mit Augenmaß betrieben werden. Windmühlen an inländischen Standorten mit zu wenig Wind sind sicherlich keine sinnvolle Investition in die Zukunft. Sie belasten den Steuerzahler und die Wirtschaft mit ihren Stromabnahmeverpflichtungen. Die Kürzung der Energieforschungsfinanzierung in den Bereichen fossile Energie und Kernenergie ist ein weiteres Indiz für eine ideologisch geprägte Forschungspolitik. Steht es doch außer Frage, daß die nächsten 50+-Jahre im wesentlichen von der fossilen Energie (und der Kernenergie) getragen werden müssen. Erneuerbare Energien werden in dem besonders kritischen Zeitraum, bis etwa 2020, zwangsläufig unterhalb der 10 % Grenze des Energieangebotes bleiben. Der internationale Wettbewerb um Energie wird dann, in einer weiterhin zunehmend globalisierten Welt, einem Höhepunkt zustreben. Die Kürzung der bundesgeförderten Energieforschung in den Bereichen fossile Energie und Kernenergie ist auf diesem Hintergrund schlichtweg unbegreiflich.

Obendrein ist zu befürchten, daß der jetzt anstehende CO₂-Emissionshandel aufgrund zu hoher Preise zu einer weiteren Belastung für den deutschen Energieverbraucher, insbesondere bei den Strompreisen wird. Der Emissionshandel macht auch nur Sinn, wenn er international abgestimmt ist.

In Sachen fossile Energie und Energiewirtschaft muß neben den politischen Aspekten und Rahmenbedingungen auch die industrielle Seite betrachtet werden. Man darf hierbei nicht vergessen, daß die großen internationalen Erdölgesellschaften zu den bedeutendsten Wirtschaftsunternehmen der Welt gehören. Im europäischen Umfeld, das für Deutschland besonders wichtig ist, stellen wir fest, daß unsere Nachbarn besser positioniert sind als wir. Es gibt in folgenden europäischen Ländern große, international operierende Erdölfirmen: England (BP, Shell), Frankreich (Total), Holland (Shell), Norwegen (Norsk Hydro, Statoil), Italien (ENI-Agip) und Spanien (Repsol-YPF). Vergleichbar einflußreiche Erdölfirmen gibt es in Deutschland nicht. Hier haben die politischen und steuerlichen Rahmenbedingungen entgegengewirkt.

6. Schlußfolgerungen

Das absehbare Konvergieren der beschriebenen Negativentwicklungen für unsere Energieversorgung mit einer Schnittstelle etwa im Jahr 2025 ist außerordentlich besorgniserregend. Die Diskrepanz zwischen Wirklichkeit und Wahrnehmung hinsichtlich der Bedeutung und Nutzung fossiler Kohlenwasserstoffe ist in Deutschland besonders groß. Sie ist zu groß! Deutschland wird noch für Dekaden auf eine ausreichende Grundversorgung mit fossilen Kohlenwasserstoffen angewiesen sein. Wegen der sich abzeichnenden Verknappung von Öl und Gas in den nächsten 20 Jahren müssen jetzt die Weichen für eine langfristige Absicherung einer robusten Energieversorgung gestellt werden. Gefragt ist eine realitäts-bezogene Ener-

giepolitik mit Augenmaß. Der Energiemix muß volkswirtschaftlichen Kriterien und maßvollen Umweltstandards genügen. Die Energieproblematik ist gesellschaftlich sehr komplex und muß außerdem in Einklang mit der globalen Situation gelöst werden.

Sparen und eine weitere Effizienzsteigerung der Energienutzung sind oberstes Gebot. Erneuerbare Energien sind hochwillkommen. Sie werden aber unser Grundproblem nicht lösen können und auf absehbare Zeit unter 10 % der benötigten Energiemenge bleiben. Die gegenwärtige Energiepolitik der Bundesregierung orientiert sich nicht an der Realität der Energieproblematik. Wir müssen Anstrengungen unternehmen, um die Energiediskussion zu versachlichen. Gesellschaft, Medien und Politik verweigern in ihrer Mehrheit die Erkenntnis eines langfristig drohenden Engpasses an Energie. Die vorprogrammierte Lücke im Energieangebot, die durch das Abschalten von Kernkraftwerken auf uns zukommt, sollte und kann durch Erdgas geschlossen werden. Um international konkurrenzfähig zu bleiben, darf die Forschungspolitik nicht ideologisch beeinflusst werden. Wir benötigen dringend eine Intensivierung einer angemessenen Forschung im Bereich fossile Energie und Kernenergie. Wir benötigen wirtschaftlich und ökologisch realistische Rahmenbedingungen für die Industrie. Es besteht akuter Handlungsbedarf.

Dank

Meinen Kollegen Dr. Thomas HANTSCHHEL und Dr. Armin KAUEAUF, beide IES GmbH, Jülich, danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Literatur

- BERNER, U., und STREIF, H. J.: Klimafakten: Der Rückblick – Ein Schlüssel für die Zukunft (BGR, EEA, NLFb). Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller) 2001
- GERLING, P., und BARTHEL, F. (Eds.): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2002. Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien XXVIII (2003)
- LAMPE, C., PETERS, K. E., MAGOON, L. B., BIRD, K. J., and LILLIS, P. G.: Petroleum Systems of the Alaskan North Slope – A Numerical Journey from Source to Trap. Poster presented at the AAPG Annual Meeting Salt Lake City, Utah, May 11–14 (2003)
- MAGOON, L. B.: The petroleum system – a classification scheme for research, exploration and resource assessment. In: MAGOON, L. B. (Ed.): Petroleum Systems of the United States. U.S. Geological Survey Bulletin 1870, 2–15 (1988)
- PetroMod Software, IES GmbH Aachen, Deutschland, siehe: HANTSCHHEL, T., KAUEAUF, A. I., and WYGRALA, B.: Finite element analysis and ray tracing modeling of petroleum migration. *Marine and Petroleum Geology* 17, 815–820 (2000)

Prof. Dr. Dr. h. c. Dietrich WELTE
ehemals Forschungszentrum Jülich GmbH
und Prof. em. RWTH Aachen
Integrated Exploration Systems
Ritterstraße 23
52072 Aachen
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 241 5158610
Fax: +49 241 5158690
E-Mail: support@ies.de

Die Biosphäre als Energiequelle und Kohlenstoffsенke

Christian KÖRNER (Basel)

Mitglied der Akademie

Mit 5 Abbildungen



Zusammenfassung

Kohlenstoff ist der stoffliche Hauptträger des Lebens und wurde in Form fossiler Energieträger zur zentralen Säule der Energieversorgung der Menschheit. Jährlich fließt in den atmosphärischen CO₂-Kohlenstoffpool 1 % zusätzliches CO₂ aus Verbrennung fossiler Energieträger und Waldzerstörung. Ein Teil davon löst sich im Ozeanwasser, ein Teil wird von Pflanzen absorbiert und ca. 3 Mrd. t C bleiben in der Luft, die heute bereits ca. 375 ppm CO₂ enthält – ein Drittel mehr als zu Beginn der Industrialisierung. Dieser Beitrag behandelt die Möglichkeiten (1) einer Substitution fossiler durch nachhaltig produzierte biologische Rohstoffe, (2) vermehrter Bindung von Kohlenstoff in der Biosphäre, und (3) einer Erhöhung der pflanzlichen Produktivität durch »CO₂-Düngung«. Es wird gezeigt, daß in industrialisierten Ländern das realistische Bioenergiepotential relativ bescheiden ist (< 5 %) und die CO₂-Stimulierung des Wachstums daran kaum etwas ändert. Die mit Abstand wirksamste biologische Maßnahme zur Verlangsamung des CO₂-Anstieges in der Atmosphäre ist der Schutz von alten Waldbeständen. Entscheidend in der Kohlenstoffdiskussion sind die biologischen Kohlenstoffvorräte und nicht die Geschwindigkeit mit der Kohlenstoff durch ein Ökosystem oder die ganze Biosphäre gepumpt wird. Aufforstungsprogramme können nicht annähernd so viel Kohlenstoff binden, wie bei der Urwaldzerstörung frei wird. Die Ausweitung der derzeitigen Waldflächen ist eine sehr langsam wirksame und einmalige (nicht wiederholbare), aber dennoch wichtige Maßnahme. Experimentelle Befunde lassen erwarten, daß die CO₂-Anreicherung in der Atmosphäre die Walddynamik vor allem in den Tropen beschleunigt (Lianenproblem), was zu einer Reduktion dieses riesigen Kohlenstoffvorrates führen kann.

Abstract

Carbon is the material basis of life and also became the core of humanity's fossil fuel based energy system. Each year, mankind emits ca 1 % additional CO₂ into the atmospheric CO₂ pool by fossil fuel burning and forest destruction. Part of this CO₂ becomes diluted in ocean water, part is absorbed by plants, but 3 billion tons remain in the air, which already contains ca. 375 ppm of CO₂, one third more than at the beginning of the industrial revolution. In this contribution I discuss the possibilities to (1) substitute fossil by sustainably produced biofuels, (2) enhance carbon sequestration to the biosphere, and (3) to stimulate plant productivity by elevated CO₂ concentrations. It is shown that in industrialized countries, the realistic bioenergy potential is rather limited (< 5%) and CO₂-stimulated productivity cannot change this significantly. By far the most effective biological measure to slow down atmospheric CO₂ enrichment is the preservation of old growth forests. It is key to the whole carbon debate that it is the carbon pool size which matters and not the speed by which carbon is pumped through ecosystems or the biosphere. Afforestation and reforestation can never in a timely fashion compensate for the carbon release by logging and burning of existent forests. Extension of forest area is, however, an additional, though slow and one-time (not repeatable) important measure. There is experimental evidence that atmospheric CO₂ enrichment is likely to enhance forest dynamics, particularly in the tropics (liana problem), which can lead to a reduction of this immense carbon reservoir.

1. Einleitung

In der aktuellen Diskussion über Energieversorgung und Klimawandel spielt der Kohlenstoffkreislauf eine zentrale Rolle. Als stofflicher Hauptträger des Lebens auf der Erde wurde der Kohlenstoff in Form fossiler Energieträger vor etwa 150 Jahren auch zum Hauptträger des Energiesystems der Menschheit und wird es über den Großteil des jetzigen Jahrhunderts auch bleiben (siehe Beitrag WELTE 2004). Einem natürlichen, jährlichen Umsatz von 100 Gt Kohlenstoff, dessen Jahresbilanz nahe Null ist, steht ein anthropogener Umsatz von nahe 7 Gt Kohlenstoff gegenüber, dessen Bilanz stark positiv ist. Das heißt, jährlich bleiben etwa 3 Gt C als Abfall der Verbrennung fossiler Energieträger und der Waldzerstörung in Form von CO_2 in der Atmosphäre zurück, etwa 2 Gt lösen sich als CO_2 und Kohlensäure im oberflächennahen Ozeanwasser, und von 1 bis 2 Gt kennt man das Schicksal nicht, vermutet aber einen Verbleib in den terrestrischen Ökosystemen (siehe Quellen in SCHLESINGER 1991, GATES 1993, KÖRNER 1997). Daran knüpfen sich weitreichende Konsequenzen für das Weltklima, den Chemismus der Ozeane sowie den Metabolismus der Biosphäre.

Der augenfälligste und unbestrittene Effekt ist, daß sich die CO_2 -Konzentration in der Luft jedes Jahr um ca 1,5 ppm erhöht und die Atmosphäre heute mit nahe 375 ppm etwa ein Drittel mehr an CO_2 enthält als zu den Zeiten, als die ältesten Alleebäume in unseren Städten gepflanzt wurden. Die heutige CO_2 -Konzentration liegt völlig außerhalb der Bandbreite, in der sie während der jüngeren geologischen Geschichte im Eiszeitzyklus schwankte (Abb. 1). Da CO_2 nicht irgendein Schadgas, sondern der Rohstoff der pflanzlichen Photosynthese (siehe Beitrag OESTERHELT 2004) und des Pflanzenwachstums ist, stehen Biologen an vorderster Front der weltweiten Erforschung des CO_2 -Problems. Jedes Stück Holz, jedes Papier, auch je-

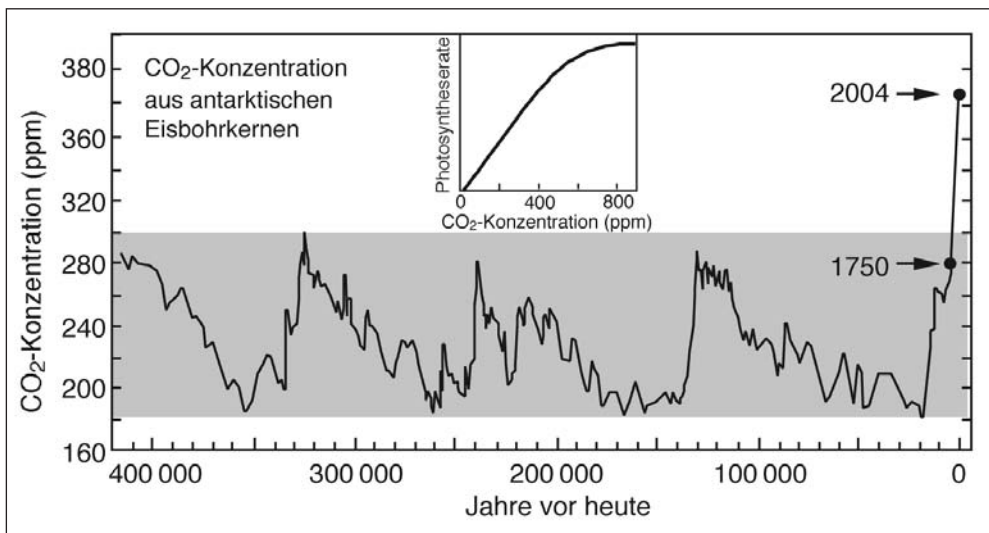


Abb. 1 Verlauf der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre während der letzten 420 000 Jahre, rekonstruiert aus im antarktischen Eisschild eingeschlossenen Luftblasen (PETTIT et al. 1999). Der jüngste Abschnitt stammt aus rezenten Messungen am Mauna-Loa-Observatorium in Hawaii. Als Einschub die CO_2 -Abhängigkeitskurve der Photosynthese.

des Stück Brot, ja selbst der Bodenumus besteht etwa zur Hälfte aus dem Element Kohlenstoff. Dessen Oxidation, egal ob durch Verbrennung oder enzymatischen Umsatz (Atmung), setzt Energie und CO_2 frei. Mit der Energie der solar betriebenen Wasserspaltung vermag die Photosynthese der grünen Pflanzen CO_2 wieder zu reduzieren und den Kreislauf zu schließen. Kann sie dabei auch den fossilen Kohlenstoff aus anthropogener CO_2 -Produktion gleich mitnehmen, ihn allenfalls sogar dauerhaft aus dem Verkehr ziehen?

Diese Idee ist angesichts der enormen C-Umsätze in der Biosphäre und der Tatsache, daß der Photosyntheseprozess der meisten Pflanzen heute noch nicht CO_2 -gesättigt ist, naheliegend. In diesem Beitrag möchte ich zeigen, warum dies weitgehend eine Illusion ist. Ich werde auch zeigen, daß die Wirkung der CO_2 -Erhöhung auf die Biosphäre nicht nur nicht den erwünschten Senkeneffekt hat, sondern durchaus negative Folgen haben kann. Die zwei zentralen Anliegen dieses Beitrages sind es, die Größenordnungen aufzuzeigen, um die es geht, und klar zu machen, daß die CO_2 -Diskussion öffentlich und innerhalb der Wissenschaft darunter leidet, daß Umsätze und Vorräte von Kohlenstoff von allen Beteiligten verwechselt werden, was zu völlig falschen Schlüssen führt.

2. Die Stellung der Biosphäre im globale Kohlenstoffkreislauf

Um den Stellenwert der anthropogenen CO_2 -Freisetzung abschätzen zu können, ist es unerlässlich, sich ein grobes Bild der Verteilung des Kohlenstoffs auf der Erde zu machen. Nicht die Unmengen an Karbonat-Kohlenstoff und fossilem organischem Kohlenstoff in geologischen Schichten sind hier von Bedeutung, sondern der Kohlenstoff des biogenen C-Kreislaufes zwischen Biosphäre, Atmosphäre und Ozean. Der Nettobeitrag des Karbonatkreislaufes (der vor allem über marine Organismen läuft) an den biogenen Kreislauf ist sehr gering, und die Karbonat-C-Pools verändern sich nur in sehr großen geologischen Zeiträumen.

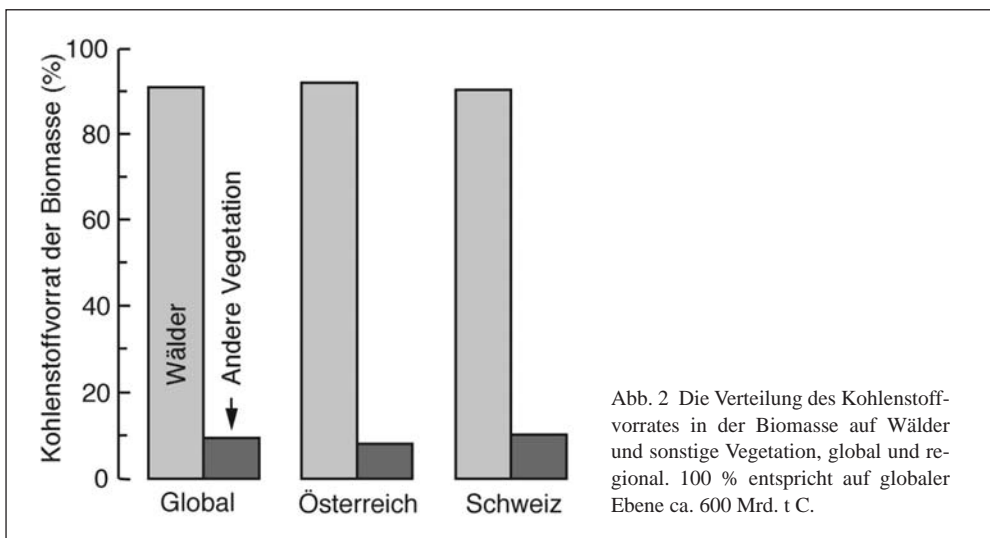
Wenn mobiler Kohlenstoff von einer der drei Sphären in eine andere wechselt, so bestimmt deren Größe die relative Änderung ihres Vorrates. So wie bei einer Mischrechnung zur Wassertemperatur eines Bassins, in das man aus einer vollen Kanne siedendes Wasser gießt, die resultierende Temperatur hauptsächlich von der Größe der Kanne und des Bassins abhängt, bestimmt auch die Größe der C-Pools die relative Wirkung von Verschiebungen (aus der » CO_2 -Kanne« der Industriegesellschaft fließen derzeit jährlich 7 Gt C in dieses System natürlicher C-Pools).

Nach heutigen Schätzungen enthält die Biosphäre knapp 600 Gt C, im Humus der Böden dürften nach Einbezug auch sehr tiefer Bodenschichten (mit einer großen Streuung der Schätzungen) etwa 1600 Gt C gebunden sein, woraus sich für den ökosystemaren Vorrat der Erde am Festland eine Summe von etwa 2200 Gt ergibt, wobei es unwesentlich ist, ob die Zahl nun 200 Gt größer oder kleiner ist, da der allergrößte Teil des Bodenumus sehr alt ist und dieser Teil am aktuellen Kohlenstoffkreislauf kaum teilnimmt. Wichtig ist, daß diese Summe größenordnungsmäßig drei Mal so groß ist wie der Vorrat an CO_2 -Kohlenstoff in der Atmosphäre von etwa 750 Gt, oder anders und noch wichtiger, daß die Vorräte in der Biomasse zusammen mit dem noch beweglichen, frischen Kohlenstoff im Boden (Streuaufgabe, Rohhumus) und der Atmosphäre ähnlich groß sind. Der in einem Lösungsgleichgewicht mit der Atmosphäre stehende Teil des oberflächennahen Ozeanwassers enthält grob etwa 500 Gt C an gelöstem CO_2 und Kohlensäure, etwa ebenso groß schätzt man den Teil junger, oberflächennaher organischer Sedimente im Schelfbereich. Die Tiefsee, in der enorme CO_2 -Vorräte ruhen, nimmt am

Geschehen nur mit großer Verzögerung teil. Physikalische Ausgleichsprozesse zwischen diesem und den oberflächennahen Pools werden aber in geologischen Zeiträumen die derzeitige anthropogene »Exkursion« des CO₂-Pegels in der Atmosphäre wieder auf die Bandbreite der letzten Jahrhunderttausende zurückführen (TOLBERT und PREISS 1994). Dies ist aber in der gegenwärtigen Diskussion nicht von Belang. Die Biomassevorräte im Ozean sind mit 0,2 % der globalen Biomassevorräte vernachlässigbar, auch wenn diese geringe Masse (im wesentlichen einzellige Algen) für 50 % des globalen CO₂-Umsatzes verantwortlich ist. Hier geht es aber zunächst nur darum, wo Kohlenstoff deponiert ist, und dabei spielen diese Organismen keine Rolle. (Quellen zu diesem Abschnitt in SCHLESINGER 1991, GATES 1993, SAMPSON et al. 1993, SMITH et al. 1993, FALKOWSKI et al. 2000.)

Diese wenigen Zahlen machen deutlich, daß die drei rasch »beweglichen« Pools, Biomasse, Atmosphäre, Ozeanwasser, ähnlich groß sind. Atmosphäre und Ozean sind physikalisch aneinander gekoppelt. Daraus ergibt sich, daß von einem Netto-Eintrag von anthropogenem C in den Atmosphären-Ozean-Pool, etwa 60 % in der Atmosphäre und etwa 40 % im Ozean landen. Bei »Ozean« ist stets der in raschem Umsatz befindliche oberflächennahe Ozeanbereich gemeint. »Netto-« deshalb, weil ja ein Teil dieses anthropogenen Kohlenstoffes auch im Biosphärenpool landen kann. Wieviel davon tatsächlich dort landet, bestimmt mit, wie stark die anthropogenen CO₂-Freisetzungen die Atmosphäre verändern.

Der Biomassevorrat an Kohlenstoff befindet sich zu 80–90 % in Bäumen, weshalb die Wälder bei unserer Betrachtung des C-Kreislaufes im Energiekontext eine Schlüsselrolle spielen. Wälder sind einem Management (Feuer, Abholzung, Anpflanzung, Pflege) auch vergleichsweise rasch zugänglich. Dies gilt global und regional (Abb. 2). Der große Bodenumuspool ist nur zu einem geringen Teil beeinflussbar, und die Reaktionen sind sehr langsam. Bodenbearbeitung spielt dabei eine wichtige Rolle, aber auch die Art des Bewuchses. Ersetzt man zum Beispiel natürliche Mischwälder durch Laubwaldplantagen bleiben die Boden-C-Vorräte erhalten, ersetzt man sie durch Kiefernplantagen, sinkt der Bodenumusgehalt im Laufe der Jahre (GUO und GIFFORD 2002). An der Baumbiomasse sind die Stämme und Äste



zu 75–85 % beteiligt, weshalb Überlegungen zu einer anderen als der Stammbiomasse (Blätter, Wurzeln) vergleichsweise wenig Bedeutung haben. Wenn wir über den biosphärischen Biomasse-C-Pool sprechen, so sprechen wir im wesentlichen über Holz.

Ein wesentlicher Grund für die viel größere Bedeutung von C in Holzbiomasse gegenüber Humuskohlenstoff im Hinblick auf ein biotisches C-Management liegt in der Stöchiometrie dieser organischen C-Pools. Im Holz liegt das C:N-Verhältnis bei etwa 50 (30–100), im Bodenumus bei etwa 15 (12–20). Das heißt, es braucht 3–4mal soviel Stickstoff, um Kohlenstoff im Boden anstatt in Holz festzulegen. Der im Bodenumus festgelegte Stickstoff ist den Pflanzen weitgehend entzogen, fehlt also für das Wachstum. Dies mag in Gebieten mit großem anthropogenem N-Eintrag unwichtig sein, für den Großteil der Erde, vor allem die großen Waldgebiete ist N jedoch eine Schlüsselgröße für die Üppigkeit des Waldes und dessen C-Vorrat. Überdies konnte gezeigt werden, daß erhöhter N-Eintrag nicht notwendigerweise zu größerer Humusbildung führt (NADELHOFFER et al. 1999), im Gegenteil, er kann die Dynamik im Ökosystem ankurbeln und sogar zu Humusabbau beitragen.

Die wesentliche Schlußfolgerung aus all diesen Gegebenheiten ist, daß Holz der größte und wichtigste vom Menschen beeinflussbare C-Pool ist und die gesamte Holzmenge auf der Erde heute etwa zwei Drittel soviel C enthält wie die Atmosphäre oder grob 40 % der Menge, die sich insgesamt im Atmosphäre-Ozean-Pool befindet.

3. Die Biosphäre als Energiequelle

Die Zeiten sind leider endgültig vorbei, in denen die Biosphäre den Großteil des menschlichen Energiebedarfes decken konnte. Bis zu Beginn der industriellen Revolution war das so. Trotzdem ist Biomasse nach wie vor ein potentiell wichtiger Energielieferant. Sie deckte Anfang der 90er Jahre etwa 4 % des Primärenergiebedarfs in der EU und 15 % weltweit (SCURLOCK et al. 1993). Auch hier geht es jedoch darum, die richtigen Größenordnungen zu sehen, ansonsten entgleitet die Diskussion leicht auf eine romantische Ebene. Ein guter Orientierungspunkt sind die nationalen forstlichen Holzeinschlag-Statistiken, ein zweiter der ackerbauliche Ertrag an Energie-Biomasse. Diese Potentiale muß man dem derzeitigen Verbrauch an fossilem Kohlenstoff gegenüberstellen.

Betrachtet man also den gesamten, im jährlichen Holzertrag der nationalen Forstwirtschaften gebundenen Kohlenstoff, und nimmt man für einen Augenblick an, daß dieser Kohlenstoff ausschließlich zur Energiegewinnung bereitstünde, so ergibt sich, noch ungeachtet von Brennwertunterschieden und zu lösenden technologischen Problemen, eine ernüchternde Bilanz: In Deutschland könnten damit jährlich etwa 3 %, in der Schweiz, die keine Schwerindustrie hat, rund 7 % des heutigen fossilen Energieverbrauches ersetzt werden (siehe die Zusammenfassung in KÖRNER 1997). In diesem Gedankenexperiment wird so getan, als ob der komplette Jahresholzeinschlag von Deutschland und der Schweiz ausschließlich für Energiesysteme eingesetzt würde, die heute mit fossilen Brennstoffen betrieben werden. Es bliebe also kein Holz mehr für andere Zwecke (Bauholz, Papier etc.) übrig, obwohl das Substitutionspotential relativ klein ist. Unsere Gesellschaft hat sich nahezu vollständig von den nachwachsenden Energiequellen entkoppelt. Lohnt es sich da, das Thema Biomasse und Energie überhaupt weiter zu verfolgen?

Es gibt einige Aspekte, die tatsächlich erwägenswert sind, auch wenn sie allesamt ein Substitutionspotential haben, das weit unter dem liegt, was ohne neue Technologien und Verlust an

Lebensstandard oder volkswirtschaftlichem Potential nur durch vernünftigeren Einsatz der fossilen Energie an Einsparung erreicht werden könnte (Abb. 3). Bekanntlich haben Europäer und US-Amerikaner ein Problem, das dem Rest der Welt fremd ist: Auf ihren Äckern wächst dank moderner Agrartechnologie mehr, als sie konsumieren können oder wofür es zahlungsfähige Kunden gibt. Dies auch, weil Nahrungsmittel anderswo billiger produziert werden. Der Prozeß der Rückführung von Ackerflächen in Wald begann in den USA schon vor 100 Jahren. Wo heute in den Südost-Staaten Kiefernplantagen oder Sekundärwälder stehen, waren einst Tabak- und Baumwollfelder. In der Schweiz zum Beispiel gehen rein statistisch jeden Tag 12 ha Kulturland in die Bodenbedeckungsform Wald über. Trotzdem werden in Europa immer noch zuviel Landwirtschaftsprodukte produziert. EU-weit sind deshalb heute bereits etwa 10 % der Ackerfläche stillgelegt, und gäbe es nicht Subventionen, wären es viel mehr. Könnte man auf diesen Flächen wenigstens Energie-Biomasse erzeugen? Schnellwachsendes Chinaschilf, Rapsöl, Pappelplantagen? So das CO₂-Problem lösen? Die Kyoto-Verpflichtungen einhalten?

Die technischen und ökonomischen Aspekte des »Biomass-farming« wurden in etlichen Arbeiten gründlich evaluiert (z. B. OSTEROTH 1992, BURSCHEL et al. 1993, FLAIG und MOHR 1993, SCURLOCK et al. 1993, KÖRNER 1997, MARLAND und SCHLAMADINGER 1997, SMITH et al. 2000, SPECHT 2004 in diesem Band, KALTSCHMITT 2004 in diesem Band). Realistisch optimistische Hochrechnungen, die auch die ökonomische Machbarkeit berücksichtigen, kommen dabei auf ein Substitutionspotential von 3–5 % des derzeitigen Konsums von fossilen Brennstoffen (Abb. 3), einige besonders optimistische Abschätzungen gehen bis 10 %, wobei diesen Spitzenenerträge zu Grunde liegen, die nur mit hochintensiver Bewirtschaftung möglich sind, was die Umwelt belastet und vom Aufwand her ökonomisch untragbar ist. Obigen Substitutionsmengen auf Äckern liegt bereits eine sehr intensive Biomasse-Produktion auf 10 % der Ackerfläche zu Grunde.

Das heißt, bei maximaler Ausschöpfung der verfügbaren Flächen und ökonomisch vertretbarem Aufwand kann mit Biomasse vom Acker grob das jährliche Holzeinschlagsäquiva-

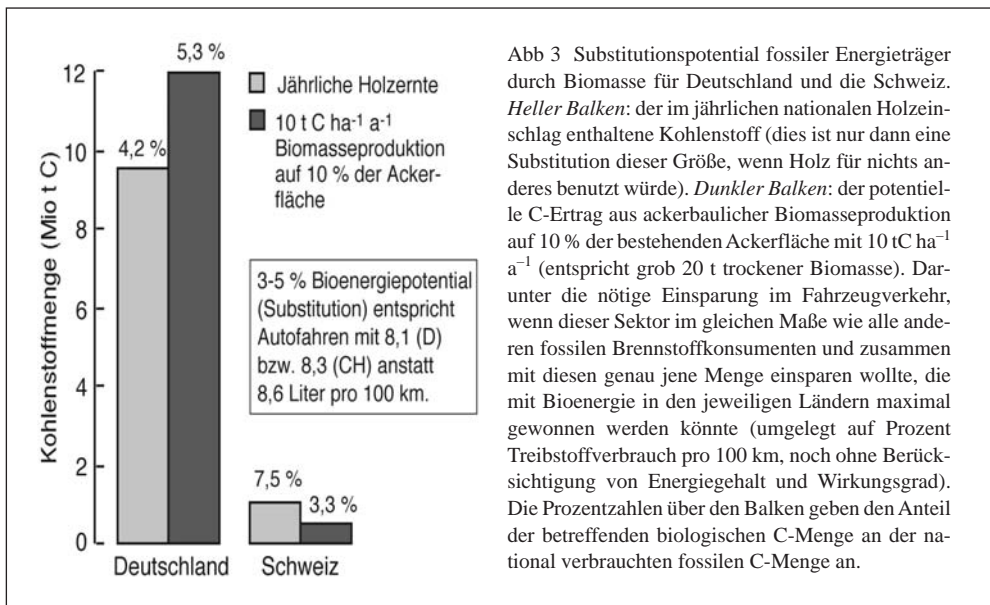


Abb 3 Substitutionspotential fossiler Energieträger durch Biomasse für Deutschland und die Schweiz. *Heller Balken:* der im jährlichen nationalen Holzeinschlag enthaltene Kohlenstoff (dies ist nur dann eine Substitution dieser Größe, wenn Holz für nichts anderes benutzt würde). *Dunkler Balken:* der potentielle C-Ertrag aus ackerbaulicher Biomasseproduktion auf 10 % der bestehenden Ackerfläche mit 10 t C ha⁻¹ a⁻¹ (entspricht grob 20 t trockener Biomasse). Darunter die nötige Einsparung im Fahrzeugverkehr, wenn dieser Sektor im gleichen Maße wie alle anderen fossilen Brennstoffkonsumenten und zusammen mit diesen genau jene Menge einsparen wollte, die mit Bioenergie in den jeweiligen Ländern maximal gewonnen werden könnte (umgelegt auf Prozent Treibstoffverbrauch pro 100 km, noch ohne Berücksichtigung von Energiegehalt und Wirkungsgrad). Die Prozentzahlen über den Balken geben den Anteil der betreffenden biologischen C-Menge an der national verbrauchten fossilen C-Menge an.

lent (siehe oben) an Rohstoff produziert werden. Die Nutzungstechnologie und die Akzeptanz beim Konsumenten sind dabei als gegeben angenommen. Nachdem weder alles Holz noch jeder freie Acker aus unterschiedlichsten Gründen für Biomasseenergie zur Verfügung stehen, darf man von einem realistischen Gesamtpotential von zusätzlich etwa 5 % Substitution ausgehen (grob einer Verdoppelung der bestehenden Bio-Energienutzung). Darüber hinaus können noch aus dem Abfallbereich (Müllverbrennung, Biomüllfermentierung) weitere Beiträge aus Biomasse hinzukommen. In Abbildung 3 sind diesem Substitutions-»Ertrag« äquivalente Einsparungen an fossilen Energieträgern gegenübergestellt, zu deren Realisierung es keiner der viel beschworenen neuen Technologien braucht. Natürlich möchte man sich beides wünschen, mehr Biomassenutzung und reduzierten Konsum an fossilen Brennstoffen. Es muß aber jedem klar sein, daß das nationale Energieproblem und die CO₂-Frage mit Biomasse-Energie nicht in den Griff zu bekommen ist. Dies, ganz abgesehen von der ethischen Frage, statt Nahrung am Acker Treibstoff zu erzeugen.

Im folgenden Abschnitt wird ein interessanter indirekter Effekt der Nutzung fossiler Brennstoffe diskutiert, nämlich die mögliche Förderung des Pflanzenwachstums durch eine CO₂-reichere Luft. Im darauf folgenden Abschnitt wird die Frage gestellt, ob dadurch auch mehr C in der Landschaft gebunden werden kann. Es wird also zunächst die Produktivität und anschließend die viel wichtigere Frage der Vorratsbildung diskutiert.

4. CO₂-Wirkung auf das Pflanzenwachstum

Dieses Thema wurde in zahlreichen Übersichtsartikeln behandelt, so daß ich hier nur ein sehr knappes Resümee geben möchte (vgl. Literatur in KÖRNER 2000, sowie allgemeinverständliche deutschsprachige Aufsätze dazu von KÖRNER 1997, 1999 und in LARCHER 2001, S. 161ff.). Der Ausgangspunkt aller Überlegungen und Experimente hierzu ist die als Einschub in Abbildung 1 gezeigte CO₂-Abhängigkeitskurve der Photosynthese. Das Problem ist nun, daß dieses biochemische Potential in etwa die Bedeutung der Stärke eines Automotors im Stadtverkehr hat. Selten ist die Fahrtgeschwindigkeit davon abhängig. Freie Fahrt, wie etwa gelegentlich auf der Autobahn, hat im übertragenen Sinn die Pflanze nur, wenn alle anderen Wachstumslimitierungen ausgeschaltet sind, etwas, was es in freier Natur praktisch nie, aber auch unter Agrarbedingungen selten gibt. Damit wird die Wirkung einer »CO₂-Düngung« auf Pflanzen von der Verfügbarkeit anderer Ressourcen, wie etwa Mineralstoffverfügbarkeit, bestimmt, und jedes Versuchsergebnis ist danach zu messen, wie realistisch es die Verfügbarkeit dieser anderen Ressourcen abbildet (KÖRNER 1995). Die folgenden Angaben beziehen sich auf die Wirkung von CO₂-Konzentrationserhöhungen von 365 bis 375 ppm auf mindestens 500 ppm, häufig werden in Experimenten Werte um 600 bis 700 ppm eingestellt, aber es ist meist so, daß eine weitere Wachstumssteigerung über 500 ppm nur unter sehr stark gedüngten Bedingungen auftritt, weshalb sich normalerweise diese Unterschiede nur gering auf die Resultate auswirken.

Im Gemüsebau unter Glas oder sonst optimierten Wachstumsbedingungen können die saisonalen Erträge mit verdoppelter CO₂-Konzentration im Schnitt um rund ein Drittel erhöht werden (z. B. WITTEW 1984, ACOCK und ALLEN 1985, POORTER 1993). Im Getreidebau wird durch eine Verdoppelung der vorindustriellen CO₂-Konzentration unter optimalen landwirtschaftlichen Bedingungen der Ertrag im Mittel um etwa 15 % erhöht (Werte von 5–30 % in der Literatur). Diese Stimulierung entstände bei einer CO₂-Konzentration, wie wir sie in 80 bis 100 Jahren haben werden. Dem ist der unglaubliche Ertragszuwachs der Europäischen

Landwirtschaft von 1960 bis 2000 um einen Faktor 2,4 (FAO), hauptsächlich durch Düngung und Pestizideinsatz, gegenüberzustellen. Im selben Zeitraum stieg die CO₂-Konzentration von ca. 335 auf 365 ppm, was allenfalls 5 % (vermutlich deutlich weniger) zu diesem 140%igen Ertragszuwachs beigetragen haben kann.

Vor dem Hintergrund der überragenden Bedeutung des Managements für die landwirtschaftliche Produktion und der langen Zeitspanne, bis solche CO₂-Düngeeffekte quantitativ interessant werden, ist der direkte CO₂-Effekt auf die landwirtschaftliche Produktion also eine vernachlässigbare Größe. Dies um so mehr, wenn man bedenkt, daß CO₂-Erhöhung den Proteingehalt von Getreide senkt (HÖGY et al. 1998) und die experimentell festgestellten CO₂-Effekte zu einem wesentlichen Teil Wasserspareffekte sind, die in dieser Form nicht in eine zukünftige CO₂-reiche Welt transponiert werden können. Unter erhöhtem CO₂ reduziert sich nämlich häufig die Stomataöffnungsweite und damit auch die Transpiration, was zu langsamerer Bodenaustrocknung und verbesserter Nährstoffaufnahme führt. Wenn allerdings die gesamte Vegetation in der Landschaft in einer CO₂-reichen Welt so reagieren würde, würde sich eine niedrigere Luftfeuchtigkeit ergeben, die wiederum die Transpiration erhöhen und den Effekt dämpfen würde. Solche Feedbacks aus der Landschaft fehlen aber logischerweise allen Experimenten. Mit Klimaänderungen verknüpfte Niederschlagsverschiebungen können noch weitgehendere Wirkungen haben und diesen CO₂-induzierten Wasserspareffekt verstärken oder vermindern (BUNCE 2004, MORGAN et al. 2004).

Diese Resultate sind auch für die Produktion von Biomasseenergie relevant. Wird Biomasse aus Pflanzenbeständen bezogen, die auf Basis des natürlichen Ressourcenangebotes wachsen, so sind nach dem heute verfügbaren Wissen die Steigerungen bei CO₂-Anreicherung in der Regel kleiner als bei Getreide, oft nach einer Initialstimulierung null (KÖRNER 2000). Werden Biomasseplantagen auf hohen Ertrag getrimmt, gedüngt, bewässert und in hoher Umtriebsrate immer wieder beerntet (dauernd expandierende Bestände), kann erhöhtes CO₂ eine jährliche Ertragssteigerung wie bei Getreide bewirken. Das konnte an extrem raschwüchsigen Pappelmonokulturen in Oberitalien gezeigt werden (TAYLOR et al. 2001). Dabei ist wieder zu berücksichtigen, daß eine solche Stimulierung nur bei hohem Managementaufwand und an ganz jungen Beständen erreichbar ist. Im Gegensatz dazu pendelten in etwas älteren forstlichen Monokulturen (10–15 Jahre) die anfänglichen Ertragszuwächse durch CO₂-Erhöhung nach 3–4 Jahren auf Null zurück (OREN et al. 2001, NORBY et al. 2001), bzw. beschränkten sie sich auf den Feinwurzel-Umsatz (MATAMALA et al. 2003). Die prognostizierte Verdichtung des Kronendaches wurde bis heute in keinem CO₂-Anreicherungsexperiment festgestellt, und zwar unabhängig von der Wüchsigkeit (z. B. KÖRNER und ARNONE 1992, GIELEN et al. 2003, NORBY et al. 2003), eher trifft das Gegenteil zu, eine geringe Abnahme der Belaubung (HÄTTENSCHWILER et al. 1997a).

Über natürliche Wälder ist fast nichts bekannt, weil es bisher technisch nahezu unmöglich war, ausgewachsene Waldbäume mit einer CO₂-angereicherten Umgebungsluft zu konfrontieren. An natürlichen CO₂-Quellen in der Toskana fanden HÄTTENSCHWILER und Mitarbeiter (1997b) an einem jungen Eichenwald, daß sich der jährliche Dickenzuwachs (Jahresringe) zwischen Bäumen in CO₂-angereicherter und normaler Luft in jungen Jahren deutlich unterscheidet, aber nach etwa 20–25 Jahren der Unterschied gegen Null geht. Ausgewachsene, 35 m hohe, mit einer neuen Methode CO₂-angereicherte Laubbäume bei Basel, zeigten im ersten Jahr eine deutliche Stimulierung, von der aber im dritten Jahr nicht mehr viel übrig blieb (noch laufende, unveröffentlichte Untersuchungen von KÖRNER und Mitarbeiter). Es gibt indirekte Hinweise aus verschiedenen Klimagebieten (Schwankungen der Kohlenhydratreser-

ven), die vermuten lassen, daß Wälder heutzutage ziemlich nahe an der CO_2 -Sättigung operieren (KÖRNER 2003a).

In einem spezifischen Punkt kann erhöhtes CO_2 jedoch über die Walddynamik stark auf die Vorratsbildung von Wäldern einwirken, was im nächsten Abschnitt erklärt wird. Wie die obigen Beispiele zeigen, wurde die CO_2 -Wirkung auf das Pflanzenwachstum jedenfalls früher stark überschätzt, weil man sich nur an der photosynthetischen Wirkung und den Wachstumsreaktionen unter idealen Wachstumsbedingungen orientierte. Wie im Folgenden dargestellt wird, hätte aber selbst eine signifikante Wachstumsstimulierung durch erhöhtes CO_2 keine langfristigen Konsequenzen auf die C-Speicherung in der Biomasse der Biosphäre, weil eben Umsatz nicht gleich Kapital ist.

5. Das CO_2 -Problem mit Kohlenstoffspeicherung in Biomasse lösen?

Wenn also die laufend neu produzierbare Energie-Biomasse nur einen sehr bescheidenen Beitrag an die Einsparung von fossilen Brennstoffen leisten kann und die »Düngung« mit CO_2 nur unter günstigen Bedingungen oder bei jungen Pflanzen die Biomasseproduktion erhöht, bleibt als Alternative die Kohlenstoffspeicherung in Biomasse.

CO_2 wieder einfangen oder gleich an der Quelle wieder binden, ist mengenmäßig ein Problem, das gleich groß ist wie die gesamte Öl, Gas- und Kohleförderung der Welt, das sind derzeit fast 6 Mrd. t Kohlenstoff. Erschwerend ist, daß Öl und Erdgas zwar aus vergleichsweise wenigen »Löchern« in der Erdkruste entnommen werden, das CO_2 -Gas aber aus ca. 1–2 Mrd. »Löchern« (Auspuffen, Kaminen) in die Luft geht. Alle diskutierten technischen Wege, CO_2 zu binden, scheitern nicht an den technischen Möglichkeiten, CO_2 irgendwie festzulegen, sondern an den Milliarden über den Globus verteilten anthropogenen » CO_2 -Quellen«. Ob das eine oder andere kalorische Kraftwerk an der Steilküste sein CO_2 in die Tiefsee pumpen kann, spielt dabei quantitativ eine marginale Rolle. Nachdem die Quellen fossilen CO_2 s diffus sind, muß der Absorber diffus sein. Deshalb kommen letztlich nur die Ökosysteme der Erde als Speicher in Frage. Die CO_2 -Entsorgung ist also nicht nur ein Mengenproblem, sondern ein Problem der Verteilung.

5. 1 Wieviel Kohlenstoff kann die Biosphäre zusätzlich aufnehmen und dauerhaft speichern?

Es gibt grundsätzlich drei Wege um Kohlenstoff in der Biosphäre festzulegen:

- Mehr Biomasse-Kohlenstoff pro Flächeneinheit festlegen;
- die Fläche mit großem Biomassevorrat zu vergrößern;
- mehr Kohlenstoff im Bodenumus speichern.

Möchte man Kohlenstoff in Wäldern speichern, sind noch zwei, an sich triviale Punkte wichtig:

- Der Kohlenstoff *muß dort bleiben*, darf also nicht geerntet werden oder einem Feuer zum Opfer fallen.
- Man kann auf einer gegebenen Fläche *nur einmal* Wald »installieren«.

Die Kohlenstoffmenge, die man in einem Wald speichern kann, ist begrenzt. Am meisten Biomasse-Kohlenstoff enthalten reife Wälder. Bis so ein C-Speicher »voll« ist, dauert es 200–300 Jahre, aber 80–90 % des Speichervolumens können unter günstigen Bedingungen schon in 100 Jahren aufgebaut werden. Ein Altbestand kann bei einem Biomassevorrat von über 1000 t ha⁻¹ Trockensubstanz somit einen C-Vorrat von bis zu 500 t ha⁻¹ erreichen. Je länger die Ernte hinausgezögert wird um so größer der Vorrat. Die wirtschaftsbedingte Unternutzung von Wäldern hat in Westeuropa in den letzten Jahrzehnten die Vorräte stark ansteigen lassen.

Fällt man einen Altbestand, so braucht eine Aufforstung mindestens 100 Jahre, um wieder den Ausgangswert zu erreichen. Der jährliche Zuwachs einer solchen Aufforstung ist keineswegs ein Netto-Gewinn an C, sondern nur eine laufende Verminderung des Verlustes durch die Fällung. Es ist deshalb nicht ganz korrekt, eine Aufforstung auf ehemaligem Waldboden als C-Sequestrierung zu bezeichnen, es werden immer nur »alte Schulden« zurückgezahlt – was ja in Ordnung ist. Wollte man Biomasse-C-Speicherung erfolgreich betreiben, gibt es aber keine wirksamere Möglichkeit als den Schutz von biomassereichen Altbeständen oder von Beständen, die sich in einem *Steady-state*-Umbau bei hohem Vorrat befinden, wie etwa natürliche Urwälder, tropische im besonderen (MARLAND und MARLAND 1992). Heute werden weltweit jährlich etwa 1,5 Mrd. t C durch Naturwaldrodung freigesetzt! Hier werden quasi alte C-Bestände wie Bergwerke ausgeräumt, ohne daß in den Aufbau dieser Vorräte irgend etwas investiert wurde. Ganz im Gegensatz zu Plantagen, wo zwischen Pflanzung und Ernte Kapital gebunden ist, weshalb die Primärwaldnutzung ökonomisch so attraktiv ist.

Leider ist die Bedingung der dauernden Speicherung in einem Baum nicht einhaltbar, da Bäume bekanntlich alt werden und immer wieder durch jüngere ersetzt werden. Damit ist klar, daß die Kohlenstoffbindung durch Wälder nur über sehr große Flächen berechnet werden darf, Flächen, in denen ein gewisses Gleichgewicht zwischen Geburt und Tod herrscht und sich ein mittlerer Vorrat einstellt. Würde man innerhalb von 10 Jahren alle verfügbaren Waldflächen Deutschlands aufforsten, würden diese Flächen zusammen alt und zu ähnlicher Zeit reif für eine Nutzung, was zu einer entsprechenden C-Freisetzungswelle in 80–100 Jahren führen würde, quasi eine Hypothek auf die Zukunft.

Somit ist klar, daß der Spielraum für eine nachhaltige C-Speicherung im Wald nicht sehr groß ist. Eine extensive Nutzung (Aufbau hoher Vorräte), der Schutz von Altbeständen und die Wiederbewaldung von entwaldeten Gebieten können jedoch das Biosphärenkapital an Kohlenstoff erhöhen. Leider ist zur Zeit die Biomassebilanz negativ. Globale Kohlenstoffbilanzen lassen vermuten, daß derzeit jährlich netto etwa 1–2 Mrd. t Biomassenkohlenstoff irgendwo neu festgelegt werden, womit ein Teil der Rodungen kompensiert wird. Da ein gewichtiger Teil der Wiederbewaldung in der temperaten Zone liegt, ist absehbar, daß dieser Prozeß einer flächenmäßigen Sättigung zustrebt. In einem kürzlich erschienenen Syntheseband über tropische Wälder (MAHLI und PHILLIPS 2004) weisen die Herausgeber darauf hin, daß der biotische Kohlenstoffvorrat im gesamten Amazonasbecken (120 Mrd. t Biomasse plus Humus) von etwa 200 Mrd. t C dem Kohlenstoff im Öl/Kohle/Erdgas-Verbrauch von 20 Jahren gemäß den plausibelsten Hochrechnungen entspricht. Selbst eine 25%ige Zunahme der Biomasse (also 30 Mrd. t C) in diesem größten tropischen Urwaldgebiet würde nach diesen Autoren die weitere CO₂-Anreicherung in der Atmosphäre nur um 4–5 Jahre verzögern.

5.2 Der Vorrat, nicht die Geschwindigkeit des C-Durchsatzes sind von Bedeutung

Der häufigste Fehler bei Abschätzungen des Ausgleichs von CO₂-Freisetzung durch Biomasse, also im wesentlichen durch Wälder, liegt in der Verwechslung von Vorrat und Zuwachs. Entscheidend ist logischerweise nur der Vorrat. Wie rasch ein Baum wächst, spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Raschwüchsige Bäume sterben in der Regel auch früher, der Kohlenstoff wird rascher rezykliert. Raschwüchsige Wälder speichern in der Regel im reifen Zustand auch weniger Kohlenstoff als langsamwüchsige.

Wenn also zum Beispiel ein Plantagenwald unter erhöhtem CO₂-Angebot etwas rascher wächst, erreicht er früher seine Erntemasse, der durchschnittliche Vorrat in der Landschaft wird nicht verändert. Es verkürzt sich einfach das Intervall zwischen Pflanzen und Fällen (Abb. 4). Würde das Intervall beibehalten, würde bei der Ernte mehr Holz anfallen und der durchschnittliche Vorrat in der Landschaft erhöht. Nachhaltig betrieben, werden in einem solchen Plantagenbetrieb immer alle Altersklassen von Parzellen gleich vertreten sein, so daß der Durchschnitt über alle Flächen den Vorrat bestimmt. Für die Biomassenutzung ist eine CO₂-Stimulierung des Wachstums zwar ein Vorteil, aber er wird auf Dauer erkauft mit vermehrter Beanspruchung von Bodenressourcen. Eine erhöhte Rotation hat aber keine Erhöhung des Vorrates zur Folge.

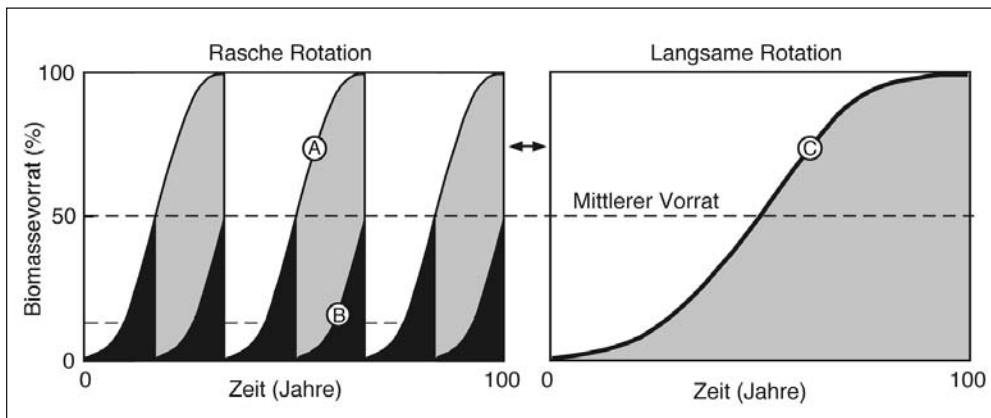


Abb. 4 Wachstumszyklen in gleichaltrigen Baumbeständen. Bei gleicher Holzdichte und maximaler Biomasse hat die Wachstumsgeschwindigkeit (Rotation) keinen Einfluß auf den mittleren Bestandesvorrat (A gegenüber C). Bei kurzer Rotation auf niedrigerem Biomasseniveau (B) speichern raschwüchsige Bestände (z. B. Biomasseplantagen) sogar weniger Kohlenstoff.

Kurzfristig spielt es keine Rolle, ob zusätzlicher Kohlenstoff im Humus oder in der Biomasse gespeichert wird. Die Speicherung im Humus ist aber dauerhafter und, zumindest theoretisch, weniger begrenzt als die Speicherung in Biomasse. Die Humifizierung geht aber wesentlich langsamer als die Biomasseproduktion, so langsam, daß sie sich einer direkten Messung entzieht. Man kann aber durch Vergleiche etwa unterschiedlicher Landnutzungsformen die Geschwindigkeit in den Verschiebungen von C-Vorräten rekonstruieren. Rechnet man alternativ, die 1,5 Mrd. t »missing carbon« auf die grob 100 Mill. km² Landfläche, die von Ve-

getation bedeckt sind, um, und nimmt man an, dieser Kohlenstoff wäre ausschließlich im Humuspool gelandet, so gäbe das jährlich 15 g C m^{-2} . Diese Zahl muß vor dem Hintergrund eines durchschnittlichen Kohlenstoffvorrates im Bodenhumus von $15\text{--}20 \text{ kg m}^{-2}$ gesehen werden (Wälder und Grasländer sind in der Beziehung im Mittel ähnlich). Bei konstantem Einbau dieser Menge C würde es 1000 Jahre dauern, bis sich der Bodenvorrat verdoppelt hätte. Dabei würden enorme Mengen an Stickstoff und anderen Bodenmineralen mit gebunden und damit den Pflanzen entzogen. So eine C-Festlegung ist also mit großer Wahrscheinlichkeit nicht »sustainable« und wirkt negativ auf das Wachstum zurück.

Die Frage der CO_2 -Wirkung auf Wälder muß vor diesem Hintergrund diskutiert werden. In jenen Zeiträumen, die für das anthropogene CO_2 -Problem relevant sind (etwa 100–200 Jahre), ist der Biomassevorrat viel stärker einflußbar als der Vorrat im Boden. Um einen Vorratseffekt zu erzielen, darf sich aber nur das Wachstum erhöhen, nicht jedoch die Mortalität, bzw. es darf die Lebensdauer nicht sinken, was beides schwer vorstellbar ist. Würde die CO_2 -Wirkung die ganze Baumentwicklung beschleunigen, wäre die Folge eines rascheren Wachstums in der Jugendphase zunichte gemacht. Es würde lediglich die Rotation erhöht. Es ist klar, daß uns solche Informationen zur CO_2 -Wirkung experimentell unzugänglich sind und bleiben, da der Lebenszyklus von Bäumen zu lange dauert. Somit bleibt als einziger experimenteller Anhaltspunkt, das Wachstum in einer bestimmten Lebensphase einige Jahre unter CO_2 -Einfluß zu studieren und aus der festgestellten Dynamik die Entwicklungsgeschwindigkeit abzuschätzen.

5.3 CO_2 -Erhöhung kann Wälder dynamisieren und damit den Kohlenstoffvorrat vermindern

Zum Abschluß Beispiele, die illustrieren, wie erhöhtes CO_2 -Angebot durch eine Kombination von Wachstums- und Biodiversitätseffekten die Kohlenstoffvorräte sogar reduzieren kann. Es gibt eine Bedingung, unter der eine CO_2 -Erhöhung fast immer das Wachstum beschleunigt, nämlich Lichtmangel. Je geringer das Lichtangebot, desto wirksamer ist eine CO_2 -Erhöhung, da die Lichtausnützung der Photosynthese durch Verschiebung des sogenannten Lichtkompensationspunktes steigt. Dies gilt allerdings nur für die relative Wachstumssteigerung, nicht für den absoluten Zuwachs.

In vielen Wäldern spielen Lianen eine wichtige Rolle für die Walddynamik. Lianen müssen mit möglichst geringen Investitionen den Weg aus dem Dämmerlicht in die Sonne finden. Einmal am Licht werden sie zu Konkurrenten der betroffenen Bäume. In den humiden Tropen sind Lianen die wichtigsten Motoren für die Walddynamik. Sie bestimmen die Lebensdauer von Bäumen und damit die Größe des Kohlenstoffspeichers. Aber auch in der temperaten Zone können Lianen, wie etwa in Mitteleuropa die Waldrebe (*Clematis*) oder der Efeu (*Hedera*), Bäume in Bedrängnis bringen, wenn sie Kronen überwuchern. Mangels scharfer winterlicher Fröste ist im atlantischen Klima der immergrüne Efeu heute bereits vielerorts im obersten Kronenraum aktiv. An Efeu und an tropischen Lianen wurde inzwischen bestätigt, daß CO_2 -Erhöhung im tiefen Waldschatten eine enorm fördernde Wirkung hat.

Sowohl in einem dicht bewachsenen Modellökosystem (KÖRNER 2003b) als auch an Sämlingen im Unterwuchs eines Waldes (HÄTTENSCHWILER und KÖRNER 2003) sowie an etablierten Pflanzen in freier Natur (CUENI et al., unveröffentlicht) wurde eine massive Förderung des Efeus durch CO_2 -Erhöhung dokumentiert (Wachstumssteigerungen bis 50 %; Abb. 5). An tropischen Lianen wurde auch die Wirkung der derzeitigen CO_2 -Konzentration in der Atmo-

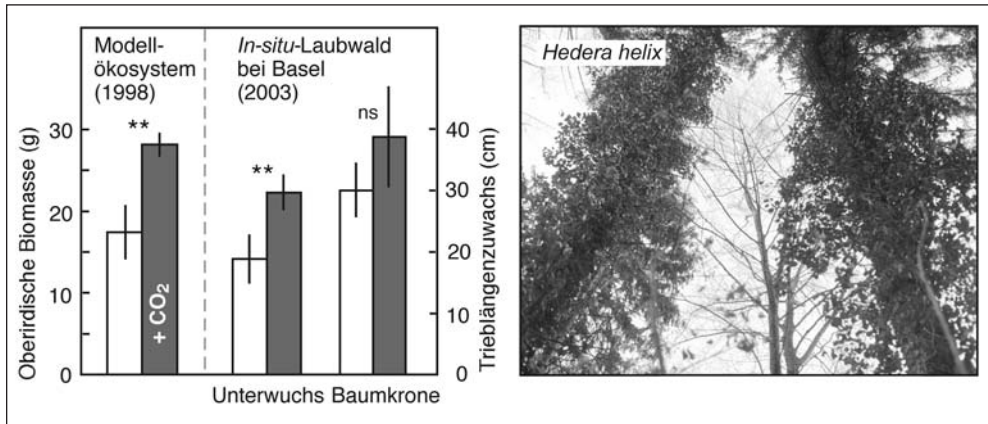


Abb. 5 Die immergrüne Liane Efeu wird so wie tropische Lianen im tiefen Waldschatten stark durch CO₂-Erhöhung gefördert. Dies kann die Walddynamik erhöhen, die Lebensdauer von Bäumen verkürzen und damit den C-Vorrat im Wald reduzieren. Daten von CO₂-Anreicherungs-Experimenten aus KÖRNER 2003b, CUENI et al., unveröffl.

sphäre studiert, indem Kontrollpflanzen bei präindustrieller CO₂-Konzentration von 280 ppm solchen unter 420 ppm gegenübergestellt wurden. Im Schwachlicht wurden dabei in diesem CO₂-Bereich Wachstumssteigerungen von über 100 % festgestellt (GRANADOS und KÖRNER 2002). Wir dürfen annehmen, daß solche Wirkungen von CO₂ bereits das aktuelle Wachstum beeinflussen. Die CO₂-Wirkung im Schatten ist natürlich nicht auf Lianen beschränkt. Auch Baumsämlinge werden stark gefördert (HÄTTENSCHWILER und KÖRNER 2000, WÜRTH et al. 1998). In vollem Sonnenlicht auf Naturboden zeigen junge Bäume in den Tropen hingegen keinen CO₂-Effekt (WINTER et al. 2000), düngt man sie jedoch, gibt es einen positiven CO₂-Effekt (WINTER et al. 2001).

Für die Tropen gibt es Hinweise, daß das Lianenwachstum in der Tat in den letzten Jahrzehnten besonders stimuliert war (PHILLIPS et al. 2002). Langfristig sollte das die Mortalität von Bäumen im Tropenwald erhöhen und die »gap-dynamic« erhöhen. Eine solche Entwicklung würde das Feld für raschwüchsige Baumarten öffnen, Baumarten also, mit geringer Holzdichte und kurzer Lebensdauer. Ein höherer Anteil solcher Baumarten im Bestand senkt den Biomassevorrat pro Landflächeneinheit.

CO₂-Erhöhung, ausgelöst durch den Energiekonsum, vornehmlich in den industrialisierten Ländern, kann somit weit ab der Quellen Biodiversitätseffekte auslösen, die entgegen klassischen Vorstellungen nicht zu mehr Biomasse, sondern zu geringeren Vorräten führen können. Somit ist der Umgang mit Energie in unseren Breiten ein Risikofaktor der auch in entlegenen Weltgegenden eine Dynamisierung der Vegetation auslösen kann, die einerseits als positives Feedback auf die CO₂-Konzentration in der Luft zurückwirkt, andererseits aber einen Umbau in der Vegetation auslösen kann, dem in diesem Tempo die Evolution nicht folgen kann. Die CO₂-Anreicherung in der Atmosphäre birgt also neben dem Klimarisiko auch ein Biodiversitätsrisiko mit Nebeneffekten, wie der geschilderten Möglichkeit einer Walddynamisierung.

6. Schlußbemerkungen

Energiekonsum und Waldverbrauch der Menschheit setzen derzeit jährlich eine Menge von CO₂ in die Luft, die 1 % des Vorrates in der Atmosphäre entspricht. Knapp die Hälfte verbleibt dort und beeinflusst Klima und Vegetation. Die Vegetation ist doppelt betroffen, da einerseits CO₂ direkt den Stoffwechsel beeinflusst und andererseits Klimaänderungen auch auf die Pflanzen wirken. Ein Ersatz von fossilen Energieträgern durch Biomasse ist zwar möglich, die in den Industrieländern zusätzlich ersetzbaren Mengen dürften aber bei realistischen Annahmen 5 % nicht übersteigen, und der Aufwand selbst dafür ist beträchtlich. Es ist nicht damit zu rechnen, daß die aus optimierten Gewächshauskulturen bekannte Düngerwirkung von CO₂ die Biomasseproduktion im Freiland sowie in natürlicher Vegetation nennenswert erhöhen wird, da andere Ressourcen für das Wachstum nicht langfristig vermehrt zur Verfügung stehen. Die Ausdehnung biomassereicher Landflächen kann jedoch als C-Speicher den raschen CO₂-Anstieg dämpfen, wobei wiederum keine großen Hoffnungen auf eine allfällige Düngewirkung des erhöhten CO₂-Gehaltes auf die Vegetation zu setzen sind, sondern die Chancen hauptsächlich im Management der Landschaft liegen. Noch immer sind 42 % des gesamten Waldvorrates der Erde in den Tropen, riesige C-Vorräte finden sich im borealen Wald, und die Bedeutung der temperaten Wälder steigt wieder.

Neben einer Reduktion des Verbrauches von fossiler Energie ist die mit Abstand wirksamste Methode die Erhaltung von alten Waldbeständen. Keine Aufforstung kann in den folgenden kritischen Jahrzehnten nur annähernd wieder jene C-Mengen binden, die durch die jüngste und laufende Primärwaldzerstörung freigesetzt wurden und werden. Dies ist eine weitverbreitete Illusion. Der wirksamste Beitrag der Biologie zum globalen Energie- und CO₂-Problem wäre ein totaler Umbau der Waldnutzung auf nachhaltige Plantagenwirtschaft und die internationale Ächtung jedes Raubbaues an den natürlich gewachsenen C-Depots in der Landschaft. Vermutlich ist so ein Umbau nicht über internationale Verträge, sondern nur über den Markt möglich. Konsumenten müssen eine Garantie haben, daß die gekauften Produkte, sei dies die Tageszeitung oder ein Bettgestell, aus nachhaltig betriebener Forstwirtschaft stammen und andere, nicht-zertifizierte Produkte verweigern. Wenn nur wenige Prozent der Konsumenten sich so verhalten, kann das große Auswirkungen haben, größere als Rapsöl oder Chinaschilf auf unseren Äckern. Leider wird ein großer Teil der Wälder im Zuge ihrer Zerstörung nicht einmal genutzt, sondern nur abgebrannt, um Land zu gewinnen. Dagegen kann nur internationaler Druck etwas bewirken.

In der Diskussion um den Stellenwert der Bioenergie und anderer Formen des Einsatzes biologischer Mittel zur Dämpfung des CO₂-Anstieges in der Atmosphäre werden zu wenig die Größenordnungen beachtet, um die es geht. Viele gut gemeinte Vorschläge verlieren ihre Bedeutung, wenn man sie im Lichte der tatsächlich substituierbaren und speicherbaren Mengen an biologisch gebundenem Kohlenstoff betrachtet. Die Hoffnung auf derartige »grüne« Reparationswirkungen lenkt oft vom Kernproblem, dem Energiekonsum für fragwürdige Zwecke oder in fragwürdigem Ausmaß, ab.

Literatur

ACOCK, B., and ALLEN, L. H. Jr.: Crop responses to elevated carbon dioxide concentrations. In: STRAIN, B. R., and CURE, J. D. (Eds.): Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation. US Dept. of Energy 238, 53–97. Washington: US Dept of Energy 1985

- BUNCE, J. A.: Carbon dioxide effects on stomatal responses to the environment and water use by crops under field conditions. *Oecologia* (2004, in press)
- BURSCHEL, P., KÜRSTEN, E., LARSON, B. C., and WEBER, M.: Present role of German forests and forestry in the national carbon budget and options to its increase. *Water, Air and Pollution* 70, 325–340 (1993)
- FALKOWSKI, P., SCHOLES, R. J., BOYLE, E., CANADELL, J., CANFIELD, D., ELSER, J., GRUBER, N., HIBBARD, K., HÖGBERG, P., LINDER, S., MACKENZIE, F. T., MOORE, III B., PEDERSEN, T., ROSENTHAL, Y., SEITZINGER, S., SMETACEK, V., and STEFFEN, W.: The global carbon cycle: a test of our knowledge of Earth as a system. *Science* 290, 291–296 (2000)
- FLAIG, H., und MOHR, H. (Eds.): *Energie aus Biomasse – eine Chance für die Landwirtschaft*. Berlin: Springer 1993
- GATES, D. M.: *Climate Change and Its Biological Consequences*. Sunderland/MA, USA: Sinauer Assoc. Inc. 1993
- GIELEN, B., LIBERLOO, M., BOGAERT, J., CALFAPIETRA, C., DE ANGELIS, P., MIGLIETTA, F., SCARASCIA-MUGNOZZA, G., and CEULEMANS, R.: Three years of free-air CO₂ enrichment (POPFACE) only slightly affect profiles of light and leaf characteristics in closed canopies of *Populus*. *Glob. Change Biol.* 9, 1022–1037 (2003)
- GRANADOS, J., and KÖRNER, C.: In deep shade, elevated CO₂ increases the vigor of tropical climbing plants. *Glob. Change Biol.* 8, 1109–1117 (2002)
- GUO, L. B., and GIFFORD, R. M.: Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Glob. Change Biol.* 8, 345–360 (2002)
- HÄTTENSWILER, S., MIGLIETTA, F., RASCHI, A., and KÖRNER, C.: Morphological adjustments of mature *Quercus ilex* trees to elevated CO₂. *Acta Oecologica* 1997, 361–365 (1997a)
- HÄTTENSWILER, S., MIGLIETTA, F., RASCHI, A., and KÖRNER, C.: Thirty years of in situ tree growth under elevated CO₂: a model for future forest responses? *Glob. Change Biology* 3, 436–471 (1997b)
- HÄTTENSWILER, S., and KÖRNER, C.: Tree seedling responses to in situ CO₂-enrichment differ among species and depend on understorey light availability. *Glob. Change Biol.* 6, 213–226 (2000)
- HÄTTENSWILER, S., and KÖRNER, C.: Does elevated CO₂ facilitate naturalization of the non-indigenous *Prunus laurocerasus* in Swiss temperate forests? *Funct. Ecol.* 17, 778–785 (2003)
- HÖGY, P., FANGMEIER, A., und JÄGER, H. J.: Effekte erhöhter CO₂-Konzentrationen und Stickstoffversorgung auf Kornertrag und Kornqualität von Sommerweizen (*Triticum aestivum* cv. Minaret). *Verhandl. Ges. Oekol.* 28, 381–388 (1998)
- KALTSCHMITT, M.: Energetische Nutzung von Biomasse. Technik, Potentiale, Kosten, Umweltaspekte. *Nova Acta Leopoldina NF Bd. 91, Nr. 339*, 305–329 (2004)
- KÖRNER, C.: Towards a better experimental basis for upscaling plant responses to elevated CO₂ and climate warming. *Plant Cell Environ.* 18, 1101–1110 (1995)
- KÖRNER, C.: Die biotische Komponente im Energiehaushalt: Lokale und globale Aspekte. *Verhandl. Ges. Dt. Naturforscher u. Ärzte* 119, 97–123 (1997)
- KÖRNER, C.: Biologische Folgen der CO₂-Erhöhung. *Biol. in uns. Zeit* 29, 353–363 (1999)
- KÖRNER, C.: Biosphere responses to CO₂ enrichment. *Ecol. Appl.* 10, 1590–1619 (2000)
- KÖRNER, C.: Carbon limitation in trees. *J. Ecol.* 91, 4–17 (2003a)
- KÖRNER, C.: Ecological impacts of atmospheric CO₂ enrichment on terrestrial ecosystems. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 361, 2023–2041 (2003b)
- KÖRNER, C., and ARNONE, J. A. III: Responses to elevated carbon dioxide in artificial tropical ecosystems. *Science* 257, 1672–1675 (1992)
- LARCHER, W.: *Ökophysiologie der Pflanzen*. Stuttgart: Ulmer 2001
- MALHI, Y., and PHILLIPS, O. L.: Tropical forests and global atmospheric change: a synthesis. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 359, 549–555 (2004)
- MARLAND, G., and MARLAND, S.: Should we store carbon in trees? *Water, Air, Soil Pollution* 64, 181–195 (1992)
- MARLAND, G., and SCHLAMADINGER, B.: Forests for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis. *Biomass Bioenergy* 13, 389–397 (1997)
- MATAMALA, R., GONZALEZ-MELER, M. A., JASTROW, J. D., NORBY, R. J., and SCHLESINGER, W. H.: Impacts of fine root turnover on forest NPP and soil C sequestration potential. *Science* 302, 1385–1387 (2003)
- MORGAN, J. A., PATAKI, D. E., KÖRNER, C., CLARK, H., DEL GROSSO, S. J., GRÜNZWEIG, J. M., NEWTON, P., NIKLAUS, P. A., NIPPERT, J. B., NOWAK, R. S., PARTON, W. J., and SHAW, M. R.: The role of water relations in grassland and desert ecosystem responses to rising atmospheric CO₂. *Oecologia* 140, 11–25 (2004)
- NADELHOFFER, K. J., EMMETT, B. A., GUNDERSEN, P., KJONAAS, O. J., KOOPMANS, C. J., SCHLEPPI, P., TIETEMA, A., and WRIGHT, R. F.: Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature* 398, 145–148 (1999)
- NORBY, R. J., TODD, D. E., FULTS, J., and JOHNSON, D. W.: Allometric determination of tree growth in a CO₂-enriched sweetgum stand. *New Phytol.* 150, 477–487 (2001)
- NORBY, R. J., SHOLTIS, J. D., GUNDERSON, C. A., and JAWDY, S. S.: Leaf dynamics of a deciduous forest canopy: no response to elevated CO₂. *Oecologia* 136, 574–584 (2003)
- OESTERHELT, D.: Photosynthese und andere Energieumwandlungsprozesse in Zellen. *Nova Acta Leopoldina NF Bd. 91, Nr. 339*, 17–39 (2004)

- OREN, R., ELLSWORTH, D. S., JOHNSEN, K. H., PHILLIPS, N., EWERS, B. E., MAIER, C., SCHÄFER, K. V. R., MCCARTHY, H., HENDREY, G., McNULTY, S. G., and KATUL, G. G.: Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO₂-enriched atmosphere. *Nature* 411, 469–472 (2001)
- OSTEROTH, D.: Biomasse. Rückkehr zum ökologischen Gleichgewicht. Berlin: Springer 1992
- PETTIT, J. R., RAYNAUD, D., BARKOV, N. I., BARNOLA, J. M., BASILE, I., BENDER, M., CHAPPELLAZ, J., DAVIS, M., DELAYGUE, G., DELMOTTE, M., KOTLYAKOV, V. M., LEGRAND, M., LIPENKOV, V. Y., LORIUS, C., PEPIN, L., RITZ, C., SALTZMAN, E., and STIEVENARD, M.: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429–436 (1999)
- PHILLIPS, O. L., VASQUEZ MARTINEZ, R., ARROYO L., BAKER, T. R., KILLEEN, T., LEWIS, S. L., MALHI, Y., MONTEAGUDO MENDOZA A., NEILL D., NUNEZ VARGAS, P., ALEXIADES, M., CERON, C., DI FIORE, A., ERWIN, T., JARDIM, A., PALACIOS, W., SALDIAS, M., and VINCENTI, B.: Increasing dominance of large lianas in Amazonian forests. *Nature* 418, 770–774 (2002)
- POORTER, H.: Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. *Vegetatio* 104/105, 77–97 (1993)
- SAMPSON, R. N., et al.: Workshop summary statement: Terrestrial biosphere carbon fluxes – quantification of sinks and sources of CO₂. *Water, Air, Soil Pollution* 70, 3–15 (1993)
- SCHLESINGER, W. H.: Biogeochemistry. An Analysis of Global Change. San Diego: Academic Press 1991
- SMITH, T. M., CRAMER, W. P., DIXON, R. K., LEEMANS, R., NEILSON, R. P., and SOLOMON, A. M.: The global terrestrial carbon cycle. *Water, Air, Soil Pollution* 70, 19–37 (1993)
- SMITH, P., POWLSON, D. S., SMITH, J. U., FALLOON, P., and COLEMAN, K.: Meeting Europe's climate change commitments: quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture. *Glob. Change Biol.* 6, 525–539 (2000)
- SCURLOCK, J. M. O., HALL, D. O., HOUSE, J. I., and HOWES, R.: Utilising biomass crops as an energy source: A European perspective. *Water, Air, Soil Pollution* 70, 499–518 (1993)
- SPECHT, M., ZUBERBÜHLER, U., und BANDI, A.: Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen – Potentiale, Herstellung, Perspektiven. *Nova Acta Leopoldina NF Bd. 91, Nr. 339*, 239–263 (2004)
- TAYLOR, G., CEULEMANS, R., FERRIS, R., GARDNER, S. D. L., and SHAO, B. Y.: Increased leaf area expansion of hybrid poplar in elevated CO₂: From controlled environments to open-top chambers and to FACE. *Environ. Pollut.* 115, 463–472 (2001)
- TOLBERT, N. E., and PREISS, J.: Regulation of Atmospheric CO₂ and O₂ by Photosynthetic Carbon Metabolism. New York: Oxford University Press 1994
- WELTE, D. H.: Fossile Kohlenwasserstoffe – Wirklichkeit und Wahrnehmung heute und morgen. *Nova Acta Leopoldina NF Bd. 91, Nr. 339*, 265–285 (2004)
- WINTER, K., GARCIA, M., GOTTSBERGER, R., and POPP, M.: Marked growth response of communities of two tropical tree species to elevated CO₂ when soil nutrient limitation is removed. *Flora* 196, 47–58 (2001)
- WINTER, K., GARCIA, M., LOVELOCK, C. E., GOTTSBERGER, R., and POPP, M.: Responses of model communities of two tropical tree species to elevated atmospheric CO₂: growth on unfertilized soil. *Flora* 195, 289–302 (2000)
- WITTWER, S. H.: Carbon dioxide levels in the biosphere: effects on plant productivity. *CRC– Critical Reviews in Plant Science* 2(3), 171–198 (1984)
- WÜRTH, M. K. R., WINTER, K., and KÖRNER, C.: Leaf carbohydrate responses to CO₂–enrichment at the top of a tropical forest. *Oecologia* 116, 18–25 (1998)

Prof. Dr. Christian KÖRNER
Universität Basel
Botanisches Institut
Schönbeinstrasse 6
4056 Basel
Schweiz
Tel.: +41 61 2673510
Fax: +41 61 2673504
E-Mail: ch.koerner@unibas.ch

Energetische Nutzung von Biomasse Technik, Potentiale, Kosten, Umweltaspekte

Martin KALTSCHMITT (Leipzig)

Mit 12 Abbildungen und 2 Tabellen



Zusammenfassung

Erneuerbare Energien und insbesondere Biomasse gelten als ein Hoffnungsträger, wenn es um eine zukünftig umwelt- und klimaverträglichere Energieversorgung geht. Deshalb werden sie auch mit beachtlichen Mitteln der öffentlichen Hand unterstützt. Im Folgenden werden daher die Technik, die Potentiale und deren Nutzung sowie ausgewählte ökonomische und ökologische Aspekte einer Energiegewinnung aus Biomasse diskutiert. Dabei liegt der Schwerpunkt auf den Optionen einer Strombereitstellung. Unter anderem zeigt sich, daß insbesondere eine Strombereitstellung über Dampfprozesse auf der Basis biogener Festbrennstoffe unter den in Deutschland vorhandenen Alternativen eine vielversprechende Option ist.

Abstract

Renewable sources of energy and especially biomass seem to be very promising for a more environmentally and climatic sound energy supply system in the future. This is the reason why they are supported quite substantially by the public purse. Aim of this paper is it therefore to discuss the technology, the potentials and selected economic and environmental effects of an energy provision from biomass. A clear focus is put on the possibilities for the provision of electrical energy. Among other aspects this paper shows that especially an electricity generation *via* steam cycles based on solid bio-fuels is under the frame conditions valid in Germany the most promising option compared to the given alternatives.

1. Einleitung

Die energie- und umweltpolitischen Diskussionen in Deutschland werden seit mehr als drei Jahrzehnten durch die energiebedingten Umweltauswirkungen maßgeblich mitbestimmt. Beispielsweise fokussiert sich die öffentliche Diskussion derzeit u. a. auf die möglichen Folgen des anthropogenen Treibhauseffekts. Zur Vermeidung oder zumindest zur Reduktion derartiger energiebedingter Umweltauswirkungen gelten von der Vielzahl der Möglichkeiten, die zu einer zukünftig umwelt- und klimaverträglicheren Energieversorgung beitragen können, regenerative Energien und hier insbesondere die Biomasse oft als »Hoffnungsträger«, dem wird u. a. im *Weißbuch Regenerative Energien* der Kommission der Europäischen Gemeinschaften und dem Klimaschutzprogramm der Bundesregierung Ausdruck verliehen.

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden zunächst die verschiedenen technischen Möglichkeiten zur Wärme- und Strom- sowie zur Kraftstoffbereitstellung (d. h. Einsatz im Verkehrssektor) aus Biomasse dargestellt. Dabei werden nur die Möglichkeiten näher betrachtet, die aus gegenwärtiger Sicht sinnvoll in Deutschland einsetzbar sind bzw. einsetzbar sein könnten. Anschließend werden exemplarisch nur ausgewählte Optionen einer Stromerzeugung aus unterschiedlichen Biomassen anhand der Kosten und ausgewählter Umweltaspekte miteinander verglichen. Ausgehend davon werden Schlußfolgerungen gezogen und zur Diskussion gestellt.

2. Analyse der Systemtechnik

Unter Biomasse werden Stoffe organischer Herkunft verstanden. Biomasse beinhaltet damit die in der Natur lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere) und die daraus resultierenden Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle (z. B. Exkrememente, Stroh, Schlachthofabfälle). Biomasse kann – außer stofflich z. B. als Rohstoff für die Papierherstellung oder als Nahrungsmittel – auch energetisch – und damit zur Bereitstellung von Bioenergie – genutzt werden.

Biomasse für die Energiebereitstellung wird im allgemeinen unterteilt in Energiepflanzen, Ernterückstände, organische Nebenprodukte und organische Abfälle.

- Unter Energiepflanzen werden ausschließlich zur Energiegewinnung angebaute Pflanzen verstanden (z. B. Kurzumtriebspappeln, Chinaschilf, Energiegetreide).
- Ernterückstände fallen bei der Primärproduktion von Rohstoffen für die stoffliche Nutzung an (d. h. Koppelprodukte der land- und forstwirtschaftlichen Produktion wie z. B. Stroh, Waldrestholz).
- Organische Nebenprodukte fallen demgegenüber bei der Weiterverarbeitung land- und forstwirtschaftlicher Produkte an (z. B. Gülle, Kappholz, Sägespäne).
- Unter organischen Abfällen werden Abfälle organischer Herkunft wie z. B. Klärschlamm oder die organische Hausmüllfraktion verstanden.

Diese Biomassen müssen für eine energetische Nutzung zunächst verfügbar gemacht werden (Abb. 1). In den allermeisten Fällen ist dazu ein Ernte- und/oder Sammelprozeß und im Regelfall zusätzlich ein Transportprozeß notwendig. In vielen Fällen muß die Biomasse zusätzlich, bevor sie energetisch genutzt werden kann, mechanisch aufbereitet werden (u. a. Zer-

kleinerung, Verdichtung). Oft wird auch eine Lagerung realisiert, um einen Ausgleich zwischen Biomasseanfall und Energienachfrage zu ermöglichen.

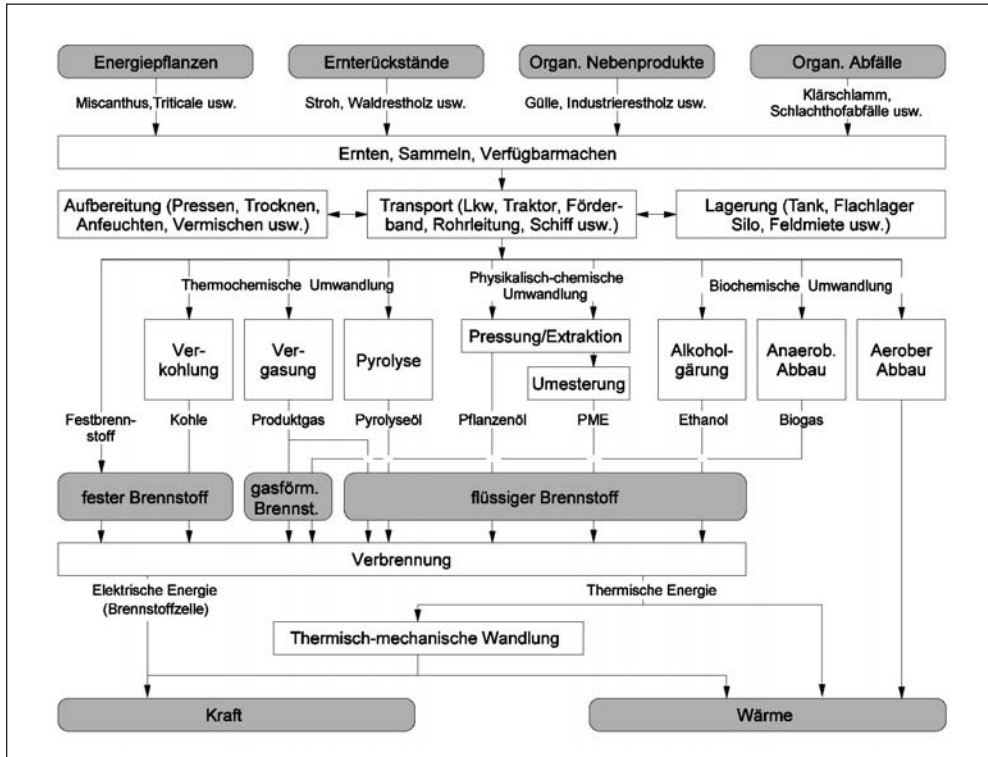


Abb. 1 Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse zur End-/Nutzenergiebereitstellung (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001)

Anschließend kann die Biomasse zur Wärme- und/oder Strombereitstellung bzw. zur Bereitstellung von Kraftstoffen genutzt werden. Dazu ist sie in einen festen, flüssigen oder gasförmigen Energieträger – oder eine Kombination daraus – zu überführen. Der oder die Energieträger können dann unter Energiefreisetzung verbrannt (d. h. meist zu Kohlenstoffdioxid und Wasser oxidiert) werden. Diese Bereitstellung der Bioenergieträger kann realisiert werden durch eine einfache mechanische Aufbereitung (z. B. aus Waldholz zu biogenen Festbrennstoffen wie beispielsweise Hackschnitzel oder Pellets) und/oder durch eine aufwendige thermo-, physikalisch- bzw. bio-chemische Umwandlung (z. B. Bereitstellung eines Brenngases aus Holz, Produktion von Biodiesel aus Rapssaat, Herstellung von Biogas aus Gülle). Bei letzterem werden durch entsprechende Veredelungsprozesse die Eigenschaften der Bioenergieträger hinsichtlich z. B. der Energiedichte, der Handhabung, der Speicher- und Transportmöglichkeiten, der Umweltverträglichkeit der energetischen Nutzung und/oder dem Potential zur Substitution fossiler Energieträger verändert. Diese Bioenergieträger können dann durch eine

Verbrennung in entsprechenden Anlagen in die letztlich gewollte Wärme und/oder den gewünschten Strom bzw. in Kraft (z. B. für den Traktionsbereich) überführt werden (Abb. 1).

Da die thermo-, physikalisch- und bio-chemische Veredelung nicht notwendigerweise unabhängig von der nachfolgenden Verbrennung der dadurch bereitgestellten Sekundärenergieträger betrachtet werden kann, werden im Folgenden die verschiedenen Veredelungsverfahren jeweils einschließlich der typischerweise nachgelagerten Umwandlung in End- bzw. Nutzenergie diskutiert. Unabhängig davon kann der biogene Festbrennstoff auch direkt – nach einer vergleichsweise einfachen mechanischen Aufbereitung – durch eine Verbrennung genutzt werden. Dies ist einer der »klassischen« Anwendungsfälle der energetischen Biomassennutzung. Diese verschiedenen Optionen werden nachfolgend dargestellt.

2.1 Ausschließliche Verbrennung

Bei der klassischen Verbrennung fester Biomasse in entsprechenden Feuerungsanlagen wird im allgemeinen unterschieden zwischen dem Einsatz in Kleinst-, Klein- und Großanlagen zur Wärme- und/oder Strombereitstellung. Dabei ist die Wärmebereitstellung in allen Leistungsbereichen seit Jahrzehnten im praktischen Einsatz. Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine Unterschubfeuerung, wie sie derzeit eingesetzt wird.

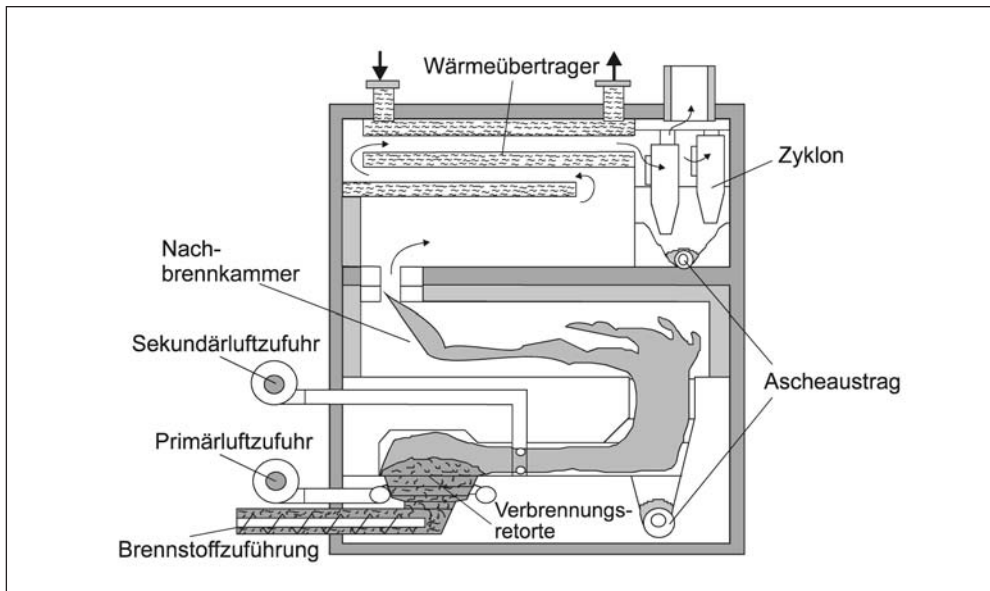


Abb. 2 Beispiel für eine Unterschubfeuerung (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001)

Bei einer derartigen Unterschubfeuerung (Abb. 2) wird der Brennstoff mit einer Förder-schnecke von unten in die Feuermulde (Retorte) eingebracht. Ein Teil der Verbrennungsluft wird als Primärluft zunächst in die Retorte und hier durch den Brennstoff geblasen. Dort erfolgen die Trocknung, pyrolytische Zersetzung und Vergasung des biogenen Festbrennstoffs

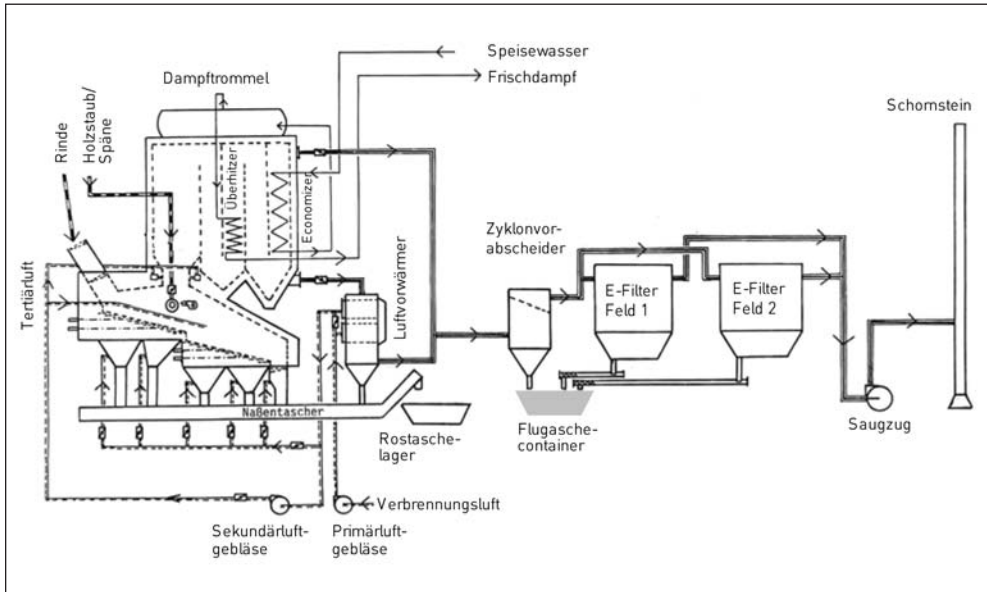


Abb. 3 Beispiel für eine Stromerzeugungsanlage zur Nutzung biogener Festbrennstoffe (Fließschema der Anlage der Firma Klenk in Oberrot, persönliche Mitteilung, EnBW, 2001)

sowie der Abbrand der Holzkohle. Um die brennbaren Gase vollständig zu oxidieren, wird vor dem Eintritt der Abgase in die heiße Nachbrennkammer Sekundärluft zu den brennbaren Abgasen zugemischt. Anschließend geben die heißen Abgase im Wärmeübertrager ihre Wärme an ein Wärmeträgermedium (z. B. Wasser) ab, passieren den Zyklon als Trägheitsentstauber und gelangen durch das Kaminsystem in die Atmosphäre.

Die ausschließliche und/oder gekoppelte Stromerzeugung in Anlagen im MW-Bereich über konventionelle Dampfprozesse (Turbine) ist ebenfalls gängig und hat in Deutschland infolge des *Erneuerbare-Energien-Gesetzes* (EEG) erheblich an Bedeutung gewonnen.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine typische Rostfeuerung, wie sie beispielsweise für die Verbrennung von Rinde zur Stromerzeugung eingesetzt wird. In solchen Anlagen wird die durch die Verbrennung der Biomasse freigesetzte Wärme zur Bereitstellung von Dampf genutzt, der anschließend mit Hilfe eines konventionellen Dampfprozesses – und damit der gängigen Kraftwerkstechnik – in elektrische Energie gewandelt wird. Die heißen Abgase werden anschließend über einen Zyklon und einen Elektrofilter vom Staub gereinigt, bevor sie an die Atmosphäre abgegeben werden. Die Asche wird am unteren Teil des Rostes abgezogen und im Regelfall deponiert.

Demgegenüber ist die Stromerzeugung im kW-Bereich mit hohen Stromwirkungsgraden bisher nur mit einem sehr hohen technischen Aufwand – und damit sehr hohen Kosten – realisierbar. Auch haben alle derzeit diskutierten Optionen (z. B. Stirling-Motor) vergleichsweise geringe elektrische Wirkungsgrade und/oder zeigen mehr oder weniger starke technische (und ökonomische) Defizite.

2.2 Thermo-chemische Umwandlung

Bei den thermo-chemischen Veredelungsverfahren erfolgt die Umwandlung der Biomasse primär unter dem Einfluß von Wärme, durch die aus biogenen Festbrennstoffen gasförmige, flüssige und/oder feste Sekundärenergieträger hergestellt werden können. Dabei kann unterschieden werden zwischen der Vergasung, der Verkohlung und der Pyrolyse (Abb. 1).

Vergasung

Bei der Vergasung wird Biomasse bei hohen Temperaturen möglichst vollständig in brennbare Gase umgewandelt. Dazu wird dem Prozeß unterstöchiometrisch ein sauerstoffhaltiges Vergasungsmittel (z. B. Luft) zugeführt. Dieser Sauerstoff wird benötigt, um den in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoff über diverse Zwischenstufen in Kohlenstoffmonoxid (CO) zu überführen (d. h. zu vergasen). Dazu wird durch eine teilweise Verbrennung des Einsatzmaterials die erforderliche Prozeßwärme bereitgestellt. Das produzierte Brenngas kann anschließend in Motoren, Turbinen oder gegebenenfalls in Brennstoffzellen zur Stromerzeugung eingesetzt werden (die Stromerzeugung ist der bisher präferierte Umwandlungspfad) oder zu flüssigen Bioenergieträgern (z. B. Methanol, Fischer-Tropsch-Diesel) umgewandelt werden (und das ist in der letzten Zeit vermehrt in die Diskussion gekommen und hat infolge der *European Biofuel Directive* merklich an Bedeutung gewonnen).

Abbildung 4 zeigt die Vergasungsanlage in Güssing, mit der Strom und Wärme über die Biomassevergasung bereitgestellt wird. Aus einem Tagesbunker werden hier Hackschnitzel über einen Schubboden und ein Becherwerk in einen Zwischenbunker gefördert. Von hier

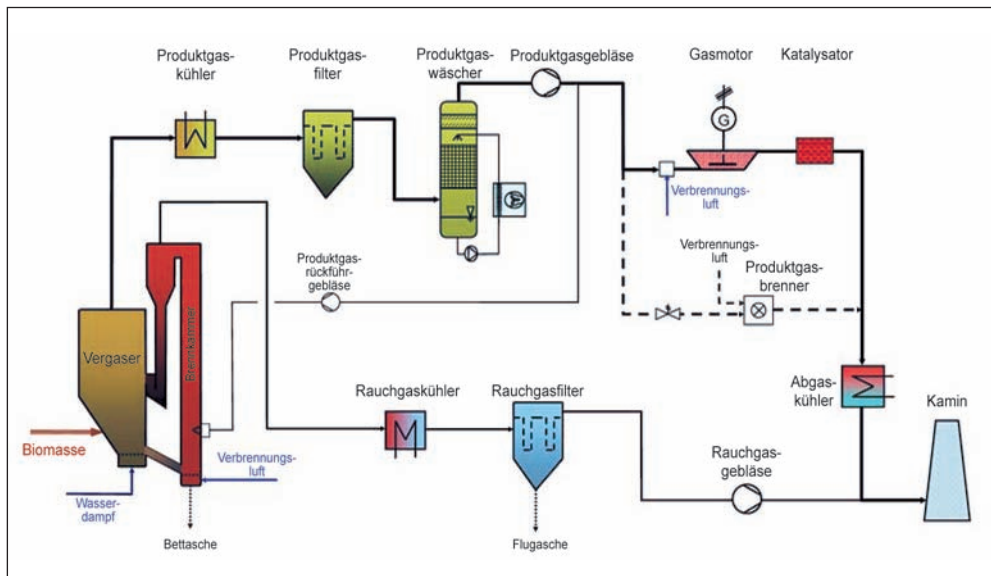


Abb. 4 Beispiel für eine Vergasungsanlage. Fließschema der Anlage des Vergasungskraftwerks in Güssing, persönliche Mitteilung, TU Wien, 2003

werden sie über ein Waageband gemessen und über ein Zellradschleusen- und Schnecken-system in den Vergasungsreaktor eingebracht. Bei diesem handelt es sich um eine stationäre, mit Dampf fluidisierte Zweibett-Wirbelschicht. Das Produktgas wird nach dem Vergaser gekühlt und mittels eines precoatisierten Gewebefilters vom Staub gereinigt. Durch eine nachgeschaltete Ölwäsche mit Biodiesel (RME) wird der Teer aus dem Rohgas entfernt. Das so gereinigte Gas wird über ein Gebläse verdichtet und dem Gasmotor zugeführt. Die entstandenen Motorenabgase werden katalytisch nachbehandelt und abgekühlt. Das Bettmaterial und der bei der Vergasung entstandene Koks wandern über eine Rutsche in den Verbrennungsteil der Anlage. Dort verbrennt der Koks unter Luftzugabe in einer austragenden Wirbelschicht. In dieser wird auch der beladene Biodiesel aus dem Ölwäscher verbrannt. Das Bettmaterial wird vom Abgas getrennt und über einen Siphon in den Vergasungsreaktor zurückgeführt. Das heiße Abgas der Verbrennung wird zur Fernwärme- und Dampfproduktion genutzt.

Verkohlung

Darunter wird eine Veredelung von fester Biomasse mit dem Ziel einer möglichst hohen Ausbeute an Festbrennstoff (Holzkohle) verstanden. Das organische Material wird dabei thermisch zersetzt, wobei die erforderliche Prozeßwärme häufig durch eine Teilverbrennung des Rohstoffs bereitgestellt wird. Die bei der Verkohlung ablaufenden thermo-chemischen Prozesse unterscheiden sich also nicht grundsätzlich von denen der Vergasung. Sie laufen nur unter anderen Prozeßbedingungen ab und führen deshalb zu einem teilweise anderen Ergebnis.

Die Verkohlung von Biomasse im großtechnischen Maßstab in Deutschland wird derzeit fast ausschließlich zur stofflichen Nutzung der produzierten Holzkohle (z. B. Aktivkohle) oder zum Einsatz als Grillholzkohle realisiert. Holzkohle als Energieträger wird dagegen in industrialisierten Ländern wie Deutschland kaum großtechnisch genutzt. Ein solcher Einsatz als Energieträger erscheint auch aus energetischen und ökologischen Gründen wenig sinnvoll.

Pyrolyse

Bei der Pyrolyse wird (feste) Biomasse unmittelbar unter kurzfristiger Hitzeeinwirkung in eine Kombination mit prozeßabhängigen Anteilen aus gasförmigen, flüssigen und festen Sekundärenergieträgern umgewandelt, indem die langkettigen organischen Moleküle, aus denen biogene Festbrennstoffe bestehen, unter Wärmeeinfluß aufgebrochen werden. Wird die flüssige Fraktion abgetrennt und anschließend aufbereitet, kann das dabei anfallende Bioöl – außer in Brennern zur Wärmebereitstellung – prinzipiell auch in Motoren und/oder Turbinen zur Strom- und gegebenenfalls Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Ein Einsatz im Verkehrssektor ist grundsätzlich auch denkbar, ist jedoch bisher aufgrund der meist ungünstigen brennstofftechnischen Eigenschaften des Bioöls eine kaum ernstzunehmende Option.

Derartige Verfahren befinden sich bisher noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Aus gegenwärtiger Sicht ist – aufgrund der nur eingeschränkt vorhandenen Technik – auch nicht davon auszugehen, daß die Pyrolyse unter den heute gegebenen Randbedingungen und dem derzeitigen Stand der Technik einen energiewirtschaftlich relevanten Beitrag zur Deckung der Energienachfrage in Deutschland leisten können wird.

2.3 Physikalisch-chemische Umwandlung

Die Gewinnung von Pflanzenöl, beispielsweise aus Raps- oder Sonnenblumensaat, erfolgt durch Pressung und/oder Extraktion des in den organischen Stoffen enthaltenen Öls. Beim Pressen der ölhaltigen Biomasse (d. h. der Saat) wird die flüssige Ölphase durch mechanische Prozesse von der festen Phase, dem sogenannten Preßkuchen, getrennt. Dies ist ein vergleichsweise aufwendiger Prozeß, der durch eine Vielzahl von Zwischenstufen gekennzeichnet ist. Abbildung 5 zeigt exemplarisch ein entsprechendes Ablaufschema.

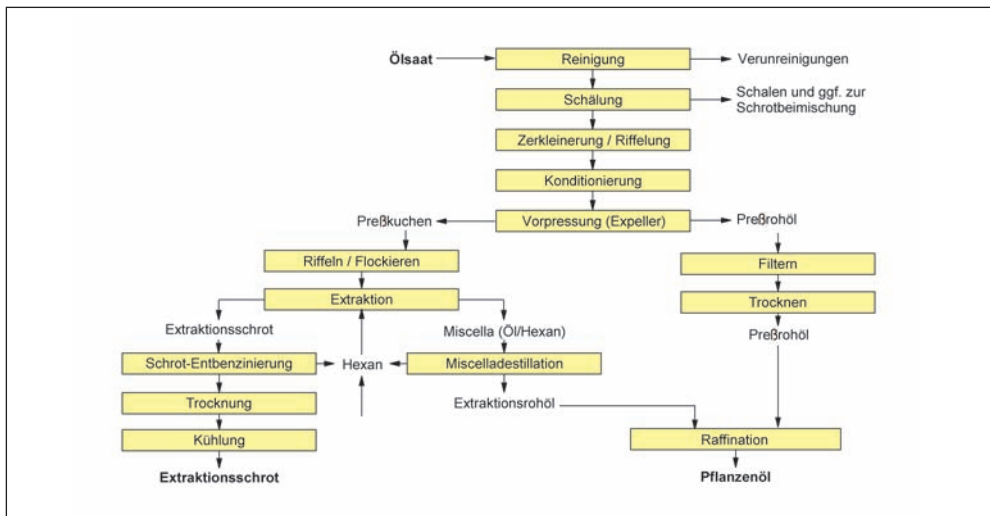


Abb. 5 Beispiel für die Herstellung von Pflanzenöl (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001)

Bei der Extraktion dagegen wird der ölhaltigen Saat der Ölinhalt mit Hilfe eines Lösemittels entzogen, als Feststoff bleibt das sogenannte Extraktionsschrot zurück. Mit Hilfe der Extraktion können im Vergleich zur Pressung deutlich höhere Entölungsgrade erzielt werden. Dies hat jedoch den Nachteil, daß das Lösemittel und das Öl anschließend wieder (aufwendig) getrennt werden müssen (Abb. 5). Daher wird bei der für Deutschland wichtigsten Ölsaart, dem Raps, häufig eine Kombination aus Pressung und (nachgeschalteter) Extraktion gewählt.

Das derart gewonnene Pflanzenöl kann in Reinform in Motoren und Heiz- bzw. Heizkraftwerken (d. h. Blockheizkraftwerken [BHKW]) als Brennstoff energetisch eingesetzt werden. Problematisch ist jedoch die nur eingeschränkte Markt-Verfügbarkeit von pflanzenöltauglichen Motoren.

Durch einen nachfolgenden chemischen Umwandlungsprozeß, die sogenannte Umesterung, kann das gewonnene Pflanzenöl u. a. hinsichtlich Viskosität, Dichte und Zündwilligkeit an die Eigenschaften von konventionellem Dieseldieselkraftstoff angepaßt werden. Der in Deutschland bekannteste Pflanzenölester ist Rapsölmethylester (RME). Er wird durch Umesterung von Rapsöl mit Methanol produziert und kann – bei einer entsprechenden Freigabe der Motorenhersteller – als Dieselerersatz genutzt werden. Alternativ ist auch ein Einsatz in Block-

Heizkraftwerken zur gekoppelten Wärme- und Strombereitstellung möglich. Dies ist Stand der Technik.

Ein Beispiel für den Einsatz von Rapsölmethylester im stationären Bereich ist das Motoren-Heizkraftwerk (MHKW) im Reichstag in Berlin (Abb. 6). Mit einer elektrischen Leistung von 1 600 kW bildet es das Herzstück der Energieversorgungsanlage im Reichstagsgebäude, die in Verbindung mit einem Wärme- und einem Kälte-Erdspeicher betrieben wird. Die MHKW-Anlage besteht aus vier baugleichen stationären Dieselmotoren, die für den Betrieb mit Rapsölmethylester zugelassen wurden. Die nicht durch die MHKW-Anlage abzudeckende Stromnachfrage wird aus dem Stromnetz eines lokalen Energieversorgungsunternehmens (EVU) bezogen, diese Kopplung an das Netz der öffentlichen Versorgung dient zugleich als Ausfallreserve.

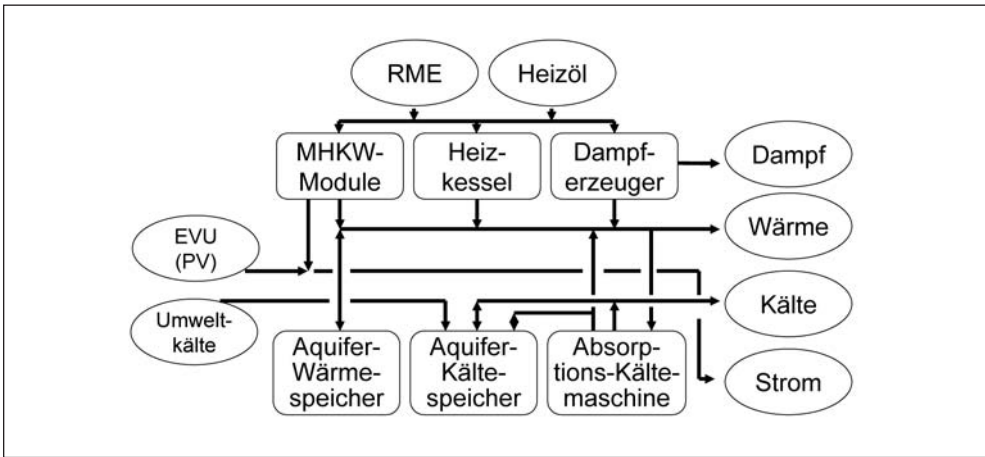


Abb. 6 Energieversorgung im Deutschen Bundestag in Berlin (EVU: Bezug vom Energieversorgungsunternehmen, PV Photovoltaikanlage auf dem Dach des Reichstagsgebäudes (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001)

Da die Wärmeerzeugung mittels MHKW-Anlage prozeßbedingt fest an die Stromproduktion gekoppelt ist, kann – bezüglich der Deckung der aktuellen Wärmenachfrage – ein Wärmeüberschuß bzw. ein -defizit vorliegen. Zur Zwischenspeicherung überschüssig anfallender Wärme ist deshalb ein Aquifer-Speicher in ca. 300 m Tiefe vorhanden, in dem die Wärme bei einer Temperatur von maximal 70 °C zwischengespeichert und voraussichtlich mit Temperaturen zwischen 65 und 25 °C zurückgewonnen werden kann. Läßt die Temperatur der eingespeicherten Wärme eine direkte Nutzung für Heizungszwecke nicht zu, kann sie mit Hilfe einer auf Wärmepumpenbetrieb umschaltbaren Absorptionskältemaschine (d. h. unter Einsatz von Wärme) auf ein höheres, für Heizungszwecke nutzbares Temperaturniveau gebracht werden. Ein dann gegebenenfalls immer noch gegebenes Wärmedefizit wird über eine zusätzlich installierte Kesselanlage abgedeckt, die – wie die Motoren – mit RME betrieben werden kann. Die Kesselanlage stellt zusätzlich Dampf für die Luftbefeuchtung bereit und dient als Ausfallreserve der Wärmeerzeugung.

Die hausinterne Niedertemperaturkältenachfrage (6–12 °C) wird mit der bereits erwähnten 850 kW-Absorptionskältemaschine gedeckt. Als Kältespeicher dient eine grundwasserführende, bodennahe Erdschicht in etwa 30 bis 60 m Tiefe, die im Sommer für die Gebäudekühlung in der Grundlast (16–19 °C) verwendet werden kann. Das dabei aufgeheizte Grundwasser wird im folgenden Winter über Kühltürme auf 5–10 °C wieder abgekühlt und damit regeneriert.

2.4 Bio-chemische Umwandlung

Bei den bio-chemischen Veredelungsverfahren erfolgt die Umwandlung von Biomasse in einfacher nutzbare Sekundärenergieträger mit Hilfe von Mikroorganismen.

Alkoholgärung

Zucker-, stärke- und cellulosehaltige Biomasse kann durch eine alkoholische Gärung in Ethanol überführt werden, der anschließend in Reinform gewonnen werden kann. Vor der eigentlichen Gärung muß der Zucker in Lösung vorliegen. Dazu muß er aus zuckerhaltigen Biomassen (z. B. Zuckerrüben) extrahiert werden. Bei stärkehaltigen Ausgangsstoffen muß die Stärke zunächst verzuckert (d. h. Aufspaltung der Stärkemoleküle in Einfachzucker) werden. Cellulosehaltige Biomasse muß zuvor verzuckert werden.

Anschließend wird im Gärungsprozeß die zuckerhaltige Lösung mit Hilfe von Hefen in Ethanol umgewandelt. Für eine größtmögliche Ethanolausbeute ist es dabei wichtig, daß für die Mikroorganismen optimale Bedingungen (z. B. Temperatur, pH-Wert, Alkoholkonzentration) vorherrschen. Die Abtrennung des Alkohols aus der vergorenen Maische erfolgt zunächst durch eine Destillation bzw. Rektifikation. Dabei kann eine Reinheit des gewonnenen Alkohols von maximal 97,2 Vol.-% erreicht werden. Höhere Konzentrationen sind nicht möglich, da Wasser und Ethanol bei dieser Konzentration ein Azeotrop bilden (d. h. Dampf und flüssige Phase haben die gleiche Zusammensetzung, so daß eine weitere destillative Auftrennung nicht mehr möglich ist). Zur weiteren Aufkonzentrierung von Alkohol (d. h. zur Gewinnung von Reinalkohol) ist daher ein zusätzlicher Arbeitsschritt, die sogenannte Absolutierung, notwendig. Hier wird durch Zumischung eines Schleppmittels (z. B. Cyclohexan) der azeotrope Punkt des Wasser-Ethanol-Gemischs verschoben. Damit ist eine weitere destillative Auftrennung möglich. Auf diese Weise läßt sich die für die Nutzung als Kraftstoff bzw. Kraftstoff-Mischkomponente notwendige Reinheit von 99,8 Vol.-% erzielen.

Nach Abtrennung des vergorenen Alkohols bleibt rund das 9- bis 14-fache des Ethanolvolumens als sogenannte Schlempe zurück. Sie enthält bis auf die vergorenen Kohlenhydrate noch alle Inhaltsstoffe der Maische (d. h. Wasser, organische Stoffe, Mineralien) sowie Proteine der Hefen. Sie kann feucht oder getrocknet als Futter- oder Düngemittel verwendet werden. Auch kann sie zunächst zusätzlich in Biogasanlagen ausgefault und erst anschließend als Düngemittel verwertet oder nach einer energieaufwendigen Trocknung gegebenenfalls auch verbrannt werden.

Ethanol kann als Treib- und Brennstoff in Motoren oder Verbrennungsanlagen zur Bereitstellung von Kraft, Strom und Wärme eingesetzt werden. Obwohl die Erzeugung von Trinkalkohol Stand der Technik ist, hat sich bisher eine Alkoholherstellung als Energieträger in Deutschland – auch aufgrund der hohen damit verbundenen Kosten – nicht durchsetzen kön-

nen. Dies könnte sich aber infolge der jüngsten Änderung der energiewirtschaftlichen Rahmensetzungen ändern.

Anaerobe Fermentation

Beim anaeroben Abbau organischer Stoffe, d. h. dem Abbau unter Sauerstoffabschluß, entsteht in entsprechenden Reaktoren ein wasserdampfgesättigtes Mischgas (Biogas), das zu 55 bis 70 % aus Methan besteht. Es kann – gegebenenfalls nach einer entsprechenden Reinigung – in Motoren zur Wärme-, Strom- und Kraftbereitstellung genutzt werden. Anlagen zur anaeroben Fermentation sind beispielsweise bei der Klärschlammstabilisation Stand der Technik, Kläranlagen mit biologischer Klärstufe verfügen im allgemeinen über eine Biogasanlage, deren Gas in einem Gasmotor oder einem Blockheizkraftwerk genutzt wird. Auch für die Vergärung von Gülle – gegebenenfalls in Kofermentation mit anderen organischen Abfällen (z. B. Speiseöl) – und die anschließende Gasnutzung in Motoren mit gekoppelter Erzeugung von Strom und Wärme wurden in den letzten Jahren eine Vielzahl von Anlagen – primär infolge des *Erneuerbare-Energien-Gesetzes* – errichtet. Dabei kann die Gaserzeugung und -nutzung aus Gülle als am Markt verfügbar angesehen werden.

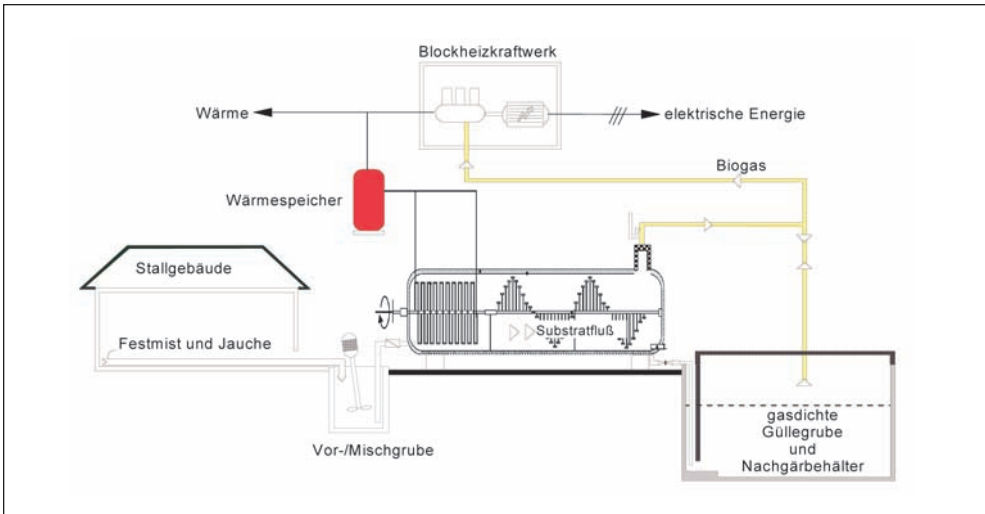


Abb. 7 Beispiel für eine Biogasanlage (NEUBARTH und KALTSCHMITT 2000)

Abbildung 7 zeigt exemplarisch eine Durchflußanlage, wie sie typischerweise in der deutschen Landwirtschaft eingesetzt wird. Beim Durchflußsystem wird das Substrat dem Reaktor kontinuierlich oder in kurzen Zeitabständen (quasi-kontinuierlich) zugeführt und gleichzeitig ein entsprechendes Volumen an vergorenem Substrat abgezogen. Am häufigsten kommen bei Durchflußsystemen sogenannte Rohrfermenter mit mechanischen, hydraulischen oder pneumatischen Rührwerken zum Einsatz. Abbildung 7 zeigt ein solches System zur Vergärung von

tierischen Exkrementen (Festmist oder Gülle) mit liegendem Stahltank und durchgehendem Haspelrührwerk. Bei dieser verbreiteten Bauform von Durchflußsystemen wird das Substrat zum Ausgleich zeitlicher Schwankungen bzw. zur Zerkleinerung zuerst in eine Vorgrube geleitet und von dort in den wärmegeprägten Fermenter gepumpt. Die Heizung des Fermenters ist im vorderen Drittel angebracht. Bei einem Doppelmantelbehälter kann diese alternativ auch über den gesamten Fermenter verteilt sein. Das Substrat durchströmt nun den Fermenter horizontal (Pfropfenstrombetrieb) und wird schließlich entweder direkt oder über eine Nachgärkammer in das Güllelager gepumpt.

Aerober Abbau

Hier wird die Biomasse mit Luftsauerstoff unter Wärme- und CO₂-Freisetzung oxidiert (d. h. Kompostierung). Die frei werdende Wärme kann z. B. mit Hilfe von Wärmepumpen gewonnen und in Form von Niedertemperaturwärme genutzt werden. Jedoch ist u. a. der Entzug der Wärme aus dem Kompost noch nicht zufriedenstellend gelöst. Auch sind – aus gegenwärtiger Sicht – die entsprechenden Potentiale gering. Deshalb wird diese Option hier nicht näher betrachtet.

3. Potentiale und deren Nutzung

3.1 Potentiale

Die technischen Potentiale beschreiben den technisch realisierbaren Beitrag der Biomasse zur Deckung der Energienachfrage, und zwar:

- bei den Brennstoffpotentialen die Energie der technisch bereitstellbaren Biomasse,
- bei den Erzeugungspotentialen die technisch bereitstellbare End- bzw. Nutzenergie ohne,
- bei den Endenergiepotentialen mit Berücksichtigung nachfrageseitiger Restriktionen.

Brennstoffpotentiale

Abbildung 8 zeigt die Brennstoffpotentiale unterschiedlicher Biomassen aus Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen einerseits und aus Energiepflanzen andererseits in Deutschland. Die aufgezeigten Potentiale an Energiepflanzen dürfen dabei – aufgrund begrenzter Flächen – nicht aufaddiert werden. Es können entweder nur Lignocellulose-haltige Biomassen zur Bereitstellung biogener Festbrennstoffe, Zucker-, Stärke- und Öl-haltige Biomassen zur Bio-Ethanol- und/oder Pflanzenöl-basierten Kraftstoffproduktion oder nur Biomassen mit einem hohen Wassergehalt zur Biogasbereitstellung – oder ein entsprechender Mix – angebaut werden. Zusammengefasst sind Biomasse-Brennstoffpotentiale vorhanden, die mit rund einem Zehntel des Primärenergieverbrauchs energiewirtschaftlich relevant sind.

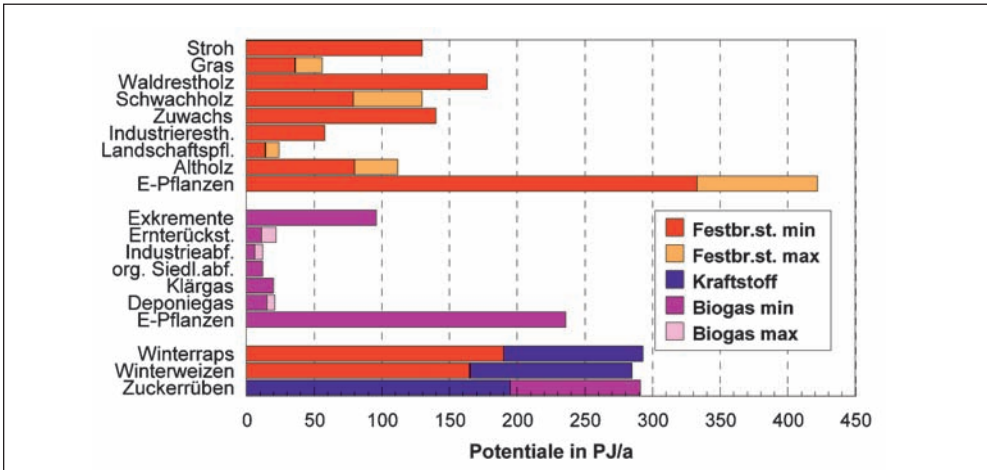


Abb. 8 Potentiale unterschiedlicher Biomassen (Lignocellulose-haltige Biomassen *oben*, Biomassen mit hohem Wasseranteil *Mitte*, Zucker-, Stärke- und Öl-haltige Biomassen *unten*). Energiepflanzenpotentiale sind aufgrund beschränkter Anbauflächen nur einmal nutzbar (d. h. entweder als Festbrennstoff, als Biogas oder als Kraftstoff) (KALTSCHMITT und THRÄN 2003)

Stromerzeugungspotentiale

Tabelle 1 zeigt die aus den Brennstoffpotentialen nach Abbildung 8 resultierenden Stromerzeugungspotentiale. Demnach stammen die in Deutschland vorhandenen Stromerzeugungspotentiale aus Biomasse primär aus biogenen Festbrennstoffen und sekundär aus einer möglichen Biogaserzeugung. Verglichen damit sind die Möglichkeiten einer Stromerzeugung aus flüssigen Bioenergieträgern eher begrenzt.

Wärmebereitstellung

Die Potentiale zur Wärmebereitstellung, ausgehend von den in Abbildung 8 gezeigten Brennstoffpotentialen, resultieren ebenfalls primär aus biogenen Festbrennstoffen und zu einem kleineren Anteil aus Biogas. Verglichen damit sind die Möglichkeiten einer Wärmeerzeugung aus flüssigen Bioenergieträgern – ausschließlich in KWK – kleiner.

Kraftstoffbereitstellung

Tabelle 1 zeigt auch die Kraftstoffpotentiale, die ebenfalls aus den in Abbildung 8 dargestellten Brennstoffpotentialen resultieren. Zu beachten ist dabei, daß die Technik zur Bereitstellung flüssiger Bioenergieträger auf der Basis biogener Festbrennstoffe und von Biogas bisher nur sehr eingeschränkt vorhanden ist.

Tab. 1 Potentiale und Nutzung von Biomasse zur Strom-, Wärme- und Kraftstoffbereitstellung, Zahlen sind nicht addierbar, da Biomasse z. B. nur als Festbrennstoff oder als Biogas bzw. die vorhandene Fläche nur einmal (z. B. zur Produktion von Festbrennstoffen, Flüssigenergieträgern oder Biogas) genutzt werden kann. (KALTSCHMITT und THRÄN 2003)

| | Option | Technische Erzeugungspotentiale | Technische Endenergiepotentiale | Nutzung |
|---|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------|
| Lignocellulose-haltige Biomassen | Strom in TWh/a | 90–150 | 85–143 | 1,3 |
| | Wärme in PJ/a | 756–1071 | 718–1017 | 187,0 |
| | Kraftstoffe in PJ/a | 271–735 | 260–707 | 0,0 |
| Zucker-, Stärke- und Öl-haltige Biomassen | Strom in TWh/a | max. 17,3 | max. 16,4 | 0,005 |
| | Wärme in PJ/a | max. 117 | max. 111 | 0,04 |
| | Kraftstoffe in PJ/a | max. 145 | max. 139 | 21,2 |
| Biomassen mit hohem Wasseranteil | Strom in TWh/a | 38–51 | 36–49 | 1,7 |
| | Wärme in PJ/a | 295–338 | 280–321 | 6,0 |
| | Kraftstoffe in PJ/a | 229–367 | 220–353 | 0,0 |

3.2 Nutzung

Biomasse wird im Energiesystem von Deutschland bereits in einem beachtlichen Ausmaß genutzt.

Lignocellulose-haltige Biomassen

Derzeit werden in Deutschland rund 8 Mio. Festbrennstoffeuerungen zur Wärmebereitstellung betrieben, in denen rund 200 PJ/a Brennstoffenergie zur Bereitstellung von ca. 187 PJ/a an Nutzenergie eingesetzt werden. Zusätzlich waren Ende 2002 knapp 90 Biomasse(heiz-)kraftwerke mit einer Stromerzeugung aus fester Biomasse von ca. 1,3 TWh/a in Betrieb. Dazu wurden ca. 3 Mio. t/a (knapp 40 PJ/a) primär Altholz eingesetzt.

Zucker-, Stärke- und Öl-haltige Biomassen

2002 wurden rund 550000 t Biodiesel abgesetzt. Hinzu kommen geringe Mengen an Pflanzenöl für die motorische Nutzung (z. B. in Traktoren). Zusätzlich werden Pflanzenöl-basierte Energieträger auch in stationären Anlagen eingesetzt (z. B. RME-MHKW im Deutschen Bundestag). Andere flüssige Bioenergieträger haben keine Bedeutung.

Biomassen mit einem hohen Wassergehalt

Ende 2002 waren mehr als 1600 Biogasanlagen im landwirtschaftlichen Bereich in Betrieb (d. h. Biogasanlagen ohne Klärgasanlagen und ohne Deponiegasanlagen). Das erzeugte Biogas wird nahezu ausschließlich in KWK genutzt. Insgesamt wurden rund 1 TWh/a Strom und ca. 6 PJ/a Wärme erzeugt.

4. Ökonomische und ökologische Analyse

Biomasse ist damit aus Sicht der Technik und der vorhandenen Potentiale eine vielversprechende Option zur Wärme-, Strom- und Kraftstoffbereitstellung. Inwieweit dies auch aus Sicht ökonomischer und ökologischer Kriterien der Fall ist, wird nachfolgend exemplarisch für eine Stromerzeugung aus unterschiedlichen Bioenergieträgern untersucht. Dazu werden zunächst entsprechende Referenztechniken definiert.

4.1 Referenztechniken

Die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen einer Stromerzeugung aus Biomasse hängen stark von der eingesetzten Wandlungstechnik und der Betriebsweise ab. Deshalb werden hier sogenannte Referenztechniken für einzelne Optionen einer Stromerzeugung aus Biomasse definiert, die typische Anwendungsfälle in Deutschland nach dem gegenwärtigen Stand der Technik widerspiegeln.

Zunächst wird ein Biomasse-Kraftwerk mit und ohne Wärmeauskopplung (d. h. KWK und ausschließliche Stromerzeugung) mit einer elektrischen Leistung von 20 MW betrachtet. Die Anlage ist mit einem Tuchfilter und einer nichtkatalytischen Entstickungsanlage als sekundärem Rauchgasreinigungssystem ausgestattet. Sie erfüllt die Anforderungen nach der 17. BImSchV. Mit der gegenwärtigen Technologie beträgt der Nutzungsgrad 30 %. Die Volllaststunden werden mit 7500 h/a und die Lebensdauer mit 35 Jahren angesetzt (Tab. 2). Das Kraftwerk wird mit Altholz, Waldrestholz und Pappelholz aus Kurzumtriebsplantagen befeuert.

Tab. 2 Zusammenstellung der untersuchten Referenztechniken

| | Leistung in MW | Netto-Wirkungs- grad in % | Brennstoff | Strom | KWK |
|-------------------|-------------------|------------------------------|--------------------------------------|-------|-----|
| Dampf-Kraftwerk | 20 | 30 | Altholz, Waldrestholz, Pappelholz | + | + |
| Vergasungs-Anlage | 1,7 | 21 | dto. | + | + |
| Biogas-BHKW | 0,2 | 30 | Gülle/Biogas | + | + |
| RME-BHKW | 0,3 | 30 | RME | + | + |

Zusätzlich wird – mit den gleichen Brennstoffen und unter sonst gleichen Rand- und Rahmenbedingungen – eine Vergasungsanlage untersucht, die eine elektrische Leistung von 1,7 MW aufweist und ebenfalls zur gekoppelten Strom- und Wärme- bzw. zur ausschließlichen Strombereitstellung eingesetzt werden kann. Sie erfüllt ebenfalls die Anforderungen nach der 17. BImSchV. Mit der derzeitigen Technologie ist ein Nutzungsgrad von rund 21 % erreichbar. Volllaststunden und Lebensdauer entsprechen dem ebenfalls untersuchten Biomasse-Kraftwerk auf Verbrennungsbasis (Tab. 2).

Weiterhin wird ein mit Biogas betriebenes BHKW mit einer elektrischen Leistung von 200 kW und einem elektrischen Wirkungsgrad von rund 30 % untersucht. Hier wird Biogas, das durch die anaerobe Fermentation von Gülle produziert wird, in Wärme und Strom umgewandelt. Zur Bereitstellung des Biogases wird die heute übliche Ein-Fermenter-Technik ein-

gesetzt. Die Gülle wird dabei als ein Rückstand der Milch- und Rindfleischproduktion angesehen und nach der Vergärung als Dünger auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht. Die sonstigen Rahmenannahmen entsprechen sinngemäß denen der beiden anderen untersuchten Kraftwerke.

Abschließend wird noch ein RME-BHKW mit einer elektrischen Leistung von 300 kW und einem Nettowirkungsgrad von 30 % betrachtet. Es dient zur Deckung der Wärme- und Stromnachfrage. Der Brennstoff wird mit den heute in Deutschland üblichen Techniken und Verfahren produziert. Die sonstigen Rahmenannahmen entsprechen sinngemäß dem bisher Gesagten.

4.2 Ökonomische Analyse

Eine wesentliche Kenngröße jeder Möglichkeit zur Energiebereitstellung stellen die Kosten dar. Deshalb werden die zuvor dargestellten Optionen zur Wärme- und Strom- bzw. zur ausschließlichen Strombereitstellung anhand der Stromgestehungskosten miteinander verglichen. Bei den KWK-Anlagen wird die genutzte thermische Energie über einen Wärmeverrechnungspreis gutgeschrieben. Abbildung 9 zeigt einen derartigen Vergleich der unterschiedlichen Optionen auf der Basis der Stromgestehungskosten.

Bei der Berechnung der spezifischen Energiebereitstellungskosten der verschiedenen betrachteten Energiebereitstellungsoptionen wird immer eine reale Rechnung im Geldwert des Jahres 2002 durchgeführt, d. h., es werden inflationsbereinigte Kosten ermittelt. Dabei wird von einer realen – also um die Inflationsrate bereinigten – Diskontrate in Höhe von 0,045 (d. h. 4,5 %) ausgegangen. Grundsätzlich werden die volkswirtschaftlichen Kosten angegeben, d. h., die Anlagen werden über die technische Lebensdauer abgeschrieben, die je nach Technik bzw. Systemkomponente unterschiedlich sein kann. Damit bleiben Steuern (z. B. Mehrwertsteuer), Subventionen (z. B. Zuschüsse im Rahmen von Markteinführungsprogrammen, verbilligte Kredite) oder steuerliche Abschreibungsmöglichkeiten unberücksichtigt. Dabei wird immer eine annuitätische Berechnung der jährlich anfallenden Aufwendungen aus den anfänglichen Gesamtinvestitionen realisiert. Ausgehend davon errechnen sich mit den jeweils zusätzlich anfallenden variablen Kosten (u. a. Wartung, Betrieb) die gesamten Jahreskosten. Daraus ergeben sich mit der im Verlauf der technischen Lebensdauer bereitgestellten mittleren jährlichen Energie frei Anlagenausgang (z. B. ins Netz eingespeiste elektrische Energie, ins Versorgungssystem eingespeiste Wärmeenergie) die spezifischen Energiebereitstellungskosten.

Diese hier realisierte Betrachtungsweise mit konstanten Geldwerten führt zu niedrigeren, da inflationsbereinigten, Kosten als die oft übliche Rechnung mit nominalen Werten. Rangfolge und Relation der Kosten verschiedener Alternativen verändern sich dadurch aber nicht. Das Rechnen mit realen Kosten hat jedoch den Vorteil, daß die Ergebnisse in einem bekannten Geldwert vorliegen, nämlich in diesem Fall dem des Jahres 2002.

Auch können die im Folgenden ausgewiesenen Energiegestehungskosten von den Ergebnissen anderer Untersuchungen und Analysen aufgrund unterschiedlicher finanzmathematischer Rahmenannahmen bzw. Kostenrechnungsverfahren oder aufgrund der Berücksichtigung möglicher externer Effekte z. T. erheblich abweichen. Die angegebenen Kosten sollten deshalb nur als durchschnittliche Größenordnung verstanden werden, durch welche die gesamte Volkswirtschaft belastet würde. Im konkreten Einzelfall können durchaus z. T. größere

Abweichungen von diesen Angaben, sowohl zu niedrigeren als auch zu höheren Werten, auftreten.

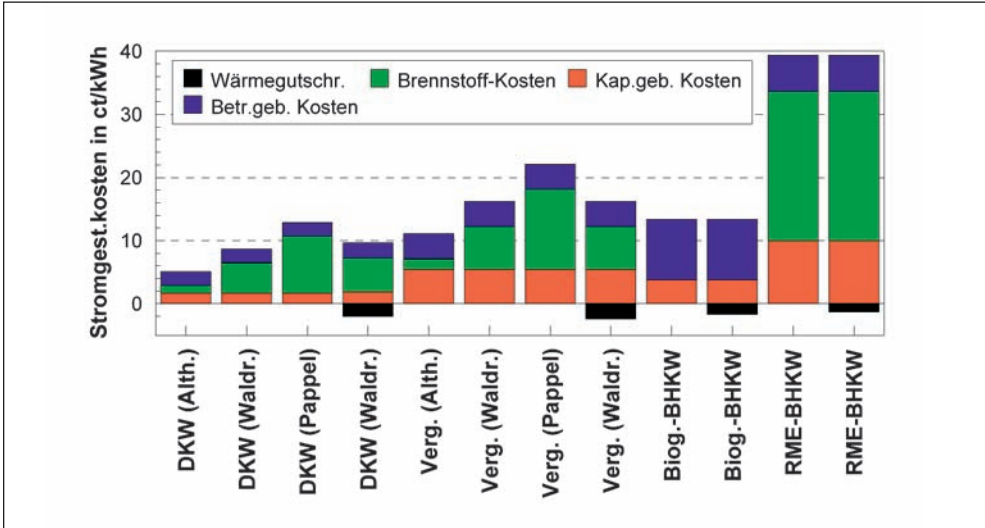


Abb. 9 Stromgestehungskosten der untersuchten Referenztechnologien (DKW: Dampfkraftwerk, Verg.: Vergasungsanlage, Biog.: Biogasanlage, Alth.: Altholz, Waldr.: Waldrestholz, Pappel: Pappel-Kurzumtriebsplantage)

Aus Abbildung 9 wird deutlich, daß sich die Stromgestehungskosten der untersuchten Optionen z. T. deutlich unterscheiden. Demnach sind die Stromgestehungskosten einer Stromerzeugung mit Hilfe eines Dampfkraftwerks tendenziell am geringsten. Verglichen damit sind die Kosten einer Stromerzeugung mit Biogasanlagen leicht und die der Vergasungsanlage nochmals geringfügig höher. Im Vergleich dazu sind die Stromgestehungskosten mit Hilfe eines RME-BHKW deutlich höher.

Deutlich wird aus Abbildung 9 auch, daß die Anteile der Investitionskosten an den gesamten Stromgestehungskosten zwischen den einzelnen Optionen z. T. sehr unterschiedlich sind. Diese Unterschiede reflektieren teilweise den unterschiedlichen Stand der Technik, durch den die verschiedenen Optionen derzeit noch gekennzeichnet sind. Deshalb sind beispielsweise die Investitionskostenanteile an den Stromgestehungskosten bei der Biogas- und der Vergasungsanlage höher als bei dem Dampfkraftwerk, da letztere Technik derzeit technisch deutlich weiter entwickelt ist als beispielsweise die Vergasungstechnik. Dieser Effekt wird merklich überlagert durch die unterschiedlichen hier untersuchten elektrischen Leistungsbereiche (d. h. Einfluß der *Economy of Scale*). Deshalb sind beispielsweise die Investitionskostenanteile des RME-BHKW merklich höher als die des Dampfkraftwerks.

Die Darstellung verdeutlicht aber auch den z. T. erheblichen Einfluß, den der Brennstoff auf die Stromgestehungskosten hat. Demnach nehmen die spezifischen Kosten der elektrischen Energie von dem Energieträger »Altholz« über den Brennstoff »Waldrestholz« bis zu dem Festbrennstoff »Pappel-Kurzumtriebsholz« deutlich zu. Die geringsten Stromgestehungskosten sind folglich dann erreichbar, wenn die Brennstoffkosten möglichst gering ge-

halten werden können. Dies ist auch mit ein Grund, weshalb eine Strom- und gegebenenfalls Wärmebereitstellung aus Rapsölmethylester durch vergleichsweise hohe Kosten gekennzeichnet ist, da – aus Sicht der tatsächlich anfallenden Kosten (und nicht der derzeitigen Marktpreise) – Rapsölmethylester aufgrund der aufwendigen Produktion ein – im Vergleich der hier untersuchten Optionen – sehr teurer (und edler) Brennstoff ist. Umgekehrt ist Biogas aus Sicht der Brennstoffkosten relativ kostengünstig, da für die hier untersuchte Gülle praktisch keine Brennstoffkosten anfallen.

Einen gewissen Einfluß auf die Stromgestehungskosten haben auch die betriebsgebundenen Kosten. Sie sind immer dann hoch, wenn es sich um eine Technik mit einem hohen spezifischen manuellen Bedienungsaufwand (z. B. Biogasanlage) – und damit einem geringen Automatisierungsgrad – handelt. Einen zusätzlichen Einfluß hat auch die Größe der Anlage bzw. die installierte Leistung (z. B. RME-BHKW *versus* Dampfkraftwerk).

Eine Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) kann auch – je nach zugrunde gelegter Betrachtungsweise – die Stromgestehungskosten erheblich beeinflussen. Kann die anfallende Wärme ganz oder teilweise verkauft werden und wird dieser Erlös auf die Stromgestehungskosten gutgeschrieben, reduzieren sich dadurch die Stromgestehungskosten. Da die Erlöse für die Niedertemperatur-Wärme jedoch im allgemeinen nur vergleichsweise gering sind und nicht immer die gesamte anfallende Wärme genutzt werden kann (z. B. werden bei vielen vorhandenen KWK-Anlagen meist überwiegend nur Haushaltskunden versorgt, die im Sommer nur durch eine relativ geringe Wärmenachfrage gekennzeichnet sind), ist der Einfluß der Wärmegutschriften teilweise nur gering.

4.3 Ökologische Analyse

In den energiewirtschaftlichen Diskussionen spielen die Umwelteffekte, die aus der Nutzung einer Energieform resultieren, eine große Rolle. Deshalb werden für die definierten Referenztechniken nachfolgend jeweils ausgewählte Umweltaspekte diskutiert, die mit einer Energiebereitstellung aus den untersuchten Optionen zur Nutzung regenerativer Energien verbunden sind. Dabei werden nur Umwelteffekte untersucht, die mit Hilfe einer Lebenszyklusanalyse quantifizierbar sind.

Grundsätzlich werden Emissionen nicht nur beim Anlagenbetrieb freigesetzt, auch beim Bau der Konversionsanlagen werden Energieträger verbraucht und dadurch die Umwelt in der einen oder anderen Form belastet. Für eine umfassende Analyse der ökologischen Auswirkungen einer Strom- und gegebenenfalls Wärmebereitstellung durch Biomasse sind deshalb die Emissionen und der Energieverbrauch über den gesamten Lebensweg der Energiegewinnung, inklusive der Errichtung und des Rückbaus der Anlagen und der benötigten Transportprozesse, zu berücksichtigen. Dies erfolgt hier mit Hilfe einer Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz). Eine derartige Lebenszyklusanalyse kann sowohl mit der Prozeßkettenanalyse als auch mit der Input-Output-Analyse erstellt werden. Es kann aber auch eine Hybridmethode zum Einsatz kommen, durch welche die Vorteile dieser beiden Verfahren sinnvoll kombiniert werden können.

Bei der Prozeßkettenanalyse wird ein beliebig komplexes (Energiebereitstellungs-)System in endlich viele, überschaubare Teilsysteme (Prozesse) zerlegt. Solche Prozesse zeichnen sich durch Zustandsänderungen aus: Eingangsgrößen werden innerhalb eines Prozesses in Ausgangsgrößen umgewandelt. Im engeren Sinne werden unter derartigen Ein- und Aus-

gangsgrößen die Energie- und Stoffströme verstanden, die für jeden einzelnen Prozeß bestimmt werden können. Prinzipiell ist mit einer derartigen Prozeßkettenanalyse eine sehr hohe Genauigkeit der Bilanzierung erreichbar, die von der Verfügbarkeit der Daten, den Kenntnissen über (Zwischen-)Produkte und technische (Umwandlungs-)Prozesse sowie der realisierten Analysetiefe abhängt. Dementsprechend ist die Prozeßkettenanalyse im allgemeinen sehr arbeitsaufwendig.

Die Input-Output-Analyse erlaubt es ebenfalls, die einem Produkt (z. B. Strom aus Biomasse) ursächlich anzulastenden Stoff- und Energieströme zu ermitteln. Grundlage ist eine Input-Output-Tabelle, in der die volkswirtschaftlichen Aktivitäten innerhalb eines bestimmten Zeitraumes (im allgemeinen ein Jahr) in aggregierter Form zusammengestellt sind. Solche Tabellen unterscheiden zwischen verschiedenen Produktionsbereichen, deren Produktionswerte in der Regel in monetären Einheiten angegeben werden. Mit der Input-Output-Analyse lassen sich nun aus diesen Verknüpfungen die Produktionswerte aller Produktionsbereiche für einen gewünschten Output ermitteln (z. B. Wärme aus Umgebungsluft, Strom aus Wasserkraft). Aus diesen kumulierten Produktionswerten können dann die gewünschten Stoff- und Energieströme ermittelt werden. Da Input-Output-Tabellen alle wirtschaftlichen Aktivitäten und damit Verflechtungen einer Volkswirtschaft enthalten, werden damit prinzipiell alle Vorgänge zur Herstellung eines bestimmten Produktes berücksichtigt. Dabei stellen aber die unterschiedenen Produktionsbereiche eine Mittelung über eine Vielzahl (weitgehend unbekannter) technischer Prozesse dar.

Um die Vorteile beider Verfahren im Rahmen eines Hybridansatzes auszunutzen, kommt im wesentlichen die Prozeßkettenanalyse aufgrund der damit erzielbaren deutlich höheren Genauigkeit für eine bestimmte Bereitstellungskette zur Anwendung. Zusätzliche Aufwendungen, die aus methodischen Gründen oder wegen eines zu hohen Arbeitsaufwandes nicht erfaßt werden können (z. B. Energieaufwand für die Beheizung des Büros des eine Biomasseanlage planenden Ingenieurs), werden mit der Input-Output-Analyse erhoben. Dabei sollte der Anteil am Gesamtergebnis einer Bilanz, der mit der Input-Output-Analyse bestimmt wird, aufgrund der methodenimmanenten Unschärfe klein sein im Vergleich zu dem Anteil, der auf der Basis der Prozeßkettenanalyse ermittelt wird.

Die Ergebnisse derartiger Bilanzen können durch bestimmte Umweltkenngrößen zusammengefaßt werden. Nachfolgend werden die hier exemplarisch ausgewiesenen Größen definiert.

- Der Energieaufwand an erschöpflichen Energieträgern (d. h. Erdöl, Erdgas, Steinkohlen, Braunkohlen, Uran) für die Deckung einer gegebenen Energienachfrage, bei der alle Energieströme von der Quelle bis zur Senke bilanziert werden, kann unter dem Aspekt »Verbrauch erschöpflicher Energieträger« bezogen auf die bereitgestellte End- bzw. Nutzenergie zusammengefaßt werden. Die unterschiedlichen fossilen Energieträger werden dabei über ihren (unteren) Heizwert aggregiert. Strom aus Kernkraftwerken wird über einen Wirkungsgrad von 33 % in Primärenergie umgerechnet.
- Aus Sicht der verursachten Umwelteffekte kann eine Möglichkeit zur Energienachfragedeckung auch durch die damit im Verlauf des gesamten Lebensweges freigesetzten Stoffe (d. h. Emissionen) beschrieben werden. Von der Vielzahl möglicher Emissionen in Boden, Wasser und Luft werden hier nachfolgend jedoch nur einige wenige luftgetragene Stofffreisetzungen mit klimarelevanten und mit versauernder Wirkung betrachtet.
- Klimawirksame Spurengasfreisetzungen, die zum anthropogen verursachten (d. h. zusätz-

lich zum natürlichen) Treibhauseffekt beitragen können, lassen sich entsprechend der Klimawirksamkeit der Einzelsubstanzen relativ zu einer Referenzsubstanz (in diesem Falle CO_2) zusammenfassen. Hier wird die gewichtete Summe aus Kohlenstoffdioxid (CO_2 , 1 kg CO_2 -Äqu./kg CO_2), Methan (CH_4 , 21 kg CO_2 -Äqu./kg CH_4) und Distickstoffoxid (N_2O , 310 kg CO_2 -Äqu./kg N_2O) bei einem Bezugszeitraum von einhundert Jahren in Form von CO_2 -Äquivalenten angegeben. Kohlenstoffdioxid aus Biomasse wird dabei nicht bilanziert, da das hier freigesetzte Kohlenstoffinventar zuvor beim Pflanzenwachstum – eine nachhaltige Biomasseproduktion unterstellt, wie sie in Deutschland und Europa (und nicht notwendigerweise in einigen Entwicklungsländern) gegeben ist – aus der Atmosphäre entnommen wurde.

- Gase mit Säurebildungspotential wirken versauernd auf Böden und Gewässer und damit u. a. auf terrestrische Ökosysteme. Stofffreisetzungen mit derartigen Eigenschaften können – gewichtet mit ihrem jeweiligen Versauerungspotential – zu SO_2 -Äquivalenten zusammengefaßt werden. Hierbei werden Schwefeldioxid (SO_2 , 1 kg SO_2 -Äqu./kg SO_2) als Referenzsubstanz, Stickstoffoxid (NO_x , 0,7 kg SO_2 -Äqu./kg NO_x), Ammoniak (NH_3 , 1,88 kg SO_2 -Äqu./kg NH_3) und Chlorwasserstoff (HCl , 0,88 kg SO_2 -Äqu./kg HCl) berücksichtigt.

Abbildung 10 zeigt den Verbrauch erschöpfbarer Primärenergieträger für die untersuchten Optionen einer Strom- und gegebenenfalls Wärmeerzeugung aus unterschiedlichen Bioenergieträgern. Deutlich wird, daß mit fast allen Optionen (Ausnahme Rapsölmethylester) deutlich mehr (Nutz-)Energie bereitgestellt wird, als in Form fossiler (Primär-)Energie eingesetzt wird. Damit ermöglichen fast alle hier untersuchten Optionen einen merklichen Beitrag zum Ressourcenschutz. Dabei gibt es zwischen den einzelnen Optionen durchaus Unterschiede. Beispielsweise ist aus Sicht der Energiebilanz eine Energiebereitstellung aus Rapsölmethylester verglichen mit den anderen untersuchten Optionen ungünstiger (die Bereitstellung des

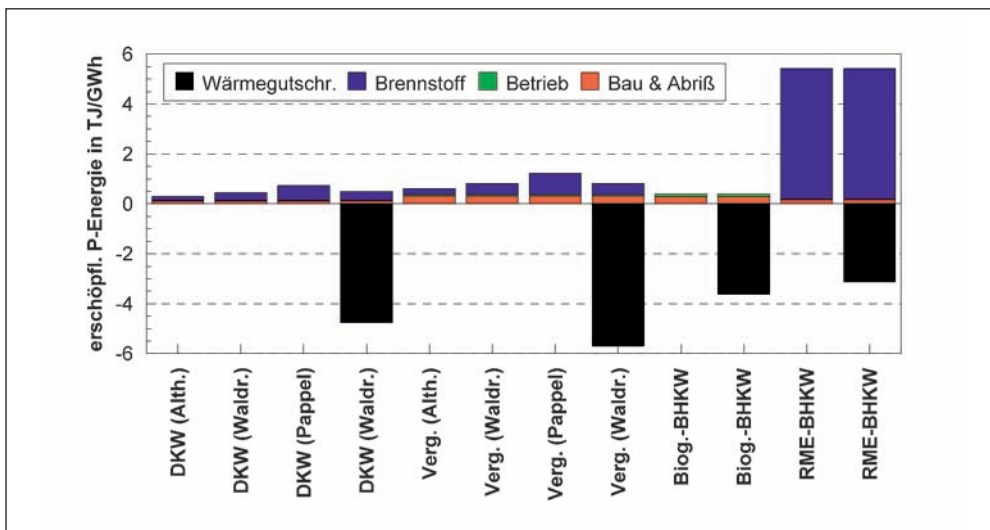


Abb. 10 Verbrauch erschöpflicher Primärenergieträger der untersuchten Referenztechnologien (DKW: Dampfkraftwerk, Verg.: Vergasungsanlage, Biog.: Biogasanlage, Alth.: Altholz, Waldr.: Waldrestholz, Pappel: Pappel-Kurzumtriebsplantage)

RME bzw. des Biodiesels ist vergleichsweise [energie-]aufwendig). Verglichen damit ist der Einsatz fossiler Primärenergie bei den anderen Optionen in einer ähnlichen Größenordnung. Tendenziell etwas geringer ist der fossile Primärenergieeinsatz bei dem Dampfkraftwerk und etwas höher bei der Vergasungsanlage. Deutlich wird auch, daß die Energiebilanz bei allen Optionen (Ausnahme Biogas) durch den Energieaufwand für den Biobrennstoff dominiert wird. Damit ist die Energiebilanz um so ungünstiger, je höher der Energieaufwand für die Biobrennstoffbereitstellung ist (d. h. zunehmende Tendenz von Altholz über Waldrestholz und Pappel-Kurzumtriebsplantagenholz bis zu RME). Abbildung 10 zeigt aber auch den z. T. erheblichen Einfluß einer Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) auf das Bilanzergebnis. Wird die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme genutzt und ersetzt – z. B. über ein Nah- bzw. Fernwärmenetz Wärme verteilt, die ansonsten lokal aus leichtem Heizöl oder Erdgas bereitgestellt werden müßte –, ergibt sich eine negative Energiebilanz, d. h., zur Wärme- und Strombereitstellung wird in diesem Fall überhaupt keine fossile Primärenergie mehr benötigt, sondern diese in einem durchaus erheblichen Ausmaß ersetzt. Aus Gründen einer Schonung der begrenzten Ressourcen an fossilen Energieträgern ist damit eine Kraft-Wärme-Kopplung eine wünschenswerte Option.

Ausgehend von der in Abbildung 10 dargestellten Energiebilanz lassen sich die in Abbildung 11 gezeigten Emissionen an klimarelevanten Spurengasen, die für den anthropogenen Treibhauseffekt verantwortlich gemacht werden, berechnen. Hierbei zeigt sich – aufgrund der weitgehenden Kopplung der Klimagasemissionen an den fossilen Primärenergieeinsatz (die Klimagasemissionen werden – weitgehend – dominiert durch die CO₂-Emissionen, die wiederum – notwendigerweise, da der fossile Kohlenstoff unter Energiefreisetzung zu CO₂ oxidiert wird – mit dem fossilen Primärenergieeinsatz gekoppelt sind) – ein zu Abbildung 10 tenden-

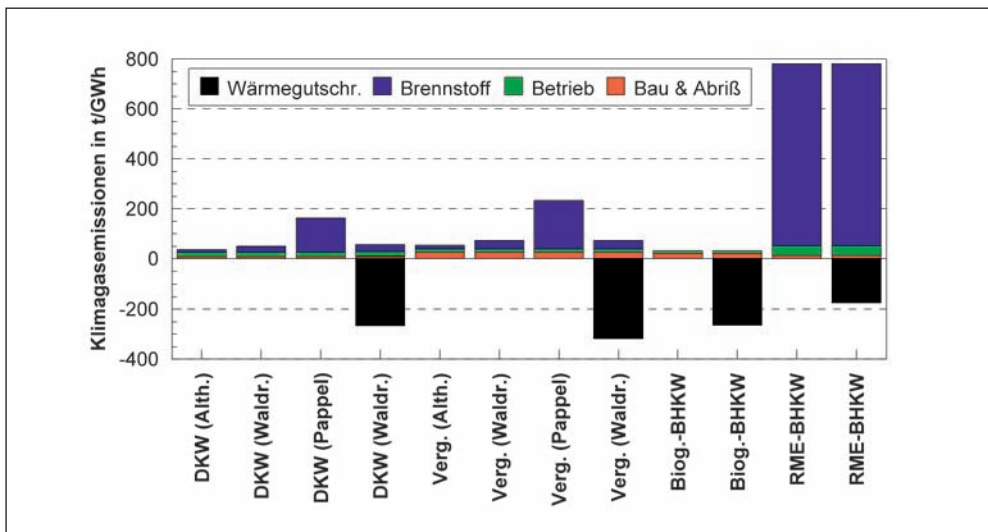


Abb. 11 Klimagasemissionen der untersuchten Referenztechnologien (DKW: Dampfkraftwerk, Verg.: Vergasungsanlage, Biog.: Biogasanlage, Alth.: Altholz, Waldr.: Waldrestholz, Pappel: Pappel-Kurzumtriebsplantage)

ziell vergleichbares Bild. Eine Energiebereitstellung aus RME ist folglich mit den höchsten Klimagasfreisetzungen verbunden. Verglichen damit sind alle anderen Optionen mit deutlich geringeren Emissionen an Klimagasen verbunden.

Auch hier wird das Ergebnis wieder durch den Einfluß des Biobrennstoffs dominiert. Ist der Bioenergieträger (energie-)aufwendiger bereitzustellen, ist die Klimagasbilanz ungünstiger (d. h. die Emissionen höher), als wenn dies nicht der Fall ist. Gleiches gilt sinngemäß auch für eine Kraft-Wärme-Kopplung. Demgegenüber ist der Einfluß der Anlagenherstellung (d. h. des Baus der Konversionsanlage einschließlich der Materialbereitstellung) vergleichsweise gering. Einen merklichen Beitrag leistet der Bau der Konversionsanlage nur bei der Vergasungsanlage (wegen der – noch – vergleichsweise hohen Materialintensität aufgrund des relativ frühen Standes der Technik verglichen beispielsweise mit dem Dampfkraftwerk) und der Biogasanlage (wegen der nicht vorhandenen Klimagasemissionen aus der genutzten Gülle).

Entsprechend können auch die Emissionen mit versauernder Wirkung ermittelt werden. Sie sind in Abbildung 12 dargestellt. Auch hier zeigen sich grundsätzlich ähnliche Zusammenhänge. Wieder ist eine Energiebereitstellung aus Rapsölmethylester (RME) durch die höchsten Emissionen gekennzeichnet. Jedoch sind hier die Unterschiede zu den anderen untersuchten Optionen nicht ganz so groß. Dabei werden auch hier die Emissionen weitgehend durch den Betrieb bestimmt (Ausnahme: RME-BHKW). Dies sind bei dem Dampfkraftwerk und der Vergasungsanlage im wesentlichen die Stickstoffoxid-Emissionen, die bei der Verbrennung von Biomasse entstehen und an die Umwelt abgegeben werden. Bei der Biogasanlage sind es ebenfalls die Stickstoffoxid-Emissionen, die bei der Verbrennung des Biogases im BHKW entstehen. Im Vergleich zu den Klimagasbilanzen ist hier der Einfluß der KWK auf die Gesamtemissionen nicht so hoch.

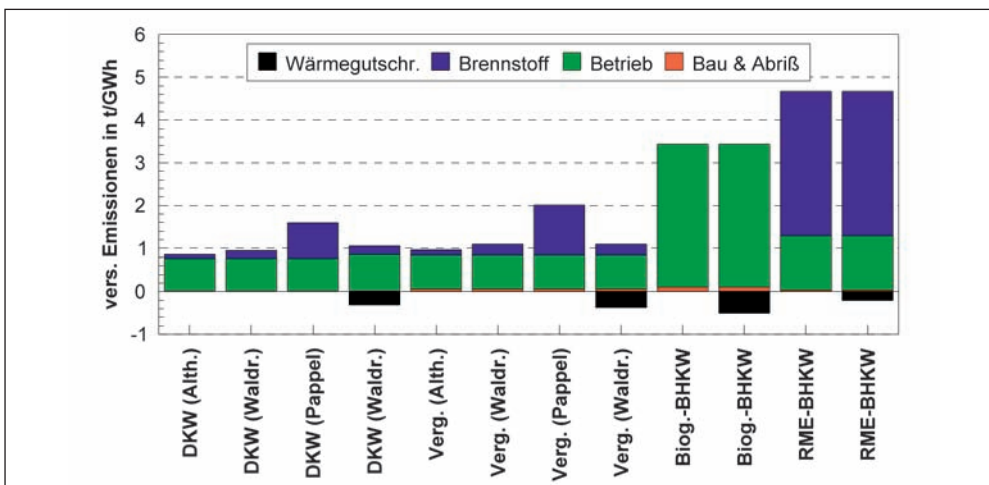


Abb. 12 Versauernde Emissionen der untersuchten Referenztechnologien (DKW: Dampfkraftwerk, Verg.: Vergasungsanlage, Biog.: Biogasanlage, Alth.: Altholz, Waldr.: Waldrestholz, Pappel: Pappel-Kurzumtriebsplantage)

5. Ausblick

Ziel dieser Ausführungen ist es, die Möglichkeiten einer Energiebereitstellung aus Biomasse anhand technischer, ökonomischer und ökologischer Kenngrößen sowie der Potentiale und deren Nutzung zu analysieren.

Die erzielten Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die Technik insbesondere zur Wärme-, aber auch zur Strom- und Kraftstofferzeugung aus Biomasse ist für eine ganze Reihe von Möglichkeiten vorhanden und z. T. kommerziell verfügbar. Dies gilt bei der Nutzung von biogenen Festbrennstoffen insbesondere für eine Wärmebereitstellung über die Verbrennung. Eine Strombereitstellung aus fester Biomasse in konventionellen Verbrennungsanlagen mit einem in der Kraftwerkstechnik üblichen Dampfprozeß ist ebenfalls Stand der Technik ebenso wie eine Produktion und Nutzung von Biogas. Demgegenüber befindet sich die Stromerzeugung durch Vergasung fester Bioenergieträger und den Einsatz des Schwachgases in Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen noch im Demonstrationsstadium und durch Pyrolyse noch weitgehend im (Grundlagen-) Forschungsstadium. Auch eine Kraftstoffbereitstellung in Form von PME ist Stand der Technik und marktgängig. Demgegenüber ist eine großtechnische Produktion und Nutzung von (Bio-)Ethanol aus zucker- und stärkehaltiger Biomasse in Deutschland (noch) nicht marktgängig, und eine Ethanolproduktion aus cellulosehaltiger Biomasse befindet sich ebenso wie ein Einsatz von Biogas und Bioöl im Traktionsbereich noch in der Entwicklung.
- Alle untersuchten Optionen sind durch vergleichsweise hohe technische Potentiale sowohl auf Seiten der biogenen Rohstoffe als auch der daraus resultierenden Strom-, Wärme- und Kraftstofferzeugungspotentiale gekennzeichnet. Dem steht eine bisher nur sehr eingeschränkte Nutzung gegenüber, die bei verschiedenen Optionen einer Energiebereitstellung aus Biomasse aber durchaus unterschiedlich ist. Damit steht von Seiten der vorhandenen Potentiale einer deutlich weitergehenden energetischen Nutzung von Biomasse im Energiesystem von Deutschland nichts im Wege.
- Werden die Möglichkeiten einer Energiebereitstellung aus Biomasse anhand ökonomischer Größen verglichen, zeigen sich z. T. erhebliche Unterschiede bei den resultierenden Energiebereitstellungskosten. Unter bestimmten Randbedingungen kann aber beispielsweise eine Wärme- und/oder Strombereitstellung aus fester Biomasse über einen Dampfkraftprozeß oder eine Biogaserzeugung relativ kostengünstig sein. Dies ist einer der Gründe für die z. T. schon weitgehende Nutzung, die zusätzlich durch die derzeitige Setzung der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen (u. a. *Erneuerbare-Energien-Gesetz* [EEG]) von staatlicher Seite forciert wird.
- Der Vergleich ökologischer Kenngrößen macht deutlich, daß die untersuchten Möglichkeiten zur Energiebereitstellung aus Biomasse zur Entlastung der Umwelt beitragen können – jedoch in einem unterschiedlichen Ausmaß. Einen spezifisch besonders hohen Beitrag zu einer zukünftig klimaverträglicheren Energiebereitstellung kann eine Stromerzeugung aus fester Biomasse über einen konventionellen Dampfprozeß und eine Biogaserzeugung und -nutzung leisten. Dies gilt jedoch nur eingeschränkt für eine Stromerzeugung aus Rapsölmethylester aufgrund der aufwendigen Bereitstellung dieses flüssigen pflanzenölbasierten Kraftstoffs frei Konversionsanlage.

Zusammengenommen erscheint damit eine Energiebereitstellung aus Biomasse auf der Basis der hier analysierten Kenngrößen sehr vielversprechend. Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund der Tatsache, daß viele Optionen zur Biomassenutzung im Rahmen laufender und zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in der nahen Zukunft zunehmend günstigere technische, ökonomische und ökologische Rahmendaten aufweisen werden. Biomasse kann damit zu einer zukünftig umwelt- und klimaverträglichen Energieversorgung in Deutschland und Europa beitragen. Dies gilt auch – wird eine moderne Konversionsanlagentechnologie unterstellt – weltweit. Deshalb kommt der Biomasse auch im Rahmen von JI (*Joint Implementation*) und CDM-Maßnahmen (*Clean Development Mechanism*) besondere Bedeutung zu.

Literatur

- Deutsches Institut für Normung* (DIN, Hrsg.): DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Produkt-Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Berlin: Beuth 1997
- FRISCHKNECHT, R., HOFSTETTER, P., KNOEPFEL, I., DONES, R., und ZOLLINGER, E.: Ökoinventare für Energiesysteme. 3. Aufl. Zürich 1996
- KALTSCHMITT, M., und HARTMANN, H. (Eds.): Energie aus Biomasse. Berlin, Heidelberg: Springer 2001
- KALTSCHMITT, M., und REINHARDT, G. A. (Eds.): Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg 1997
- KALTSCHMITT, M., und THRÄN, D.: Biomasse für Strom, Wärme und Kraftstoff – Was kann die Land- und Forstwirtschaft bereitstellen? Deutscher Bauerntag, Freiburg, Juli 2003, Tagungsband
- NEUBARTH, J., und KALTSCHMITT, M. (Eds.): Regenerative Energien in Österreich – Systemtechnik, Potentiale, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Wien: Springer 2000

Prof. Dr. Ing. Martin KALTSCHMITT
Institut für Energetik und Umwelt (IE)
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 341 2434113
Fax: +49 341 2434133
E-Mail: mk@ie-leipzig.de

Kernenergienutzung – ein nachhaltiger Irrtum der Geschichte?

David GUGERLI (Zürich)



Zusammenfassung

Die Geschichte der zivilen Kernenergienutzung sorgt seit einem halben Jahrhundert für große Überraschungen. Die 'Atoms for Peace', denen EISENHOWER 1953 einen zukunftsreichen Weg bereiten wollte, sind seither nicht nur in nützlicher Weise gespalten worden – sie führten ihres technokratischen Pazifismus zum Trotz immer wieder zu Spaltungsvorgängen in jenen Gesellschaften, die sich ihrer bedient haben. Eine historisch-kritische Überprüfung dieser soziotechnischen Spaltungsprozesse fördert erstaunlich nachhaltige Schiefereien der Entscheidungsgrundlagen zutage, welche von Gegnern und Befürwortern aus ihrem jeweiligen Erwartungshorizont abgeleitet worden sind. Ohne ihre Handlungsfähigkeit zu verlieren, haben sie sich an allen Ecken und Enden getäuscht, zum Beispiel über die Planbarkeit von Kraftwerken, die Sicherheit oder Unsicherheit der Anlagen, die Kostenstruktur der Energiemärkte, über die politischen Voraussetzungen und gesellschaftlichen Konsequenzen. Gemeinsam war beiden Lagern nur eines: die Einschätzung nämlich, daß ihre Gegner eine fundamentale Bedrohung der Gestaltbarkeit von Gesellschaft darstellten. Diese Wahrnehmung, so soll gezeigt werden, beruhte auf dem noch größeren Irrtum, daß technische und gesellschaftliche Entwicklungen unabhängig voneinander wahrgenommen, dargestellt und behandelt werden könnten.

Abstract

The history of atomic energy has been producing major surprises for at least half a century. A wave of atomic enthusiasm – which grew to a veritable atomic euphoria – was triggered by the famous atoms-for-peace speech by US president EISENHOWER in 1953. Despite their inherent technocratic pacifism, EISENHOWER's atoms led to critical conflicts within those societies that subscribed to the nuclear development scheme. A critical revision of these conflicts reveals a dramatic falling apart of the historic horizon of expectations and the historic development path. Notwithstanding, both the apologists of nuclear energy use and their antagonists have erred in many ways without truly losing their capacity to act. They misjudged the planning security, the safety of the installations, and the stability of the price relations on the energy and capital equipment markets. Moreover, both sides erred in their predictions concerning the political conditions and the social consequences of nuclear power plants. This observation is not historically insightful in the sense of learning from one's mistakes. It is insightful rather for the relationship between experience, expectation and decision on the one hand and socio-technical change on the other hand.

»Ein alter Traum der Menschheit ist in Erfüllung gegangen«, verkündete der Kernphysiker Paul SCHERRER anlässlich der Gründungsversammlung der schweizerischen Studienkommission für Atomenergie am 5. November 1945. »Es scheint«, so zitierte die *Neue Zürcher Zeitung* SCHERRERS Rede weiter, »als ob ein neues Zeitalter anbrechen wolle, das ›Zeitalter‹ der subatomaren Energie« (*Neue Zürcher Zeitung* 1945). Fantastische Erwartungen haben sich seither an solche und ähnliche Deklarationen geknüpft. Manche wollten bereits ihr Automobil von einem kleinen Reaktor angetrieben sehen, andere träumten von Kernenergienutzungen, die von atomaren Sprengsätzen für den Tunnelbau bis zur avantgardistischen Haushaltstechnik reichten. Staubsauger, Limousinen, Frachtschiffe, Schnellzüge und Raumfähren sollten alle dereinst mit der je notwendigen Dosis von Uran235-Tabletten geladen werden und auf lange Zeit hinaus einen Dienst versehen, der keine Nachschub- und Versorgungsprobleme kannte.

Wir wissen es längst: Einige dieser atomaren Zukunftsträume hatten lediglich den Effekt, die zeitgenössische *Science-Fiction*-Literatur um ein paar neue Versatzstücke zu erweitern. Andere aber begannen, ganze Heerscharen von Wissenschaftlern und Technikern über Jahrzehnte hinweg zu beschäftigen – in kernphysikalischen Laboratorien technischer Universitäten, an Versuchsreaktoren nationaler Interessengemeinschaften oder in den Planungsabteilungen industrieller Unternehmungen und staatlicher Bürokratien. Es besteht kein Zweifel: Auch fantastische Erwartungen und Träume erzeugen Aufmerksamkeitsmuster und kanalisieren Handlungen, wenn eine hinreichende Zahl von Akteuren das gleiche träumen und dieses ähnlich interpretieren.

Kein Traum also ohne Traumdeuter, kein neues wissenschaftliches Zeitalter ohne philosophische Anstrengung, keine Heilserwartung ohne ihre theologische Unterstützung. So bedachte etwa der Theologe und Rektor der Universität Basel, Ernst STAEHELIN, im Rektoratsprogramm von 1958 die hoffnungsvollen Träume von der »Entbindung der Atomenergie« mit folgendem Kommentar: »Ein solches Ausblicken und Hoffen auf die Vollendung aller Dinge [...] verleiht eine zuversichtliche Überlegenheit in allen Dunkelheiten und Ungelöstheiten der noch nicht erlösten Schöpfung; und eine solche freudige Gewissheit kann gerade auch in allen den Ungewissheiten und Ängsten, in die uns die Entdeckung und Entbindung der Atomenergie hineingeführt haben, für die Menschheit von grossem Segen sein.« (STAEHELIN 1958.)

Da Heilserwartungen und Weltuntergangsszenarien schon immer strukturell gekoppelt waren, steigerten sich auch bei der Kernenergienutzung Faszination und Schrecken wechselseitig und in unkontrollierbarer Weise. Auch STAEHELINS Hinweis auf die »Ungewissheiten und Ängste«, letztlich auch ein Hinweis auf die militärisch-zivile Janusköpfigkeit der Kernenergienutzung, deutet es an: Manch atomotechnologisch stimulierter Traum wurde überkritisch, ließ sich eigentlich gar nicht zu Ende träumen, oder endete unversehens im Alptraum, der als negative Eschatologie gewissermassen den Leibhaftigen selbst auf den Plan oder in die Spalten der Printmedien rief. »Morgen holt dich der Teufel!« prophezeite der rechtskonservative Publizist Günther SCHWAB schon 1968, und die populistische *Schweizer Illustrierte* stellte in ihrer Ausgabe vom 4. Mai 1970, also auf dem Höhepunkt der Atomkraftwerkplanungseuphorie, unter Berufung auf einen bundesdeutschen Experten, die erschreckende Titel-Frage: »Wird der Rhein zum Höllenstrom?« Der Artikel hielt, was sein Titel an Dramatik versprochen hatte: Martin ECKOLDT von der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz prophezeite, »spätestens Ende der siebziger Jahre wälze sich der Rhein als trübe, dampfende Brühe dem Meere zu [...] Das dann auf 40 bis 50 Grad erhitzte Rheinwasser werde einen üblen Faulschlammgeruch verbreiten. Dampfwolken würden aufsteigen und die Uferzonen in wal-

lende Nebel hüllen. Die letzten Fische würden durch Sauerstoffmangel eingegangen sein. Und daran würden die in Zukunft wie Pilze aus dem Boden schiessenden thermonuklearen Kraftwerke schuld sein.« (*Schweizer Illustrierte* 1970.)

Prognosen sind bekanntlich vor allem dann eine delikate Angelegenheit, wenn sie die Zukunft betreffen. Ungleich schwieriger zu beurteilen sind jedoch die Prognosen der Vergangenheit, also jene Voraussagen, welche sich auf eine uns längst abhanden gekommene, vergangene Zukunft beziehen. Eine ganze Palette von Fragen drängt sich hier auf: Was adressierten jene Prognosen, die unterschiedliche Akteure und Gruppen vor fünfzig, vierzig oder dreißig Jahren etwa zur Entwicklung der Kernenergienutzung formuliert haben? Was sagen sie uns über die Zeit, in der sie gemacht wurden? In welche Erwartungshorizonte stellten sich Entscheidungsträger und die von Entscheidungen Betroffenen bei der Formulierung ihrer jeweiligen Prognosen, von welchem andern sahen sie lieber ab? Von welchen Aufmerksamkeitsmustern und Motivationslagen hing ihr Handeln ab? Und warum entschieden sie so, wie wir es nachträglich rekonstruieren können, obwohl sie vielleicht auch anders hätten entscheiden können?

Die Beantwortung dieser Fragen ist immer eine Gratwanderung mit zahlreichen Absturzmöglichkeiten. Denn *erstens* läuft man Gefahr, allein aus der Perspektive der durch Schaden klug Gewordenen zu urteilen. *Zweitens* muß man aufpassen, den historischen Akteuren jenen Grad an Entscheidungsfreiheit nicht vorschnell abzusprechen, den wir für uns gerne in Anspruch nehmen möchten. Gleichzeitig ist – *drittens* – permanent daran zu denken, daß nicht alles, was Handlungen motiviert hat, immer auch an Entscheidungen gebunden war, und daß alle Handlungen auch nichtintendierte Folgen haben können. *Viertens* schließlich übersieht man leicht, daß das Verhältnis zwischen Prognose und Entscheidung ein eher loses ist und selbstredend nur im Falle eines eklatanten Irrtums, aber auch dann nicht immer, zum Nachdenken Anlaß gibt.

Die heutige Beurteilung einer historischen Zukunftserwartung ist also ein gefährliches Unternehmen und oszilliert stets zwischen naiver Rekonstruktion, einfühlsamer Apologie, entrüsteter Anklage und notdürftig beherrschtem Fatalismus. Und bei all diesen Gefahren steht immer auch etwas zur Debatte, mit dem wir zunächst nicht gerechnet hatten: die schlichte Frage nämlich nach der Einschränkung unserer eigenen Handlungs- und Entscheidungsfreiheit. Denn wenn Entscheidungen in der Vergangenheit allein von Zwängen bestimmt gewesen wären, dann gibt es keinen Grund zur Annahme, daß dies heute ganz anders sein sollte. Glauben wir jedoch – umgekehrt – an ein bestimmtes Maß an Entscheidungsfreiheit in der Vergangenheit, dann steigt sofort auch der gegenwärtige Rechtfertigungsdruck bei jeder anstehenden Wahl von Handlungsoptionen. Dann können und müssen wir Gesellschaft gestalten und uns selber Rechenschaft ablegen über das Wie und das Warum dieser Gestaltung.

Die Geschichte der Kernenergienutzung ist mit Sicherheit ein hervorragendes Beobachtungs- und Illustrationsfeld, ein hervorragender Reflexionsraum könnte man auch sagen, um solche Problemlagen zu untersuchen. Noch geht sie uns etwas an, und dennoch haben wir Distanz gewonnen zu ihren Argumenten und Selbstverständlichkeiten. Zudem handelt es sich um eine Geschichte, in der das Verhältnis von zukunftsgerichteten Entscheidungen zu den Erfahrungsräumen und Erwartungshorizonten, auf die sie Bezug genommen haben und in denen sie stattfanden, ein besonders brisantes gewesen ist (KOSELLECK 1989). Denn Prognosen, welche jeweils die strahlend helle oder die strahlend dunkle Zukunft des nuklearen Zeitalters in handliche Formate überführten, also die Zeitgenossen informierten, waren oft ebenso Ausgangslage für erfolgreiches Entscheiden, wie auch für katastrophale Irrtümer und für Einschätzungen, deren Rationalität in der Retrospektive nur als eine in hohem Maß gebundene

bezeichnet werden kann, eine Rationalität also, die heute kaum mehr in aller Selbstverständlichkeit vorzutragen wäre.

1. Spaltungsprozesse und Täuschungen

Zweifelsohne sorgt die Geschichte der Atomenergie seit einem halben Jahrhundert für große Überraschungen. Die »Atoms for Peace«, denen EISENHOWER in der Adventszeit des Jahres 1953 einen zukunftsfrächtigen Weg bereiten wollte, sind seither nicht nur in nützlicher Weise gespalten worden (HEWLETT und HOLL 1989). Sie führten – ihrem strategischen Pazifismus zum Trotz – immer wieder zu Spaltungsvorgängen sowohl in jenen Gesellschaften, die sich ihrer umstandslos bedient haben, wie auch in jenen, die sich der *Pax Americana* durch nationale Eigenentwicklungen zu entziehen versuchten. Eine historisch-kritische Überprüfung dieser soziotechnischen Spaltungsprozesse fördert erstaunlich nachhaltige Schieflagen zutage. Ohne je wirklich ihre Handlungsfähigkeit zu verlieren, haben sich Gegner wie Befürworter der Kernenergienutzung an allen Ecken und Enden getäuscht, z. B. über die relativen Veränderungen der Kostenstruktur von Kraftwerken, bei der Einschätzung der Volumen zukünftiger Energiemärkte und der Planbarkeit von Kernkraftwerken. Getäuscht haben sie sich auch über die Sicherheit der Anlagen, was hüben und drüben zu einem abenteuerlichen Einsatz des Risikobegriffs führte. Während manche nur noch vom unüberschaubaren Risiko des GAU sprachen, wurden andere nicht müde, der Berechenbarkeit von Gefahren das Wort zu reden. Überraschungen waren eine fast zwangsläufige Folge der Erwartungshaltungen. Gemeinsam war beiden Lagern nur eines: die Einschätzung nämlich, daß ihre jeweiligen Gegner eine fundamentale Bedrohung der Gestaltbarkeit von Gesellschaft darstellten. Es scheint, daß sich diese Annahme ebenfalls auf irrtümlichen Einschätzungen der Freiheitsgrade und Machtgefälle der andern gründete.

Ich werde im folgenden auf diese drei großen Themen – Gestaltbarkeit von Gesellschaft, Risiko der Technologie und Planbarkeit ihrer Anlagen – eingehen und erlaube mir dabei einen moderaten Helvetozentrismus. Dabei werden bestimmt einige Differenzen zu dem, was man gemeinhin auch als Welt bezeichnet, d. h. zur Entwicklung der Kernenergienutzung in Deutschland, in Frankreich, Großbritannien, Japan, Mexiko oder den USA, auffallen. Allerdings bin ich ziemlich sicher, daß sich zahlreiche Beobachtungen zum fraglichen Technisierungsprojekt erstaunlich leicht auch in globale Kontexte übertragen ließen.

2. Zum Problem der Gestaltbarkeit

Die vor einem halben Jahrhundert einsetzende Karriere der zivilen Nutzung der Kernenergie-technik war von einer Aufbruchstimmung gekennzeichnet, die für sehr viele Akteure Angebote bereit hielt zur Steigerung ihrer gesellschaftlichen Gestaltungsmöglichkeiten (EVERS und NOWOTNY 1987). In zahlreichen Ländern eröffnete sie insbesondere neue Politikfelder, denken wir etwa an nationale Innovationssysteme mit ihrer nationalen Wissenschafts- und Technologiepolitik. In einigen wenigen Fällen ließ sich diese nationale Ebene auf eine internationale Ebene ausdehnen, oder zumindest hegte man die Hoffnung, durch stark geförderte nationale Referenzmärkte auch zum *global player* in der *champions league* der Atommächte, Unterabteilung Zivile Nutzung, aufzusteigen. In der Schweiz, um hier mein exotisches Illu-

strationsbeispiel zu bemühen, träumte man davon, über eine bundesstaatlich koordinierte Industrie- und Wissenschaftspolitik in absehbarer Zeit eine schlagkräftige Kernkraftwerk-exportwirtschaft entwickeln zu können. Je mehr man allerdings mit diesem Anliegen in Rückstand auf die internationale Marschtabelle geriet, desto häufiger wurde die Bedeutung der inländischen Infrastrukturpolitik in den Vordergrund gerückt, desto mehr sprach man von der kerntechnologischen Sicherung der nationalen Unabhängigkeit (WILDI 2003).

Schon zu Beginn der 1960er Jahre hätte man abschätzen können, daß man damit auf verlorenem Posten stand. Es wurde jedoch munter weiter gefördert und fröhlich in jenes großindustrielle Experiment investiert, welches 1969 in Lucens durch einen unerwarteten Kontrollverlust im Reaktor des Versuchskraftwerks beendet werden mußte. Ich möchte hier nicht von einem kollektiven Irrtum sprechen, obwohl rund 120 Firmen sich am Experiment »Lucens« beteiligt hatten und dort auch die stolze Summe von 120 Millionen Franken investieren ließen. Der Irrtum, auf den ich unter dem Stichwort »Gestaltbarkeit« hinweisen möchte, hat auf einer ganz andern Ebene stattgefunden und betraf die Fehleinschätzung, daß es einen nationalen Weg in die atomare Zukunft geben könne, bei dem der Bundesstaat gleichzeitig Industriepolitik, Energiepolitik, Umweltpolitik, Regionalpolitik und Wissenschaftspolitik, vielleicht sogar auch noch Sicherheitspolitik betreiben könne, indem er schlicht und einfach eine nationale Technologieentwicklung subventionierte und koordinierte, welche sich auf Kernkraftwerke und ihr nukleartechnisches Umfeld konzentrierte. Die zivile Nutzung der Kernenergie stellte ein Politikfeld dar, das ein gewaltiges Potential an gesellschaftlicher Gestaltbarkeit eröffnete. Diese Hoffnungen waren keineswegs unberechtigt – eine erfolgreiche schweizerische Kernenergieentwicklung hätte tatsächlich viele der genannten Handlungsfelder gründlich umgepflügt. Geirrt haben sich die verantwortlichen Bundesbehörden nicht im Potential ihrer Technologiepolitik, geirrt haben sie sich bei der Einschätzung der Stabilität, Resistenz und Mobilisierbarkeit von politischen Verhältnissen, wie sie lange vor dem *Atoms-for-Peace*-Programm sich entwickelt hatten. Die bundesstaatliche Kernenergiepolitik als Mittel gesellschaftlich-politischer Umgestaltung scheiterte an überkommenen wirtschaftlichen, politischen und rechtlichen Strukturen, d. h. an systematischen Erwartungen, welche historisch gewachsen sind und schlecht mit den Koordinationsanforderungen und Koordinationsansprüchen der Kerntechnologie kompatibelisiert werden konnten. Die bundesstaatliche Hoffnung auf die nukleartechnische Gestaltbarkeit fiel in dem Moment zusammen, als die Gestaltbarkeit der gesellschaftlichen Verhältnisse zu einem kontroversen öffentlichen Thema mutierte.

Ein Gutteil des gegen die verschiedenen Kernkraftwerkprojekte gerichteten Widerstands wußte tradierte politische Strukturen für sich zu nutzen, war also strukturkonservativ ausgerichtet, obwohl die Motive für diesen partiellen Strukturkonservatismus aus einer grundsätzlichen Infragestellung der Traditionen entstanden sind. Man pochte auf demokratische Grundrechte, fürchtete sich vor dem Atomstaat und reklamierte ein ureidgenössisches Widerstandsrecht gegen die Kolonisierung der Lebenswelt, welche die sogenannte »Atomlobby« oder der energiewirtschaftlich-industrielle Komplex zu verantworten hätte. Während die Befürworter den Verlust von Rechtssicherheit beklagten, warnten die Gegner vor dem Abbau demokratischer Rechte – in beiden Fällen des Vorwurfs konstatierte man einen dramatischen Verlust an Gestaltbarkeit, den die Entscheidungen und zukunftsgerichteten Handlungen der jeweiligen Gegner zur Folge haben würden.

Und in beiden Lagern irrte man sich hinsichtlich der Kohärenz, der Schlagkraft und der Motive der Gegner. Dieser Irrtum beim ungeschützten Austausch von Schimpfwörtern wie

»anarchistische Chaoten« und »profitgierige Technokraten« nützte vermutlich den Kernkraftwerkgegnern mehr, als er den Befürwortern genützt hat. Die Vorstellung einer mächtigen, von Industrie, Wissenschaft, Militär und Staat geförderten Atomlobby muß bei jedem inzwischen möglich gewordenen Gang in die Archive der Kraftwerkbauer revidiert werden. Sie scheint jedoch selbst als Phantom den Widerstand nachhaltig motiviert und seine Kräfte gebündelt zu haben. Umgekehrt überschätzten die verschiedenen Kraftwerkbauer die Homogenität des Widerstandes und sahen nicht, aus wie heterogenen Motivationslagen er seine Partisanen mobilisieren mußte und konnte. Diese Fehleinschätzung engte den politischen Handlungsspielraum der Kernkraftbefürworter dramatisch ein, auch dann noch, als sie sich zu einem Marsch durch die politischen Institutionen und in die Kommissionsarbeit der Gesamtenergiekonzeption entschlossen hatten.

Um es überspitzt zu formulieren: Der wissenschaftlich-industrielle Komplex entdeckte seine politische Bedeutung viel zu spät, weil man viel zu lange an die selbstgenerierte Illusion einer apolitischen, reinen Technik und Fortschrittlichkeit geglaubt hatte. Und auf der andern Seite irrten sich die Gegner der Kernkraftnutzung insofern nachhaltig, als sie viel zu spät den Versuch aufgaben, die neugeschaffenen technischen Realitäten und Pfadabhängigkeiten der Kernenergienutzung als bloßen Vorwand zu denunzieren. Die Kosten dieses doppelten Irrtums werden eben jetzt erst, beim vorsichtigen und äußerst diffizilen Zurückbuchstabieren der Ausstiegsszenarien, evident.

3. Zum Problem des Risikos

Nachhaltige Folgen hatten auch Irrtümer, welche die Risiken der Kernenergienutzung betrafen. Daß man Risiken falsch einschätzen kann, ist nicht überraschend und soll hier gar nicht thematisiert werden. Interessanter scheint mir die Frage, inwiefern wir es bei der Risikodebatte, die bis hin zur soziologischen Theoriebildung bei BECK und LUHMANN unmittelbar an Auseinandersetzungen über die Gefahren der Kernenergie gebunden gewesen ist, schlicht mit einem kommunikativen GAU zu tun haben. Eine irrtümliche Verwendung des Risikobegriffs scheint gang und gäbe gewesen zu sein, wobei »irrtümliche Verwendung« hier nur eines heißen kann, nämlich die Verwendung einer Bedeutung, welche Verständigung erschwert hat oder eigenen Kommunikationsstrategien zuwider laufen mußte.

»Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Ihren Physiker oder Reaktortechniker.« – eine solche oder ähnlich lautende Delegation von Auskunftskompetenz wäre vielen willkommen gewesen, aber sie taugte deswegen nicht als Rezept gegen die »Atomangst«, weil diese keineswegs auf Informationsdefiziten beruhte. Manche Angst entstand ja erst dann, wenn man sich von den Utopien verabschiedet hatte und sich der Mühe unterzog, kerntechnisches Wissen zu erwerben. Andere Ängste wiederum entstanden völlig unabhängig von kerntechnischen Abläufen, ergaben sich aus den Voraussetzungen und möglichen politischen Folgen einer technisch zwar gut, gesellschaftlich aber nur schwach moderierten Kettenreaktion.

Einer der vielen verschiedenen Risikobegriffe versuchte in dieser Situation Klärung zu schaffen. So war es das erklärte Ziel der *Probabilistic Risk Assessment Studies* einen entlastenden, objektivierenden Effekt gegenüber den als diffus oder irrational empfundenen Ängsten zu erzielen (CARLISLE 1997). Die Debatte um die Sicherheit von Kernkraftanlagen sollte auf rationale, intersubjektiv überprüfbare Kriterien verschoben werden. Die PRA-Studies er-

reichten jedoch oft genug genau das Gegenteil. Besonders unglücklich war hierin der berühmte Rasmussen-Report. Norman C. RASMUSSEN, Professor am MIT, war 1971 von den US-amerikanischen Behörden damit beauftragt worden, die Wahrscheinlichkeit, daß es beim Betrieb eines Reaktors zu einem Unfall käme, zu beurteilen. RASMUSSEN versammelte rund 70 Experten u. a. aus Brookhaven, Battelle, den *Oak Ridge National Laboratories* und von *Science Applications Incorporated* und nahm im Sommer 1972 die Arbeit auf. Drei Jahre später wurden ihre 4 Mio. Dollar teuren Ergebnisse veröffentlicht. Mitten in einer inzwischen noch hitziger geführten Debatte über die Sicherheit von Kernkraftwerken vermochten eigentlich nur noch RASMUSSENS *Executive Summary* und seine eindrücklichen *risk charts* eine Rolle zu spielen. Der Report kann, wie Rodney P. CARLISLE dargestellt hat, als Erbe einer langjährigen Erfahrung mit Wahrscheinlichkeitsmethoden im *risk assessment* in der Physik, in der Versicherungsbranche, im *systems engineering* bei der NASA und im Militär, sowie in den für Ingenieure geschriebenen einschlägigen Handbüchern zur Kernenergie bezeichnet werden. Zum erstenmal jedoch kam ein solcher Bericht in derart prominenter und in so kontroverser Form an die Öffentlichkeit, daß er sofort einer Überarbeitung unterzogen werden mußte und von allen möglichen Seiten kritisiert wurde, selbstverständlich auch von seinen Überarbeitern.

Worin hatten sich RASMUSSEN und seine Kollegen geirrt? Der Irrtum lag meines Erachtens auf zwei eng miteinander verknüpften Ebenen: Fatal wirkte sich der Versuch aus, die relativ abstrakten Berechnungen von Pfaden der Eintretenswahrscheinlichkeit zuhanden des breiteren Publikums mit vertrauten Gefahren wie Verkehrsunfällen oder mit unwahrscheinlichen Gefahren wie Meteoriteneinschlägen zu vergleichen. Dies war ein Popularisierungsfehlgriff, könnte man sagen. Niemand hätte die hohe Eintretenswahrscheinlichkeit von Verkehrsunfällen bezweifeln wollen. Man konnte sich selber aber davon entlasten, indem man sie auf eine Individualpräferenz für schnelles Fahren zurückführte oder die eigene Angst vor dem Unfalltod mit einer individuellen Kontrollillusion abbaute. Meteoreinschläge hingegen stellten eine Gefahr dar, die nur mit Schicksalsschlägen verglichen werden konnte. Das Risiko eines großen kerntechnischen Unfalls war jedoch weder schicksalhaft, noch konnte es als individuell kontrollierbares oder individuell präferiertes Risiko dargestellt werden. Beide Mechanismen der Gefahrenkontrolle versagten angesichts einer nur kollektiv kontrollierbaren Technik; zudem, dies hatte RASMUSSEN ja eben gezeigt, konnte die Technik tatsächlich in angebbarem Maße außer Kontrolle geraten und würde dies mit zunehmender Kraftwerkzahl in absehbarer Zeit immer öfter tun. Der Unfall in Harrisburg sollte diese Einschätzung wenige Jahre später bestätigen, kurz nachdem der Hollywoodstreifen »China Syndrome« die Katastrophe bereits filmisch antizipiert hatte.

Der zweite Irrtum, dem die *Probabilistic Risk Assessors* erlagen, war die Annahme, daß transparente, wissenschaftliche Argumentation und Information Ängste abbauen konnte. Dabei verkannten sie die Tatsache, daß Kernenergienutzung eng an politische Präferenzen gebunden war und seit den 1950er Jahren eines der Flaggschiffe nationalstaatlicher Technologiepolitik darstellte. Die Diagnostiker jener gesellschaftspolitischen Verwerfungen, welche sich gegen Ende der 1960er Jahre und zu Beginn der 1970er Jahre in allen westlichen Wachstumsgesellschaften zu Wort meldeten, nahmen nicht umsonst eben dieses Flaggschiff ins Visier ihrer Kritik und begnügten sich nicht etwa damit, ein paar alte Schlauchboote zu versenken (KUPPER 2003b). Dies bedeutete, daß die Modellierung des Kernkraftwerkgegners als eines zutiefst verunsicherten Individuums mit einer stark irrationalen Angststruktur nicht adäquat war. Wenn es dieses Individuum überhaupt gab, dann war es allenfalls das Produkt der *Probabilistic Risk Assessment Studies*. Nachhilfeunterricht in Physik oder Aufklärung über

Risiken verfehlten ihr Publikum, weil es dieses so nicht gab. Die Objektivierung der Verhältnisse mußte ins Leere zielen. Deshalb schlug ja die Antwort der Gegner des schweizerischen Kernkraftwerks Kaiseraugst auf den vom Studienkonsortium für teures Geld gebauten Informationspavillon im wörtlichen Sinn wie eine Bombe ein. Die Unterscheidung zwischen sachlichem, objektivem und rationalem Wissen der Experten einerseits und emotional-feindlichem, kritisch-subversivem Wissen andererseits zieht sich wie ein roter Faden durch die Schriften der Kernkraftwerkplaner, die sich auf diese Weise den unerwartet vehementen Widerstand gegen ihre Projekte erklären wollten. »Allmählich eine objektive Volksmeinung herauszubilden, die unserem Projekt nicht emotional feindlich gegenübersteht«, war das von Ulrich FISCHER 1971 an einer Sitzung des Studienkonsortiums Kernkraftwerk Kaiseraugst formulierte Ziel. FISCHER hat sich, wie andere auch, bei der Zielfestlegung von einer ungeschickten Lagebeurteilung leiten lassen und sich deshalb, über viele Jahre hinweg, in der Wahl der Mittel geirrt. Fatal war dieser Irrtum für die Planer von Kernkraftwerken insofern, als er die Planbarkeit von ihren Anlagen nachhaltig bedrohte.

4. Zum Problem der Planbarkeit

Das Problem der Gestaltbarkeit hat uns auf eine sehr grundlegende gesellschaftliche Dimension der Kernenergie-debatte und eine ganze Reihe irrtümlicher Prognosen verwiesen. Und die genauere Betrachtung des Versuchs, Sicherheitsprobleme mit Hilfe des *Probabilistic Risk Assessment* zu behandeln, hat die Gründe für eine nichtintendierte Kommunikationsfolge freigelegt. Das Problem der sinkenden Planbarkeit, dem ich mich nun abschließend noch zuwenden möchte, lag dagegen auf einer vor allem für die Kernkraftwerkbauer relevanten, operativen Ebene. Aber auch hier, so wird zu zeigen sein, haben Fehleinschätzungen und falsche Analogieschlüsse fatale Folgen zeitigt.

Zunächst möchte ich behaupten, daß das Angebot der Kernenergietechnik – jedenfalls in der Schweiz – bereits in den 1960er Jahren in eine Schiefelage geraten ist, welche vehemente Konflikte und dramatische Mißerfolge unvermeidlich, Planbarkeit aber zur schlichten Illusion werden ließ. Eine schon in der kernenergiepolitischen Euphoriephase feststellbare schwache Kompatibilität von Kernkrafttechnik und gesellschaftlich-politischem bzw. institutionellem Kontext hat sich verstärkt durch den tiefgreifenden Wandel, den die Schweiz in den 60er und 70er Jahren erlebt hat. Diese Inkompatibilitäten konnten nicht abgebaut werden, sondern nahmen sogar noch zu.

Ein ganzes Bündel von Faktoren hat die bestehenden Inkompatibilitäten lange vor dem Auftauchen einer kollektiven Angst vor dem »Atomstaat« verstärkt. Die Offerte der Kernenergienutzung litt zum Beispiel *erstens* unter dem selbstgenerierten Zeitdruck, der durch den Run auf eine möglichst frühe Standort- und Betriebsbewilligung entstand. *Zweitens* machte sich eine fehlende kernenergietechnische Kompetenz vor allem der Bundesbehörden bemerkbar. *Drittens* tangierte das Kühlsystem der geplanten Kraftwerke den seit Beginn der 1960er Jahre gesellschaftspolitisch hochsensiblen Bereich des Gewässerschutzes. *Viertens* war die Entwicklung eines kommerzialisierbaren, »schweizerischen« Kernreaktors unter den Voraussetzungen der Innovationslandschaft der Schweiz nicht erfolgreich und führte bereits früh in eine industriepolitische Sackgasse. Und *fünftens* schließlich scheint das Bewilligungsverfahren für Kernkraftwerke das föderalistisch strukturierte politische System insbesondere dort stark überfordert zu haben, wo sich die Interessen einer Gemeinde, einer Region, mehrerer Kantone und des Bundesstaates überkreuzten, gegenseitig behinderten und oft genug auch lahm legten.

Beim Wettlauf der Ingenieurunternehmungen und Firmenkonsortien um den besten Platz an der nuklearen Sonne ist genau jene Planbarkeit abhanden gekommen, die der Planungseuphorie Pate gestanden hatte. Nach Einschätzung der Techniker entwickelten sich Elektrizitätswerke seit dem ausgehenden 19. Jahrhundert nach einem Stufenmodell, das von der städtischen Blockzentrale über das Laufkraftwerk am Fluß zu Speicherkraftwerken in den Alpen und von dort über ölthermische Kraftwerke für den Spitzenbedarf zu den die Grundlast abdeckenden Kernkraftwerken verlief, wobei jede Stufe für sich einer Logik der *economy of scale* folgen würde und – obwohl immer *ahead of demand* gebaut – die zukünftige Nachfrage präzise antizipieren könne. Eben darum hatte man in der Elektrizitätswirtschaft Zehnjahrespläne aufgestellt, die stets an der Grenze des Wachstums operierten und dabei genau diese Grenze planmäßig verschoben (GUGERLI 1994, 1996).

Es entsprach den bisherigen Erfahrungen der Kraftwerkbauer, daß mit zunehmender Größe der Kraftwerke zwar die Finanzierungsmodelle komplexer wurden; man wußte aber auch, daß Syndikate und Konsortien geeignete Instrumente zur Planung und Finanzierung von großen Kraftwerken darstellten. Gewiß, selbst traditionelle Wasserkraftwerke hatten sich in ein nicht immer freundliches politisches und ökonomisches Umfeld einzufügen, auch sie mußten auf ihre Anschlußfähigkeit achten. Aber in den meisten Fällen konnten sie die gesuchte Anschlußfähigkeit über kurz oder lang auch finden. Diese Erfahrung, so glaubten die im Bau konventioneller Kraftwerke seit Jahrzehnten geübten Ingenieurunternehmungen, würde sich auch auf die Kernkraftwerke übertragen lassen. Der Erwartungshorizont schien ihnen deshalb für den Bau von Kernkraftwerken im wesentlichen ungetrübt, ihre Handlungsoptionen präsentierten sich klar strukturiert, obwohl sich beides aus historisch unzulässigen Analogieschlüssen herleitete.

Die Planer von Kernkraftwerken gingen mit andern Worten irrtümlicherweise davon aus, daß sich die Bedingungen des Kraftwerkbaus und seiner Planbarkeit beim Übertritt ins »Atomzeitalter« nicht grundsätzlich ändern würden. Sie nahmen an, der Entwicklungspfad würde ihnen auch in Zukunft als Erfahrungsquelle und Sicherheitsspende für ihre Planungsarbeiten dienen. Das Gegenteil war jedoch der Fall. Mehr noch: Gerade der Verlauf des Entwicklungspfades selber war bei Kernkraftwerken sehr oft der Grund für eine nachhaltige Schiefelage der Projekte. Man hatte es plötzlich mit ganz neuen Altlasten früherer Entscheidungen, mit Pfadabhängigkeiten (ACKERMANN 2002, PUFFERT 2002) also, zu tun: Allein die Wahl des Standorts etwa, aber auch die Zusammensetzung des planenden und finanzierenden Konsortiums sowie die Wahl des Reaktortyps schlugen so solide Pflöcke in die Planungslandschaft ein, daß sie den verbleibenden Handlungsspielraum dramatisch einengten und manches Projekt nach vielen Jahren der Planung zum Fall brachten. Je länger die Projektierung nämlich dauerte, desto größer wurde die Diskrepanz zwischen dem, was inzwischen machbar gewesen wäre, und dem, was die vor Jahren festgelegten Parameter überhaupt noch zuließen, wenn man nicht mit den aufwendigen Bewilligungsverfahren wieder ganz von vorne beginnen wollte. Aber dies hätte einen unaufholbaren Rückstand gegenüber der Konkurrenz zur Folge gehabt und verbot sich gewissermaßen von selbst. Während sich die Reaktortechnik in atemberaubender Geschwindigkeit veränderte, mußten sich die Ingenieure in einem noch nicht gebauten, aber bereits bewilligten Betonkorsett, für das ein Reaktor mit ungenügender, unwirtschaftlicher Kapazität vorgesehen war, bewegen und die ursprünglich geplante Flußwasserkühlung auch noch mit einem teuren Kühlturm ersetzen, für den sie noch gar keine Baubewilligung hatten.

Festgezurt waren nicht nur wichtige Grundannahmen über Leistung, Moderationsform, An-

lage der Kreisläufe, Bauweise des Containments, Steuerungen und Kühlsysteme der jeweils zukünftigen Kraftwerke. Auch manche Konsortiumsmitglieder konnten nicht mehr durch besser geeignete Partner ausgetauscht werden. Sie hatten vielleicht einst als prominente Vertreter einer bestimmten, inzwischen aber veralteten Reaktorlinie im Konsortium Aufnahme gefunden und pochten nun auf die Einhaltung von Verträgen und hielten an ihren dysfunktionalen Beteiligungen und Stimmrechten fest. Solche Altlasten verhinderten eine Abkehr von ursprünglichen Präferenzen und erschwerten die Beweglichkeit der Planer zusätzlich. Nicht selten entwickelten sich deshalb Kernkraftwerke fast ausschließlich auf Papier, in Tabellen, Berechnungen, Protokollen, Aktennotizen, Memoranden, Expertisen, Zeitungsartikeln und Flugblättern und drehten sich in atemberaubenden Pirouetten um ihre Standortbewilligungen herum, wobei sie das Projekt mit jeder Volte weiter von seiner Realisierbarkeit wegbewegten. Pfadabhängigkeiten hatten im Geschäft des Kernkraftwerkbaus eine unerwartet große Bedeutung, die Projektgeschichte stellte sich immer wieder vor die Projektzukunft (KUPPER 2003a).

5. Schluß

Meine kursorischen Überlegungen zu den drei Beobachtungsfeldern Gestaltbarkeit von Gesellschaft, Risiko der Technologie und Planbarkeit ihrer Anlagen bestätigen die Vermutung, daß man bei der Kernenergienutzung durchaus von einem nachhaltigen Potential an Fehleinschätzungen, einem dramatischen Auseinanderfallen von historischem Erwartungshorizont und historischem Entwicklungspfad sprechen kann, und daß sich dabei eigentliche Kaskaden nachhaltiger Irrtümer ausmachen lassen. Mit Sicherheit kann man deshalb das Fragezeichen im Titel meines Vortrags streichen. Streichen sollte man in diesem Titel aber auch das Kollektivsubjekt »Geschichte«. Denn dieses verweist lediglich auf aggregierte Effekte, z. B. auf den Aufstieg und den Fall der Kernenergienutzung, wie er sich als Verlaufsform der *Construction Starts* darstellen läßt. Als Chiffre mag dies angehen, aber jede Chiffre verdeckt bekanntlich den Gegenstand, den sie bezeichnet. Interessanter wird es, und ich hoffe, Sie stimmen mir dabei zu, wenn wir danach fragen, wer sich wann, aus welchen Gründen, und auf welche Weise geirrt hat. Historisch aufschlußreich ist diese Analyse jedoch nicht als Grundlage eines moralischen Urteils der durch Schaden klug gewordenen, sondern vielmehr als Reflexionsraum, in welchem sich das Verhältnis von Erfahrung, Erwartung und Entscheidung im soziotechnischen Wandel bestimmen läßt.

Literatur

- ACKERMANN, R.: Pfadabhängigkeit, Institutionen und Regelreform. Freiburg i. Br. 1999
- CARLISLE, R. P.: Probabilistic risk assessment in nuclear reactors: Engineering success, public relations failure. *Technology and Culture. The International Quarterly of the Society for the History of Technology* 38/4, 920–941 (1997)
- EVERS, A., und NOWOTNY, H.: Über den Umgang mit Unsicherheit. Die Entdeckung der Gestaltbarkeit von Gesellschaft. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1987
- GUGERLI, D. (Ed.): Allmächtige Zauberin unserer Zeit: Zur Geschichte der elektrischen Energie in der Schweiz. Zürich: Chronos 1994
- GUGERLI, D.: Redeströme: Zur Elektrifizierung der Schweiz 1880–1914. Zürich: Chronos 1996
- HEWLETT, R. G., and HOLL, J. M.: *Atoms for Peace and War, 1953–1961: Eisenhower and the Atomic Energy Commission*. Berkeley: University of California Press 1989

- KOSELLECK, R.: »Erfahrungsraum« und »Erwartungshorizont« – zwei historische Kategorien. In: KOSELLECK, R. (Ed.): *Vergangene Zukunft. Zur Semantik geschichtlicher Zeiten*. S. 349–375. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1979 (1989)
- KUPPER, P.: *Atomenergie und gespaltene Gesellschaft: Die Geschichte des gescheiterten Projekts Kernkraftwerk Kaiseraugst*. Zürich: Chronos 2003a
- KUPPER, P.: Die »1970er Diagnose«: Grundsätzliche Überlegungen zu einem Wendepunkt der Umweltgeschichte. Erscheint in *Archiv für Sozialgeschichte* 43 (2003b)
- Neue Zürcher Zeitung*, 28. November 1945. Zitiert in: KUPPER, P.: *Atomenergie und gespaltene Gesellschaft: Die Geschichte des gescheiterten Projekts Kernkraftwerk Kaiseraugst*. S. 109–110. Zürich: Chronos 2003
- PUFFERT, D.: Pfadabhängigkeit in der Wirtschaftsgeschichte. In: HERRMANN-PILLATH, C., und LEHMANN-WAFFENSCHMIDT, M. (Eds.): *Handbuch zur Evolutorischen Ökonomik*. Heidelberg 2002
- Schweizer Illustrierte*, 4. Mai 1970
- STAEHELIN, E.: Das Problem der Atomenergie in der Sicht christlicher Theologie. In: *Rektoratsprogramm der Universität Basel für das Jahr 1958: Das Problem der Atomenergie (1958)*
- WILDI, T.: *Der Traum vom eigenen Reaktor: Die schweizerische Atomtechnologieentwicklung 1945–1969*. Zürich: Chronos 2003

Prof. Dr. David GUGERLI
ETH Zentrum ADM
Institut für Geschichte
Technikgeschichte
CH-8092 Zürich
Tel.: +41 1 6324249
Fax: +41 1 6321481
E-Mail: david.gugerli@history.gess.ethz.ch

Energie für unsere Zukunft – Was sollen und was können wir tun?

Klaus HEINLOTH (Bonn)

Mit 1 Abbildung und 1 Tabelle



Zusammenfassung

Ein Blick auf die natürlichen Energieflüsse auf der Erde zeigt uns Energie in verschiedenen Erscheinungsformen, zeigt uns, wie Energie wirkt und in welchem Umfang der Mensch die natürlichen Energieflüsse bereits nutzt. Der Blick zeigt uns auch, wie die inzwischen allzu reichliche Nutzung von Kohle, Erdöl und Erdgas zur Bereitstellung technischer Energien, Strom, Wärme und Treibstoffe über die entsprechende Anreicherung der Kohlendioxidkonzentration der Luft und die daraus resultierende zusätzliche Erwärmung im Treibhaus Erde die natürlichen Energieflüsse und damit vor allem das Klima bedrohlich beeinflusst. Diese Bedrohung kann abgebaut werden durch die Realisierung einer Vielzahl von Optionen verbesserter und neuer Energietechnologien zur Bereitstellung von elektrischer Energie, Heiz- und Prozeßwärme, Treibstoffen und Antrieb im Verkehr sowie auch von Trinkwasser und Nahrung, all dies unter erhöhtem Einsatz der erneuerbaren Energien (Sonnenlicht, Biomasse, Wasser- und Windenergie, Erdwärme) und der Atomkernbindungsenergien (Kernspaltung und vielleicht Kernfusion). Insgesamt müssen wir den Natur- und Kulturraum Erde endlich bewahrend gestalten, dies nicht zuletzt durch eine erhaltende Nutzung der natürlichen und der technischen Energieflüsse.

Abstract

Looking at the natural fluxes of energy on planet earth exhibits what energy is, which effects energy has and how much of the natural fluxes of energy are already in use by mankind. Furthermore this look exhibits too, how the meanwhile excessive consumption of coal, natural oil and natural gas – for providing any kind of technical energy like electricity, heat and fuels for the transportation sector – does influence natural energy fluxes: emission of carbon dioxide by burning fossil fuels leads to an increase of the concentration of carbon dioxide in the atmosphere. This leads to an additional greenhouse warming on earth, endangering for instance the present climate stability.

This threat can be reduced by realizing a manifold of improved and new energy technologies to provide electricity, room- and process heating, fuels and propulsion in the traffic sector, and furthermore drinking water and food. These technologies can be based on the largely extended use of renewable energy (solar light, biomass, hydro-, wind- and geothermal energy) and on nuclear energy (fission and possibly fusion).

Altogether we should furthermore treat our planet earth already cultivated by large in a sustainable way. This calls for a sustainable use of the natural as well as of all the technical fluxes of energy.

1. Was ist Energie?

Was Energie letztlich ist, das weiß man nicht. Man weiß nur, in welcher Vielfalt an Formen Energie erscheint und wie Energie aus diesen Formen heraus wirkt. Dies aber ist für uns höchst bedeutsam, lebensnotwendig.

Energie erscheint in Formen wie beispielsweise Licht, Wärme, Bewegungsenergie (fließendes Wasser, Blutkreislauf, fallender Regentropfen, fahrendes Auto, ...) und gespeicherte Energie (Gletschereis, Wasserspeichersee, Brennwerte von Kohle, Treibstoff, Biomasse, Zucker, sauerstoffbeladenes Hämoglobin im Blut,¹ Bindungsenergie von Atomkernen, ...). Energie jeder Form kann zu Energie jeglicher anderen Form mehr oder minder vollständig umgewandelt werden, wobei die Gesamtmenge an Energie vor und nach der Umwandlung in jedem Fall immer gleich hoch, also konstant bleibt. Dies sei an drei Beispielen erläutert.

Ein Beispiel aus der Natur ist der energieaufwendige Stoffwechsel von uns Menschen: Dabei wird die in Form energiereicher Makromoleküle, wie u. a. Proteine und Polysaccharide, eingesetzte Energie zu einem Teil, etwa einem Viertel, in kinetische Energie all unseres mit Bewegungen verbundenen Tuns und in potentielle Energie, diese in Form aufgebauter hochkomplexer Moleküle, umgewandelt. Der verbleibende Anteil an eingesetzter Energie wird direkt zu Abwärme. In Deutschland nimmt der Mensch in Form von Nahrung jeden Tag Energie in Höhe von im Mittel ca. 3500 kcal (sogenannte Verzehrkalorien) entsprechend ca. 4 kWh auf und strahlt ständig im Mittel ca. 130 W, im Lauf eines Tages also ca. 3 kWh, Abwärme ab.

Ein Beispiel des Energieerhalts bei Energieumwandlung in der Technik ist das Fahren eines Autos: Die Menge der für den Antrieb des Autos aufgewandten gespeicherten Energie in Form von Treibstoffverbrauch ist gleich der Menge an Energie insgesamt umgesetzt in Bewegungsenergie des Autos (typisch etwa ein Viertel der eingesetzten Energie) und in Abwärme von Motor und Auspuffgasen sowie Energieumsatz durch Abrieb der Räder auf der Straße und durch Luftreibung.

Ein Beispiel aus der Kosmologie ist der Gesamterhalt aller Energie im Universum. Diese Energie besteht zum einen aus der Ruhe- und Bewegungsenergie aller Massen von Sternen, schwarzen Löchern, interstellarem Gas und Teilchen aller Art sowie aus der Energie verschiedener Arten von Feldern und Strahlung, zum anderen aus der Gravitationsenergie, gespeichert im Zusammenhalt aller Massen und Energien im Universum. Die Summe all dieser Energien ist konstant,

$$\text{Energie (Massen, Bewegung, Strahlung) + Energie (Gravitation) = Konstante,}$$

und die Konstante ergibt sich (zumindest für ein geschlossenes Weltall) zu Null (analog zur Nullbilanz zwischen einer Schuldenaufnahme [negatives Kapital] und dem damit verfügbar gewordenen [positiven] Kapital).

Die Summe aller Energien im Universum ist zwar Null, aber im einzelnen sind all diese Energien und ihr Wirken, z. B. die Strahlung und die Gravitationswirkung der Sonne, für uns wahrnehmbar sehr groß. Auf die nun vielleicht naheliegende Frage, woher denn eigentlich die

¹ Robert MAYER hat als Schiffsarzt 1840 im äquatornahen, heißen Batavia, heute Jakarta (Indonesien), bei Aderlässen von Matrosen erkannt, daß das Maß des Farbunterschieds zwischen dem hellroten arteriellen und dem dunkler roten venösen Blut ein Maß für den Sauerstoffverbrauch für den, je nach Temperaturdifferenz zwischen Außentemperatur und Kreislauftemperatur des Menschen mehr oder minder hohen Energieumsatz zur »Heizung« des Menschen, also zum Unterhalt des menschlichen Kreislaufs ist.

Energievielfalt im Universum kommt, sei hier als eine mögliche Antwort eine spekulative Vorstellung genannt, die seit 30 Jahren zumindest die Köpfe vieler Physiker erhitzt (TRYON 1973, VILENKIN 1982): Als Ursprung aller Energien wird eine sogenannte Vakuumfluktuation angesehen, wobei im Rahmen der Heisenbergschen Unschärferelation z. B. ein Teilchen-Antiteilchen-Paar von Materiebausteinen aus dem Nichts kondensiert und nach einer sehr kurzen Zeit der Existenz, typisch etwa 10^{-20} s sich wieder zu Nichts auflöst. (Vakuumfluktuationen dieser Art sind seit langem verstanden und auch experimentell mit hoher Genauigkeit gemessen.)

Eine Lösung des scheinbaren Widerspruchs zwischen den winzig kleinen Massen und Zeitbeschränkungen einer üblichen Vakuumfluktuation und den riesig großen Massen im Weltall und den sehr langen Zeiträumen von etwa 14 Milliarden Jahren wird in einer weiteren spekulativen Vorstellung, die auch viele kluge Köpfe erhitzt, angeboten (GUTH 1981, 1997): Danach hat sich unser Universum in den ersten 10^{-35} s nach dem auf eine winzige Vakuumfluktuation reduzierten Urknall zunächst in einem hypothetischen Zustand extremer Unterkühlung exponentiell, »inflationär« hinsichtlich Volumen, positiver Energie (Strahlung, Massen, Bewegungsenergie bzw. Temperatur) und negativer Energie (Gravitationsenergie) aufgebläht, dies alles übrigens im Einklang mit der Erwartung aus Lösungen der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie. Erst danach, nach einem Phasenübergang, hat die weitere, heute noch zu beobachtende, »normale« abkühlende Expansion des Universums eingesetzt.

So diese Spekulationen sich zu Wissen erhärten werden, ist damit aber weder die Frage geklärt, was Energie letztlich ist, noch die Frage, worin die Naturgesetze, nach welchen alles Werden und Vergehen im Universum abläuft, ihren Ursprung haben.

2. Was bewirkt Energie?

Energie bewirkt die Expansion des Universums, wohl seit ca. 14 Milliarden Jahren, seit dem »Urknall« bis heute, und sie bewirkt dabei die Evolutionen im Universum, das Werden und Vergehen von Sternen und ihrer Planeten, wie beispielsweise von Sonne und Erde. Auf der Erde bewirkt Energie die Kreisläufe von Wasser, Wind und Biomasse, das Werden und Vergehen von Leben, dabei die stetige Neubildung von Ordnung, beispielsweise in Form von hochkomplexen Makromolekülen, von Organismen, von in Genen und im Gehirn gespeichertem und abrufbarem Wissen, dies alles auf Kosten von erhöhter Unordnung im gesamten System auf der Erde, letztlich durch die ständige, irreversible Entwertung von hochwertiger Energie in Form des auf die Erde eingestrahlt Sonnenlichts, aus der Lichtquelle der Sonnenoberfläche mit einer Temperatur von ca. $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$, zu Abwärme auf der Erdoberfläche bei typischen Umgebungstemperaturen von ca. 10 bis $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (entsprechend knapp 300 K) bzw. Wärmeabstrahlung aus z. B. 10 km Höhe bei Temperaturen von ca. $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (entsprechend ca. 220 K) in den ca. $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ (entsprechend ca. 3 K) kalten Weltraum.

Die Gesamtmenge an Energie bleibt dabei erhalten: Soviel Energie in Form von Sonnenlicht auf die Erde eingestrahlt wird, soviel Energie wird im zeitlichen Mittel von Tagen bis Wochen von der Erde wieder in den Weltraum abgestrahlt, zum kleinen Teil (ca. 30 % des eingestrahlt Lichts) in Form von vor allem an der Oberseite der Wolken reflektiertem Sonnenlicht, zum größeren Teil (ca. 70 % des eingestrahlt Lichts) in Form von Wärmestrahlung, letztlich aus großen Höhen von 10 km und mehr. Und diese Energie wird bei der durch

ihre Nutzung vermittelten Wertschaffung von der hohen Temperatur (hier des eingestrahltten Sonnenlichts) entwertet zur tiefen Temperatur (hier der von der Erde abgestrahlten Wärme).

Ein prosaisches Beispiel aus unserem täglichen Leben für den Gesamterhalt eines Gutes bei gleichzeitiger Entwertung des Gutes durch Nutzung ist Parfüm, das in hochkonzentrierter Form aus einem Fläschchen zu anregender Nutzung entnommen wird, sich dabei schnell immer mehr verdünnt, verflüchtigt, bis es wertlos, also zu verdünnt ist, um noch wahrgenommen werden zu können.

3. Energieflüsse auf der Erde

Die Energieflüsse auf der Erde sind in Abbildung 1 quantitativ dargestellt. (Alle Zahlenangaben in diesem Bild sind mehr oder minder grob gerundete Richtwerte.)

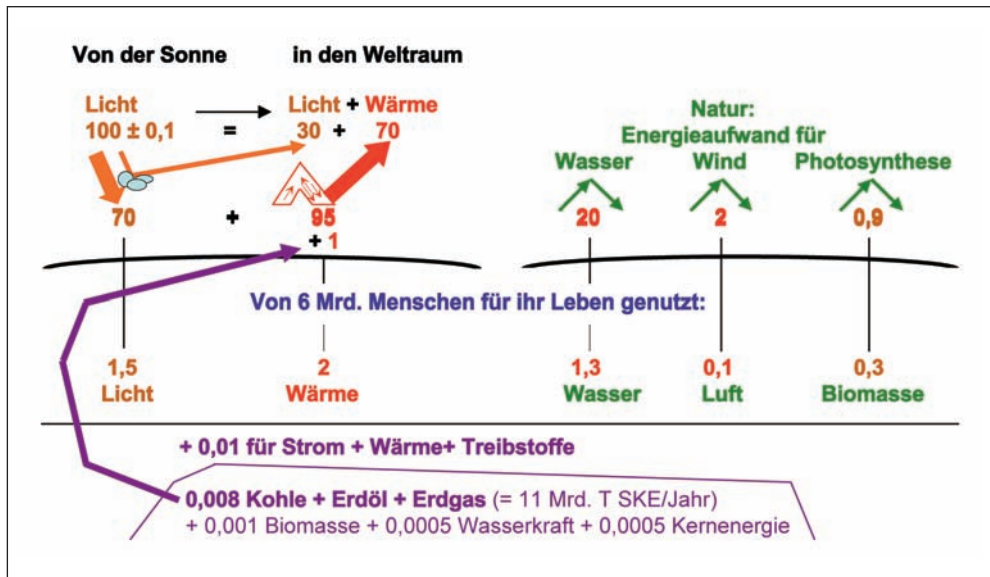


Abb. 1 Energieflüsse der Erde (alle Zahlenangaben in Einheiten von Prozent der Energiemenge, welche von der Sonne im Verlauf eines Jahres in Form von Licht auf die Erde eingestrahlt wird; 100 %: 5500000 EJ)

Die Energiebilanz zwischen Energieeinstrahlung von der Sonne auf die Erde und der Energieabstrahlung von der Erde in den Weltraum ist ausgeglichen (Abb. 1, obere Hälfte): Von den 100 % des von der Sonne auf die Erde eingestrahltten Lichts (die 1,38 kW pro m² Lichteinstrahlungsleistung summieren sich über die bestrahlte »Scheibe«, Erdradius² ⋅ π, über 1 Jahr zu 5 500 000 Exa-Joule [EJ]²) werden insgesamt ca. 70 % (20 % in der Atmosphäre, 50 % am Erdboden) absorbiert, in Wärme umgewandelt, von der dadurch erwärmten Erdoberfläche zunächst wieder als Wärmestrahlung abgestrahlt.

2 1 EJ = 10¹⁸ J. Zwei Beispiele mögen ein Gefühl für diese Energiemenge geben: 1 EJ ≈ 280 Milliarden kWh; das ist eine Energiemenge in Höhe von etwa der Hälfte der derzeit in Deutschland jährlich erzeugten und verbrauchten Menge an elektrischer Energie. 2,5 EJ entsprechen etwa dem Brennwert von 60 Millionen Tonnen Treibstoffen, welche derzeit jährlich in Deutschland im Straßenverkehr verbraucht werden.

Wäre dies die einzige Heizquelle der Erdoberfläche, so würde sich dadurch – gemäß dem wohlverstandenen Strahlungsgesetz von STEFAN und BOLTZMANN, welches die Wärmeabstrahlung eines warmen Körpers mit dessen Temperatur korreliert – eine Temperatur auf der Erdoberfläche im globalen und jahreszeitlichen Mittel von -18 °C (entsprechend 255 K) einstellen. Die tatsächliche Temperatur auf der Erdoberfläche beträgt aber im globalen jahreszeitlichen Mittel ca. $+15\text{ °C}$ (entsprechend 288 K). Diesen Temperaturhub von -18 auf $+15\text{ °C}$ verdanken wir dem natürlichen Treibhauseffekt³: Die Rolle der wärmestauenden Glasfenster spielen hier einige Spurengase in der Atmosphäre, vornehmlich Kohlendioxid mit gut drei Viertel und Methan plus weitere Spurengase mit knapp einem Viertel der primären Infrarot-Zusatzheizung, diese sekundär noch um gut einen Faktor 2 verstärkt durch Wasserdampf, letzterer gemäß der mit steigender Temperatur stark steigenden Verdunstung von Wasser. Diese natürliche Zusatzheizung im »Treibhaus Erde« durch Wärmerückstrahlung aus der Atmosphäre ist mit ihrem Gesamtwert, einer Energiemenge in Höhe von ca. 95 % der Sonnenlichteinstrahlung auf die Erde entsprechend, also sogar etwas höher als die direkte Heizung durch absorbiertes Sonnenlicht. Die an der Erdoberfläche durch Absorption von eingestrahlttem Sonnenlicht und von aus der Atmosphäre zurückgestrahlter Wärmestrahlung aufgenommene Energie wird zum größten Teil (ca. 80 %) durch Wärmeabstrahlung von der Erdoberfläche und zum verbleibenden kleinen Teil mittels latenter und direkter Wärmeflüsse in Form von aufsteigendem Wasserdampf und von warmer Luft nach oben abgeführt. Die Wärmeabstrahlung von der warmen Erdoberfläche entspricht gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz einer lebensförderlichen Temperatur in Bodennähe im globalen und jahreszeitlichen Mittel von -15 °C , wie beobachtet.

Im Vergleich zur genannten Heizung des Treibhauses Erde durch Sonnenlichteinstrahlung und Wärmerückstrahlung aus der Atmosphäre ist der Wärmefluß aus dem Erdinneren und aus der Erdkruste durch radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium, insgesamt pro Jahr etwa 1000 EJ, vernachlässigbar klein, etwa zehnmal kleiner als die Schwankungen der Lichteinstrahlung von der Sonne auf die Erde, diese im Verlauf von Monaten bis Jahren mit Werten von maximal etwa 1 Promille der mittleren Lichteinstrahlung auf die Erde.

Vom eingestrahnten Sonnenlicht und von der darauf fußenden Wärme auf der Erde werden die natürlichen Abläufe, Kreisläufe mit beträchtlichem Energieaufwand getrieben: Der *Wasserkreislauf* zwischen Verdunstung, Niederschlägen und Wasserablauf zu Land (ZEHNDER 2002 in PARTHIER 2002) benötigt allein zur Verdunstung Wärme in Höhe von etwa 20 % der eingestrahnten Sonnenenergie. In den *Windströmungen* steckt Bewegungsenergie in Höhe von etwa 2 % der eingestrahnten Sonnenenergie. Und der über das Jahr ausgeglichene *Kohlenstoff-Kreislauf* zwischen Neubildung, Absterben und Zerfall von biologischer Materie beruht auf der ständigen Photosynthese pflanzlicher Materie mittels des aus der Luft von Pflanzen aufgenommenen Kohlendioxids und des aus dem Boden aufgenommenen Wassers mit einem Aufwand an Licht in Höhe von knapp 1 % des eingestrahnten Sonnenlichts. Dabei ist über das Jahr auch der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre ausgeglichen zwischen Entnahme für

3 Treibhaus- bzw. Glashauseffekt: Wird ein Glashaus nur vom Sonnenlicht, durch die Glasfenster eingestrahlt, geheizt, so resultiert daraus eine Innentemperatur im Glashaus höher als die Außentemperatur, die ebenfalls durch Absorption von Sonnenlicht und daraus bewirkter Erwärmung resultiert. Dies hat folgenden Grund: Für das eingestrahlte Licht ist blankes Glas transparent, nicht aber für die aus dem erwärmten Inneren des Glashauses abgestrahlte Wärmestrahlung. Diese wird im Glas absorbiert und letztlich wieder ungerichtet abgestrahlt, nur zum Teil nach außen, zum Teil auch nach innen. Dadurch wird das Glashaus innen sowohl vom Licht als auch zusätzlich von der aus dem Glas zurückgestrahlten Wärme geheizt, was zu einer gegenüber außen erhöhten Innentemperatur führt.

Photosynthese und Freisetzung durch Veratmung und durch Zerfall abgestorbener biologischer Materie, von jeweils etwa einem Sechstel des mittleren Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre. Und von diesem Kohlenstoffkreislauf leben schließlich auch wir in unserem Werdegang zwischen Geburt und Tod.

Eine poetische Formulierung der stetigen, lebenspendenden Energiekreisläufe hat der amerikanische Dichter Robert FROST (FROST 1927 zitiert in THORNDIKE 1976) gegeben:

»Our life runs down
in sending up the clock.
The brook runs down
in sending up our life.
The sun runs down
in sending up the brook.
And there is something
sending up the sun.«

Nun zur Energienutzung seitens der Menschheit (Abb. 1, untere Hälfte): Wir Menschen, derzeit gut 6 Milliarden Erdbevölkerung, nutzen die natürlichen Energieflüsse und die natürlichen energiegetriebenen Kreisläufe in beträchtlichem Umfang. Die Verfügbarkeit von Licht, Wärme, Wasser, Luft und Biomasse ist uns selbstverständlich, nicht der Rede wert, weil wir diese Energie, diese natürlichen Güter der Natur scheinbar nicht bezahlen müssen. Vor allem von der ständig nachwachsenden Biomasse nehmen wir uns einen außergewöhnlich hohen Teil, von aller nachwachsenden Biomasse insgesamt etwa ein Drittel, von aller außerhalb der Wälder auf allen nicht bewaldeten Grünflächen der Erde nachwachsenden Biomasse bereits etwa zwei Drittel. Der Brennwert der gesamten jährlich mittels Photosynthese mit einem Aufwand an Lichtenergie in Höhe von ca. 50000 EJ wachsenden Biomasse beläuft sich brutto auf ca. 4500 EJ, abzüglich des Eigenverbrauchs der Pflanzen über Veratmung netto ca. 2900 EJ (entsprechend etwa 160 Milliarden Tonnen trockener Biomasse), davon knapp 60 % in Wäldern aller Art, knapp 30 % auf Grasland aller Art und gut 10 % auf landwirtschaftlichen Anbauflächen (HALL und RAO 1999).

Wenn wir Menschen von Energiebedarf reden, sogar viel reden, dann beziehen wir uns auf unseren – im Vergleich zu unserer Nutzung natürlicher Energieflüsse in Höhe von jährlich insgesamt ca. 5 %, bezogen auf die von der Sonne auf die Erde eingestrahlte Lichtenergie in Höhe von ca. 5,5 Millionen EJ, also etwa 300000 EJ winzigen – Bedarf an technischer Energie⁴ in Höhe von derzeit jährlich etwa 400 EJ zur Bereitstellung von Strom, Wärme, Treibstoffen und Gütern⁵ aller Art. Diese technische Energie – derzeit benötigt zu etwa zwei Drittel in den heutigen Industrieländern mit einem Anteil von knapp einem Viertel an der Weltbevölkerung und zu etwa einem Drittel in den heutigen Schwellen- und Entwicklungsländern mit deren Anteil von gut drei Viertel an der Weltbevölkerung – wird zum größten Teil letztlich wieder in (Ab-)Wärme umgewandelt, freigesetzt. Diese Energiemenge, entsprechend knapp 0,01 % be-

4 Mit dem hier und im folgenden benutzten Begriff »technische Energie« wird hier jegliche Art von Primärenergie bezeichnet, welche der Mensch zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Treibstoffen nutzt.

5 Dazu die Frage eines hochintelligenten Eingeborenen auf Neuguinea im Jahre 1972 an einen dort durch die tropische Landschaft wandernden amerikanischen Biologen: »Wie kommt es, daß ihr Weißen soviel Cargo (damit gemeint künstliche Güter und Techniken aller Art) erfunden und geschaffen habt, wir Schwarzen aber so wenig eigene Cargo haben?« (DIAMOND 2002.)

zogen auf die Sonnenlichteinstrahlung, erscheint vernachlässigbar klein, auch noch klein im Vergleich zu den Schwankungen der von der Sonne auf die Erde eingestrahlten Lichtenergie von maximal etwa 0,1 %. Etwa 80 % der 400 EJ an jährlich benötigter technischer Energie werden derzeit durch Kohle (24 %), Erdöl (35 %) und Erdgas (21 %) gedeckt, einem Brennwert von insgesamt 11 Milliarden Tonnen Kohle entsprechend.

Damit verbrauchen wir derzeit jährlich eine Menge an fossilen Rohstoffen, die die Natur vor einigen 100 Millionen Jahren im Verlauf von 1 bis 2 Millionen Jahren gespeichert hat. Die restlichen 20 % unseres Bedarfs an technischer Energie werden aus Biomasse (vor allem Brennholz) sowie aus Wasserkraft und Atomkernspaltungsenergie gedeckt. Sowohl aus Wasserkraft als auch aus Kernenergie werden derzeit jeweils etwa 17 % unseres weltweiten Strombedarfs gedeckt.

4. Künstliche Erwärmung im Treibhaus Erde

Leider ist die Verbrennung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas im derzeitigen Umfang in der Energiebilanz letztlich doch nicht vernachlässigbar. Kleine Effekte haben manchmal eine große Wirkung: Durch Freisetzung von Kohlendioxid, heute vornehmlich aus der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas – also aus Kohlenstoff, der seit einigen 100 Millionen von Jahren dem Kohlenstoffkreislauf entzogen und in der Tiefe der Erdkruste eingelagert ist – ist der Volumengehalt der Luft an Kohlendioxid von ursprünglich natürlichen ca. 0,28 Promille (noch vor etwa 200 Jahren, zu Beginn der Industrialisierung) auf derzeit bereits 0,37 Promille, also um etwa ein Drittel⁶, angestiegen. Dadurch und zusätzlich durch die auch aus menschlichen Aktivitäten resultierende Freisetzung weiterer wärmestrahlungsaktiver Spurengase, wie

- Methan (aus Reisfeldern, Rindermägen, Förderung von Erdgas, Erdöl und Kohle, Ausgasen von Permafrostböden und eventuell auch von Methanhydraten auf und in Meeresböden bei steigender Temperatur);
- Distickstoffoxid (aus Düngereinsatz, Biomasseverbrennung und Verbrennungsmotoren mit Katalysator-Abgasreinigung);
- Fluor-Chlor- und Fluor-Brom-Kohlenwasserstoffe (FCKW und Halone; eingesetzt z. B. in Klimaanlageanlagen und als Lösungs- und Reinigungsmittel: Herstellung und Einsatz inzwischen zumindest in Industrieländern auf internationaler Vertragsbasis eingestellt);
- Ozon in bodennahen Luftschichten (aus photochemischer Oxidation von Gasen wie Kohlenmonoxid, Methan und flüchtigen Kohlenwasserstoffen),

wurde die vorindustrielle Kohlendioxid-Äquivalent-Konzentration von ca. 0,35 Promille des Volumengehalts der Luft (Kohlendioxid 0,28 Promille + weitere Spurengase ca. 0,07 Promille Kohlendioxid entsprechend) derzeit schon auf ca. 0,50 Promille (Kohlendioxid 0,37 Promille + weitere Spurengase 0,13 Promille Kohlendioxid entsprechend) erhöht. Damit wurde die Infrarot-Rückstrahlungsheizung durch die Spurengase um ca. + 3 W/m² Erdoberfläche

6 Von der insgesamt – heute zumeist aus Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas – freigesetzten Menge an Kohlendioxid verbleiben auf Dauer naturgesetzlich bedingt (Henry-Dalton-Gesetz vom Partialdruck eines Gases über seiner Lösung) etwa eine Hälfte in der Atmosphäre; die andere Hälfte wird größtenteils im Wasser der Meere gelöst. Nur ein kleiner Teil von der Größenordnung 10 % wird über erhöhte Photosyntheserate zu Biomasse gewandelt (im Gleichlauf mit entsprechend erhöhter Freisetzung von Kohlendioxid über Veratmung und Zerfall von Biomasse).

(entsprechend um ca. 1 %) erhöht. Gleichzeitig wird zumindest auf der Nord-Halbkugel durch vermehrten Eintrag von Staub und Aerosolen in die Atmosphäre die Sonnenlichteinstrahlung um ca. -1 W/m^2 erniedrigt. Die netto resultierende Erhöhung der Heizleistung um ca. $+2 \text{ W/m}^2$ wird durch Erhöhung des Wasserdampfgehalts der Atmosphäre durch mit steigender Temperatur stark steigende Verdunstung (vor allem an der Oberfläche der tropischen Ozeane) im weltweiten Mittel um weitere $+2 \text{ W/m}^2$ (über den tropischen Ozeanen um bis $+10 \text{ W/m}^2$) noch verstärkt. Diese Verstärkung der Heizleistung im Treibhaus Erde um insgesamt im Mittel 4 W/m^2 Erdoberfläche beläuft sich über die gesamte Erdoberfläche summiert auf ca. $2 \times 10^{15} \text{ W}$ bzw. auf eine zusätzliche jährliche Heizenergie von ca. 60 000 EJ. Das ist 150mal mehr als die direkte Wärmefreisetzung durch Nutzung aller technischen Energien von derzeit jährlich ca. 400 EJ und immer noch ca. zehnmal mehr als die maximalen Schwankungen der Sonnenlichteinstrahlung auf die Erde (siehe Abb. 1).

Durch diese Zusatzheizung von 60 000 EJ pro Jahr ist die Temperatur auf der Erde im globalen und jahreszeitlichen Mittel bislang um knapp 1 Grad angestiegen im Einklang mit der Erwartung gemäß dem schon genannten Strahlungsgesetz von STEFAN und BOLTZMANN (*Enquete-Kommission* 1990, *IPCC* 1990, 1995, 2002). Bei einem weiteren Anstieg der Konzentration wärmestrahlungsrelevanter Spurengase in der Atmosphäre, wie dies bei weiteren Spurengasemissionen wie bisher oder in weiter steigendem Umfang zu erwarten wäre, würde die Temperatur auf der Erde durch weiteren Anstieg der Wärmestrahlungsheizung im Verlauf dieses Jahrhunderts im globalen und jahreszeitlichen Mittel weiter, um mehrere Grad zunehmen.

5. Auswirkungen der steigenden Erwärmung im Treibhaus Erde

Auswirkungen einer zusätzlichen Treibhause Erwärmung von einem bis einigen Grad erscheinen angesichts der natürlichen Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht von etwa 10 Grad, zwischen Sommer und Winter von etwa 30 Grad, rein gefühlsmäßig wenig signifikant zu sein. Der Blick in die geschichtliche Vergangenheit belehrt uns schnell eines Besseren:

- Vor etwa 2 000 Jahren wurden die ehemals fruchtbaren Kornkammern Roms in Nordafrika nicht zuletzt durch einen regionalen Anstieg der mittleren Temperaturen um nur 1 Grad zu Trockenwüsten!
- Ein Temperaturrückgang um nur ein halbes Grad, dies vor einigen 100 Jahren, trug in Mitteleuropa wesentlich zu Hungersnöten wegen der rückläufigen Ernteerträge und dadurch bedingt zur Auswanderung vieler Menschen nach Amerika bei!

Hinsichtlich möglicher Auswirkungen einer steigenden Erwärmung im Treibhaus Erde um einige wenige Grad sind zu unterscheiden:

- zum einen mehr oder minder absehbare Folgewirkungen;
- zum anderen nicht absehbare Risiken möglicher Folgewirkungen.

5.1 Absehbare Folgewirkungen

- *Verschiebung von Klimazonen:* In den feuchten Tropen werden sich die Niederschläge erhöhen; dagegen werden sich die subtropischen Trockenzonen ausweiten, im wesentlichen

- polwärts- um ca. 200 bis 300 km pro Grad Temperaturanstieg – in die heute fruchtbaren Kornkammern in Südeuropa, USA, China, Südamerika und Australien.
- *Ausbreitung von Tropenkrankheiten in heute gemäßigte Klimazonen.*
 - *Höhere Windgeschwindigkeiten, mehr Stürme, mehr Stark-Niederschläge.* Eine steigende Treibhauserwärmung bedingt notwendigerweise eine steile Zunahme der Wasserverdunstung, vor allem über den tropischen Meeren. Bei der nachfolgenden Kondensation dieses Wasserdampfes in der Troposphäre in Höhen von etwa 5 bis 10 km bewirkt die als potentielle Energie freigesetzte Kondensationswärme eine Verstärkung des Luftdruckgefälles, z. B. zwischen den subtropischen Hochdruckgebieten und den subpolaren Tiefdruckgebieten, und damit eine Intensivierung der Windströmungen. Der bisher vornehmlich (bis zum Jahr 2000) in den letzten Jahrzehnten beobachtete Temperaturanstieg, im globalen Mittel um etwa 0,8 Grad, über den tropischen Meeren von etwa 1 Grad, korreliert mit dem beobachteten Anstieg des Wasserdampfgehaltes der Luft über den tropischen Meeren um ca. 10 bis 20 % und mit einer Erhöhung des Luftdruckgefälles, z. B. zwischen Azoren-Hoch und Island-Tief, um etwa 6 hPa bzw. 30 % (Druckeinheit Hekto-Pascal, 1 hPa = 1 mbar, der alten gebräuchlichen Einheit für den Druck) und weltweit mit einer entsprechenden Erhöhung der Windgeschwindigkeiten um ca. 5 bis 10 % bzw. der Windenergie um 10 bis 20 %. Dies führt zu erhöhten Sturmschäden, vor allem durch Wirbelstürme in den tropischen Zonen: Innerhalb der letzten drei Jahrzehnte hat die Zahl von Stürmen und Sturmfluten mit katastrophalen Schäden bereits gravierend zugenommen (BERZ 1994). Die erhöhte Wasserverdunstung, vor allem über den tropischen Meeren, führt des weiteren auch regional zu entsprechend erhöhten (Stark-)Niederschlägen.
 - *Existenzielle Bedrohung der Wälder in gemäßigten und nördlichen Breiten.* Eine Temperaturerhöhung um mehrere Grad innerhalb dieses Jahrhunderts, wie bisher zu erwarten, würde aller Voraussicht nach katastrophale Auswirkungen auf die weltweiten Waldbestände haben: Während in den Tropen bereits heute die großflächige Waldvernichtung vornehmlich zur Deckung des steigenden Landbedarfs für landwirtschaftliche Nutzung stattfindet, würde der skizzierte Temperaturanstieg die Wälder in den gemäßigten und nördlichen Klimazonen rasch durch steigenden Klimastreß und vermehrte Windeinwirkungen, noch gefördert durch Schadstoffbelastungen und Schädigung durch erhöhte UV-Einstrahlung, letztere bedingt durch die Abnahme des Ozongehaltes der Luft in der Stratosphäre, großflächig in ihrer Existenz bedrohen und zunehmend vernichten. Eine Wiederaufforstung mit an das geänderte Klima angepaßten Baumarten hätte nur Aussicht auf Erfolg, wenn der Temperaturanstieg die maximale Anpassungsgeschwindigkeit natürlicher Wälder von maximal 1 Grad Temperaturveränderung pro Jahrhundert nicht merklich übersteigen würde.
 - *Zunahme von Wetter-Extrema.* Die Variabilität des Wetters wird zunehmen, dabei werden regional Wetter-Extrema, wie z. B. Starkniederschläge (u. a. Elbehochwasser 2002) und Dürreperioden, Hitze (u. a. Hitzewelle in Europa im Sommer 2003) und Kälteperioden hinsichtlich Ausmaß, Dauer und Häufigkeit zunehmen.

5.2 Nichtabsehbare Risiken möglicher Folgewirkungen

- *Änderungen der Intensität von Meeresströmungen (z. B. Golfstrom).* Der Golfstrom bringt mit einem Fluß von etwa 100 Millionen Kubikmetern Wasser pro Sekunde jährlich eine Wärmemenge von etwa 150000 EJ (entsprechend knapp 3 % der jährlichen Sonnenlichteinstrahlung bzw. fast 400mal mehr als die weltweit jährlich eingesetzte Menge technischer

Energie) aus äquatorialen Breiten im Westen des Atlantik in nordöstliche Bereiche des Atlantik als zusätzliche Heizung, nicht zuletzt auch der angrenzenden Bereiche Europas. Eine wesentliche Pumpe, die den Golfstrom antreibt, ist das Ausfrieren des schließlich abgekühlten Wassers an der Unterseite der schwimmenden polaren Eiskappe. Mit dem so erhöhten Salzgehalt des verbliebenen Wassers wird dieses schwerer als das darunter befindliche Wasser und sinkt deshalb in die Tiefe der Meere ab. Bereits durch geringfügige Abnahme des Salzgehalts des Meerwassers durch erhöhten Eintrag von Schmelzwasser aus Gletschern und Meereseis, zum anderen durch ein bei steigender Temperatur im Treibhaus Erde mehr oder minder weitgehendes Abschmelzen der schwimmenden nordpolaren Eisdecke – erste Anzeichen davon sind bereits erkennbar, nämlich eine Abnahme der mittleren Dicke dieser Eisdecke um etwa 40 % auf derzeit 1,8 m innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte (KERR 1999); die dazu benötigte Schmelzwärme entspricht der durch den bisher beobachteten Temperaturanstieg erhöhten Wärmeeinstrahlung – kann diese Pumpe ihren Dienst mehr oder minder versagen, damit die Stärke des Golfstroms relativ plötzlich, innerhalb von Jahren bis Jahrzehnten, drastisch abnehmen. In einem solchen Fall würde die mittlere Temperatur in West-, Mittel- und Nordeuropa um mehrere Grad sinken, damit u. a. die landwirtschaftlichen Ernteerträge drastisch sinken ⁷.

- *Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes und Anstieg der Meeresspiegel um ca. 5 m.* Während das nordpolare, im Wasser schwimmende Eis bei steigenden Temperaturen rasch abschmelzen kann, ohne die Höhe des Meeresspiegels dabei stark zu verändern, könnte das südpolare, auf dem Festland der Antarktis aufliegende Eis nur in extrem langen Zeiträumen merklich abschmelzen. Vorübergehend könnte ein Temperaturanstieg in der Antarktis zu erhöhten Schneeniederschlägen führen und damit den Anstieg des Meeresspiegels mildern. Bedrohlich sind aber die westantarktischen Schelfeise zusammen mit den an sie angrenzenden marinen, d. h. unterhalb der Meeresoberfläche auf dem Festlandssockel aufliegenden Eisschilde, welche sich bei einer Erhöhung von Wassertemperatur und Auftrieb durch erhöhten Meeresspiegel vom Boden lösen, ins Meer gleiten und dann schmelzen können. Genau dies ist in der Warmzeit vor 120000 Jahren geschehen, als die Temperatur auf der Erde im globalen Mittel nur um etwa 1 bis 2 Grad höher als derzeit war. Dies führte zu einem Anstieg des Meeresspiegels um etwa 5 bis 6 m. Dabei wurden für einige 10000 Jahre weltweit Küstengebiete überflutet, von welchen derzeit insgesamt bis zu 50 % der Erdbevölkerung abhängig sind, sei es, weil sie dort leben, sei es, weil sie aus diesen Gebieten Nahrung beziehen.

Derzeit kann man noch nicht absehen, ob ein solches Abschmelzen der westantarktischen Schelfeise und der marinen Eisschilde bei zunehmender Temperatur und steigendem Meeresspiegel wiederum und gegebenenfalls wann eintreten könnte. Ein solcher Prozeß würde sich über mehrere Jahrhunderte hinziehen. Im Laufe der nächsten 100 Jahre ist ein solches Geschehen (noch) nicht zu erwarten. Wir wissen allerdings nicht, ob wir durch die jetzt und in naher Zukunft verursachten Spurengasemissionen und den dadurch bewirkten Temperaturanstieg bereits die Lunte für die Auslösung des obigen Prozesses zünden. Ebenso könnte eine steigende Temperatur auch Teile des Festlandeises auf Grönland abschmelzen, wie dies in der Warmzeit vor 120000 Jahren geschehen ist und wodurch der Meeresspiegel um 1 bis 2 m gestiegen ist.

⁷ Dieser regionale Temperaturrückgang in West-, Mittel- und Nordeuropa würde in anderen Regionen – eventuell in der Karibik – einen Temperaturanstieg über den Temperaturanstieg im globalen Mittel hinaus zur Folge haben.

- *Umkippen des erst seit 10000 Jahren temperaturstabilen Klimas in einen Klimazustand mit rapiden Temperaturfluktuationen.* Das vielleicht bedrohlichste Risiko einer raschen Aufheizung der unteren Atmosphäre um mehrere Grad ist ein Übergang des Klimas aus seinem relativ temperaturstabilen Zustand, wie er erst seit ca. 11000 Jahren, seit Beginn der heutigen Warmzeit besteht, in einen temperaturinstabilen Zustand mit starken, raschen Temperaturfluktuationen. Ein solcher Zustand war typisch nicht nur in der unserer heutigen Warmzeit vorangegangenen Eiszeit, sondern wahrscheinlich auch in der vorigen Warmzeit vor ca. 115000 bis 125000 Jahren. In dieser Zeit lag das globale Temperaturmittel über Zeiträume von Jahrhunderten gemittelt nur ca. 1 bis 2 Grad über dem Temperaturmittel der heutigen Warmzeit. Bei einem solchermaßen instabilen Klima wäre eine dauerhaft ergiebige Landwirtschaft zur Sicherung der Ernährung einer Weltbevölkerung von sechs oder künftig noch mehr Milliarden Menschen *nicht* möglich.

Auf diese Risiken eines katastrophalen Klimawandels wird von der Klimawissenschaft schon seit mindestens drei Jahrzehnten hingewiesen (FLOHN 1973). Angesichts all dieser Aussichten, durch menschliche Eingriffe in den Klimahaushalt die Lebensbedingungen auf der Erde drastisch zu verschlechtern, ist es wohl höchste Zeit, durch eine Beschränkung dieser, unserer Eingriffe die Folgewirkungen auf ein hoffentlich noch erträgliches Maß zu beschränken. Dies wurde selbst von der internationalen Politik erkannt.

5.3 Internationale politische Vereinbarungen zum Schutz des Klimas

Auf der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro (1992) wurde von der weltweiten Gemeinschaft der Nationen ein Rahmenübereinkommen zum Klimaschutz vereinbart, »das Klima-System für heutige und künftige Generationen zu schützen«, mit dem Ziel, »die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraumes erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise an Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann.«

5.4 Quantifizierung der Maßnahmen zur Realisierung der getroffenen Klimaschutzvereinbarung

Um die vom Menschen verursachte zusätzliche Erwärmung auf höchstens 1 bis 2 grad im globalen, jahreszeitlichen Mittel zu beschränken, müßte die Kohlendioxidäquivalentkonzentration der Atmosphäre auf einem Niveau deutlich unterhalb einer Verdopplung, also unterhalb 0,7 Promille, höchstwahrscheinlich auf einem Niveau nicht höher als 0,6 Promille stabilisiert werden. Und dieses Ziel sollte möglichst innerhalb nicht allzu vieler Jahrzehnte erreicht werden.

Um schließlich eine Begrenzung der Kohlendioxidäquivalent-Konzentration auf eine Höhe von 0,6 Promille des Volumengehalts der Luft zu erreichen, müßte die weitere unnatürliche Emission aller treibhauswirksamen Spurengase im genannten Zeitraum insgesamt auf höchstens die Hälfte der derzeitigen jährlichen Emission reduziert werden. Eine solche Re-

duzierung wird nicht nur von der einschlägigen Wissenschaft seit mehr als einem Jahrzehnt gefordert, sondern auch von der internationalen Klimapolitik, erstmals explizit in der Genfer Ministerialdeklaration der Klimaschutzvertragsstaaten 1996.

Für die treibhauswirksamen Gase, das Kohlendioxid ausgenommen, ist dieses Minderungsziel, selbst bei völliger Einstellung der Emissionen von FCKW, vor allem wegen der wahrscheinlich unvermeidlich weiter noch steigenden Emissionen von Methan und Distickstoffoxid nur schwerlich, wenn überhaupt zu erreichen. Dementsprechend müßte die weitere Emission von Kohlendioxid und damit höchstwahrscheinlich die weitere Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas auf weniger als die Hälfte der derzeitigen jährlichen Raten reduziert werden.

Diese Reduktion der Verbrennung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas zielt auf eine entsprechende Reduktion der Freisetzung von Kohlendioxid bei der Verbrennung von fossilem Kohlenstoff. Im Prinzip und auch technisch ist es sehr wohl möglich, bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen, wenigstens in großen Kraftwerken, Kohlendioxid aus der Atmosphäre fernzuhalten, indem man es, allerdings unter beträchtlichem Aufwand an Energie, Kohlendioxid-erzeugung und Kosten, abtrennt⁸ und dann, wieder unter beträchtlichem Aufwand, dauerhaft z. B. durch Einpressen in geleerte Erdöl- und Erdgasfelder einlagert. Diesbezüglich kann man sich zwar z. B. vorstellen, parallel zu existierenden, etwa 5000 km langen Erdgas-Pipelines, durch die Erdgas aus Sibirien nach Mittel- und Westeuropa gepumpt wird, weitere Pipelines gleicher Länge zu bauen, in denen dann das bei der Verbrennung von Erdgas bei uns entstehende Kohlendioxid wieder nach Sibirien zurückgepumpt und dort in leere Erdgasfelder eingepreßt wird. Gerade an diesem Beispiel kann man sich aber auch vorstellen, daß die Chancen für die Realisierung solcher Art Kohlendioxid-Entsorgung sehr klein sind, sicherlich viel kleiner, als die Chancen für die wohl weniger aufwendige Reduktion des Einsatzes fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien und durch Atomkernspaltungsenergie.

Alternative einer Kohlendioxidentsorgung durch Endlagerung in der tiefen Erde wäre eine Neuaufforstung großer Landflächen. Während der Hauptwachstumsphase der Bäume, also während mehrerer Jahrzehnte, könnte Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnommen und als Kohlenstoff im Holz der aufwachsenden Bäume, Wälder gespeichert werden. Danach allerdings würden auch diese Wälder von einer Senke für Kohlendioxid zu einer ausgeglichenen Bilanz zwischen weiterer Einlagerung von Kohlenstoff mittels Photosynthese von Biomasse und Freisetzung von Kohlendioxid durch Absterben und Zerfall, Zersetzung von Biomasse (gegebenenfalls partiell über den Umweg der Holznutzung) kommen. Wollte man beispielsweise die zu ausreichendem Klimaschutz notwendige Senkung des Kohlendioxid-eintrags in die Atmosphäre aus Verbrennung fossiler Energieträger um 50 %, entsprechend derzeit jährlich 12 Milliarden Tonnen Kohlendioxid, durch Neuaufforstung – zumindest für den Zeitraum mehrerer Jahrzehnte – erzielen, so müßte man dazu je nach Klimazone dieser

⁸ Hinsichtlich einer kostengünstigen Entnahme von Kohlendioxid aus dem Abgas bei der Verbrennung fossiler Energieträger gibt es u. a. Überlegungen, diese mit reinem Sauerstoff statt mit dem Sauerstoff in der Luft zu verbrennen. (Damit würde die Abluft praktisch nur aus Kohlendioxid bestehen im Unterschied zur Verbrennung mit Luft, bei welcher Kohlendioxid nur einen kleinen Teil der Abluft ausmacht.) Dazu sollte der Sauerstoff vom Luftstickstoff durch Abkühlung und Verflüssigung bei -183°C getrennt werden. Der dazu nötige energetische Aufwand könnte zumindest teilweise durch eine Erhöhung des Wirkungsgrades der Wärme zu Stromwandlung mittels Gas- und Dampfturbinengeneratoren entsprechend der Absenkung der Kühltemperatur, bei welcher die Abwärme abgeführt wird, von üblicherweise Umgebungstemperaturen auf – im Idealfall – die Temperatur von flüssigem Sauerstoff kompensiert werden (THEIS 2003).

Wälder Landflächen von etwa 10 Millionen km² neu aufforsten (einer Fläche entsprechend der Europas vom Atlantik bis zum Ural). Daraus mag man ersehen, daß auch diese Möglichkeit der Kohlendioxidentsorgung keine große Rolle spielt, im günstigsten Fall einen kleinen Beitrag liefern können wird.

6. Menetekel

Wenn es den Menschen nicht gelingt, die skizzierten Risiken möglicher katastrophaler Folgewirkungen von Klimaänderungen durch steigende Erwärmung im Treibhaus Erde in ausreichendem Umfang und ausreichend schnell einzudämmen, dann – so der Biologe E. O. Wilson (WILSON 1999) – steht uns die 6. große Auslöschung von Flora und Fauna, die Spezies Mensch mit eingeschlossen, bevor, nach den fünf großen natürlichen Auslöschungen von Flora und Fauna im Verlauf einiger Jahrmilliarden, die bislang letzte vor 65 Millionen Jahren, diesmal und erstmals von der Spezies Mensch verursacht.

7. Energie für unsere Zukunft – Was sollen, was können wir tun?

Die Menschheit hat seit Beginn der heutigen Warmzeit vor gut 10000 Jahren den Naturraum Erde, hier vor allem die Landflächen der Erde von insgesamt ca. 150 Millionen km², davon

- etwa 60 Millionen km² Wälder aller Klimazonen,
- etwa 50 Millionen km² Savannen und Steppen,
- etwa 40 Millionen km² Wüsten, Tundren, Berge, mit Eis bedeckte Flächen,

nicht zuletzt dank des erst seit Beginn dieser Warmzeit außergewöhnlich temperaturstabilen Klimas, damit auch der entsprechend zeitlich stabilen natürlichen Energieflüsse, hier vor allem der Wasser-, Wind- und Biomasse-Kreisläufe, durch Landwirtschaft und Besiedelung seitens der schnell wachsenden, seßhaft gewordenen Erdbevölkerung allmählich zu einem Kulturraum Erde gewandelt, Bewuchs und Nutzung der Landflächen spürbar stetig verändert zu heute

- etwa 10 Millionen km² Siedlungsflächen,
- etwa 40 Millionen km² Wälder aller Klimazonen,
- etwa 35 Millionen km² Grasflächen aller Art (zum überwiegenden Teil als Weideflächen genutzt),
- etwa 15 Millionen km² landwirtschaftliche Anbauflächen,
- etwa 50 Millionen km² Wüsten, Tundren, Berge, mit Eis bedeckte Flächen.

Der Mensch nimmt also inzwischen von der Landfläche der Erde gut ein Drittel, von den nutzbaren Grünflächen der Erde gut zwei Drittel zur Deckung seiner Bedürfnisse in Anspruch. Er hat damit den ursprünglichen Naturraum Erde bereits zu einem großen Teil zu einem Kulturraum Erde gewandelt.

Bedingt durch die heutige Art der Landnutzung gehen derzeit jährlich etwa 0,5 % der Waldflächen und etwa 0,5 % der Grasflächen und landwirtschaftlichen Anbauflächen verlo-

ren. Durch die bisherige Umwandlung von etwa 20 Millionen km² Waldflächen zu Landwirtschaftsflächen, Siedlungsflächen und Wüsten, dies im Verlauf von 10000 Jahren, wurde durch die damit bewirkte Erhöhung der Albedo⁹, also der Rückstreuung des eingestrahnten Sonnenlichts, die Heizung im Treibhaus Erde durch das absorbierte Sonnenlicht im weltweiten Mittel um etwa 0,2 % (entsprechend etwa 10000 EJ pro Jahr) vermindert. Dadurch wieder muß sich die Temperatur auf der Erdoberfläche im weltweiten, jahreszeitlichen Mittel um etwa 0,1 Grad vermindert haben.

Bei einer weiteren Temperaturerhöhung um einige bis mehrere Grad schon im Verlauf eines einzigen, und zwar dieses Jahrhunderts, ist zu befürchten, daß die Wälder durch den zu schnellen Klimawandel in großem Umfang zunächst großen Schaden, bis hin zum Absterben, nehmen werden, da sie sich nicht schnell genug durch Nachwachsen neuer, an erhöhte Temperatur, an veränderte Klimabedingungen angepaßte Baumarten anpassen können. Ein weiträumiger Zusammenbruch der Wälder hätte nicht zuletzt auch dramatische Auswirkungen auf regionale Wasserkreisläufe.

Es ist also höchste Zeit, den Kulturraum Erde langfristig – mit Blick auf Jahrhunderte bis Jahrtausende – bewahrend zu gestalten. Dies erfordert zuallererst, die *natürlichen Energieflüsse* im Treibhaus Erde, hier vor allem auch die Wasser-, Wind- und Biomassekreisläufe, *nicht unbotmäßig zu verändern*, dies sowohl durch entsprechend angepaßte Bodenfruchtbarkeit und Wälder erhaltende Land- und Waldnutzung als auch durch eine *das Klima* im Treibhaus Erde *nicht* durch weitere, unangemessen hohe Freisetzung von wärmestrahlungsrelevanten Spurengasen, wie vor allem Kohlendioxid, aber auch Methan und Distickoxid, *weiter bedrohlich aufheizende Nutzung technischer Energieflüsse* im Rahmen der weltweiten Bereitstellung und Nutzung von Strom, Heiz- und Prozeßwärme sowie Treibstoffen. Und dies wiederum erfordert eine drastische Reduktion der weiteren Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas, derzeit die dominanten Energieträger zur Deckung unseres Bedarfs an technischen Energien.

8. Technische Energie

Ehe die Optionen für eine umwelterhaltende Bereitstellung und Nutzung technischer Energie hinsichtlich Qualität und Quantität kurz in einer Auswahl dargestellt werden, soll die Höhe des künftigen Bedarfs an technischer Energie etwa zur Mitte dieses Jahrhunderts abgeschätzt werden.

Der weltweite Bedarf an technischer Energie hängt ab

- von der Größe der Weltbevölkerung,
- von der erzielten Effizienz der Energienutzung,
- von der Höhe der erzielten wirtschaftlichen Produktivität.

Die Weltbevölkerung wird bis zur Mitte dieses Jahrhunderts von derzeit gut 6 Milliarden mindestens auf gut 8 Milliarden Menschen anwachsen. Dabei wird die Bevölkerung der heutigen Industrieländer (OECD-Länder und Länder Osteuropas einschließlich GUS) von derzeit ins-

⁹ Albedo von Wäldern typisch 2 %, Albedo von nicht bewaldeten Grünflächen typisch 10 %.

gesamt ca. 1,3 Milliarden auf etwa 1,1 Milliarden Menschen oder vielleicht noch weniger sinken. Hingegen wird die Bevölkerung der heutigen Schwellen- und Entwicklungsländer von derzeit ca. 4,7 Milliarden auf etwa 7 Milliarden Menschen anwachsen.

Unter den Annahmen

- einer Steigerung der Energieeffizienz von ca. 0,5 % pro Jahr – wie etwa im Verlauf der letzten Jahrzehnte – also im Verlauf von 50 Jahren um insgesamt etwa 30 %
- und einer Steigerung der realen weltweiten wirtschaftlichen Produktivität in den kommenden Jahrzehnten um insgesamt im Mittel etwa 1,5 % pro Jahr, – dieser Anstieg zumindest wesentlich von heutigen Schwellenländern, allen voran China und vielleicht auch Indien, immer weniger hingegen von heutigen Industrieländern, nicht zuletzt wegen deren sinkender Bevölkerung, erarbeitet – also im Verlauf von 50 Jahren um insgesamt etwa 100 %,

wird der weltweite Bedarf an technischer (Primär-)Energie zur Bereitstellung von Strom, Prozeß- und Heizwärme sowie Treibstoffen von derzeit etwa 400 EJ auf etwa 600 EJ steigen. Dabei sollte aber auch bedacht werden, daß bei Steigerung der Effizienz der Energienutzung zwar in jedem Einzelfall der entsprechende Bedarf an Energie vermindert, insgesamt jedoch nicht spürbar geringer wird: Durch die Verminderung des Energieeinsatzes in jedem Einzelfall werden auch die benötigten Ausgaben für Energie entsprechend vermindert. Dadurch werden finanzielle Mittel frei, welche zumindest bislang immer für zusätzliche, mehr oder minder energieaufwendige Konsum- und Investitionsgüter und Dienstleistungen wieder ausgegeben wurden. Dies führte insgesamt zu weiterem Wirtschaftswachstum ohne weitere Steigerung des Energiebedarfs.

Alle hier gemachten Annahmen basieren auf der Hoffnung, daß es im Verlauf der nächsten fünf Jahrzehnte zu keinen drastischen, langfristigen Einbrüchen in der Weltwirtschaft kommen wird.

Um ausreichenden Klimaschutz zu erreichen, müßte der Verbrauch der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas innerhalb des nächsten Jahrhunderts insgesamt im weltweiten Mittel auf höchstens die Hälfte, also von derzeit gut 300 EJ auf höchstens 150 EJ pro Jahr (entsprechend von derzeit ca. 11 Milliarden Tonnen Steinkohleeinheiten pro Jahr auf etwa 5 Milliarden Tonnen Steinkohleeinheiten), gesenkt werden. Um dabei den weltweiten Gesamtbedarf an Primärenergie von schätzungsweise 600 EJ zur Mitte dieses Jahrhunderts decken zu können, müßte der Einsatz von erneuerbaren Energien und von Atomkernspaltungsenergie von derzeit ca. 100 EJ auf etwa 450 EJ angehoben werden.

Wegen der unvermeidlich höheren Investitionskosten vor allem für erneuerbare Energien – bedingt durch deren im Vergleich zu Kohle, Erdöl und Erdgas geringeren Energiedichten und vor allem wegen ihrer zeitlich meist stark fluktuierenden Verfügbarkeit, damit entsprechende, meist aufwendige Energiespeichertechniken erforderlich – werden die Kosten für die Bereitstellung von technischer Energie gegenüber den derzeitigen meist auf Kohle, Erdöl und Erdgas basierenden Kosten von weltweit jährlich etwa 1200 Milliarden Euro (für die Bereitstellung von Kohle, Erdöl und Erdgas in Höhe von insgesamt 11 Milliarden Tonnen Steinkohleeinheiten) spürbar steigen, insgesamt – ausgereifte relevante Energietechniken voraussetzend – etwa um einen Faktor 2.

Schon derzeit belaufen sich die durch die bisher, seit der Industrialisierung bewirkte Aufheizung im Treibhaus Erde um knapp 1 Grad bedingten Kosten für Klimaschäden weltweit

jährlich auf die Größenordnung von 200 Milliarden Euro (SCHELLNHUBER 2002). Bei weiterer Aufheizung durch weiter unverminderte Kohlendioxidfreisetzung bei nicht reduzierter Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas könnten die Kosten für Klimaschäden in einigen Jahrzehnten weltweit jährlich auf die Größenordnung 2000 Milliarden Euro ansteigen (HOHMEYER und GÄRTNER 1992).

Fazit: Die Summe der Kosten für weiter ungebremste Nutzung von Kohle, Erdöl und Erdgas (auf heutigem Kostenniveau) und für Klimaschäden könnten schon bald teurer werden als die Kosten für eine Umstellung auf eine umweltschonende Bereitstellung und Nutzung von Energie unter dominantem Einsatz von erneuerbaren Energien und von einer – inhärent sicheren – Atomkernspaltungsenergie.

So einfach es ist, diese Kostenbilanz aufzustellen, so schwierig wird es sein, die Kosten von möglichen Klimaschäden bzw. der vorbeugenden Vermeidung von Klimaschäden auf die Kosten der diese verursachenden Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas umzulegen; denn dies bedarf weltweit verbindlicher Rahmenvorgaben für Bereitstellung und Nutzung von Energie aus den verschiedenen Energiequellen seitens der Politik für die Wirtschaft.

9. Optionen für neue (und alte) Energien und Energietechnologien

Neu – seit wenigen Jahren – ist die Möglichkeit, mittels computergestützter Modellierung und mittels Nanostrukturmeß- und Herstellungstechnologien neue, künstliche Materialverbindungen mit gezielt verbesserten speziellen Eigenschaften, wie u. a. Temperaturfestigkeit oder Wärmeleitfähigkeit, zu erfinden und verfügbar zu machen. (Nanostrukturtechnologien zielen auf die Dimensionen von Atomen, Molekülen in Festkörper- und Makromolekülen.) Diese neue, interdisziplinäre Zusammenarbeit und dabei ein Verschmelzen von angewandter Forschung mit Grundlagenforschung erfordernden Methoden verbessern schon vorhandene Wege und öffnen neue Wege in vielen alten und neuen Energietechnologien.

Eine kurze, nicht zuletzt die Beiträge zu dieser Jahresversammlung der Leopoldina zum Thema »Energie« zusammenfassende und ergänzende Übersicht der Energiequellen

- Kohle, Erdöl, Erdgas,
- erneuerbare Energien,
- Atomkernspaltungsenergie,
- Atomkernfusionsenergie,

und ausgewählter innovativer Energietechnologien zur Bereitstellung von

- elektrischer Energie (»Strom«),
- Heiz- und Prozeßwärme,
- Treibstoffen und Antrieb im Verkehr,

sowie auch von

- Trinkwasser und
- Nahrung

ist in Tabelle 1 skizziert (HEINLOTH 2002ff., 2003).

Tab. 1 Energieoptionen: Übersicht von Primärenergien und einer Auswahl innovativer Energietechnologien zur Bereitstellung der von uns benötigten Sekundärenergien

| | Strom | Wärme | Verkehr | Wasser | Nahrung |
|--------------------------|--|---------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
| Kohle Erdöl Erdgas | Turbinengeneratoren »Entkarbonisierung« → (Kunststoffe +) Wasserstoff Brennstoffzellen | | | | |
| Biomasse | Kraft-Heiz-Wärme | | Biotreibstoffe | Wasser └─┬─> Rekultivierung | Landwirtschaft |
| Sonne | Solarthermisches Kraftwerk | Bau-Physik | Wasserstoff | | |
| Wind | Solarzellen | Kollektoren + Speicherung | | | |
| Wasser Erdwärme | Stromspeicher | Wärmepumpen | | | |
| Kernspaltung | Inhärent sichere Kraftwerke | | | | |
| Kernfusion | »Prometheus« | | | | |

Nachfolgend Erläuterungen zu den einzelnen Technologien:

9.1 Nutzung fossiler Energieträger

9.1.1 Stromerzeugung mittels Dampf- und Gas-Turbinengeneratoren mit erhöhter Effizienz der Umwandlung von Wärme zu elektrischer Energie

Mittels computergestützter Simulation und Optimierung neuer Turbinenmaterialien (Metallegerungen und Metall-Keramik-Verbindungen), basierend auf den bekannten bzw. zu vermessenden Mikro- und Nanostruktur-Eigenschaften unter mechanischer und thermischer Belastung,

- können durch Dampfturbinen mit Dampftemperaturen bis etwa 700 °C und noch höher Wärme-zu-Strom-Umwandlungswirkungsgrade von 50 % und mehr;
- können durch Gasturbinen mit Heißgastemperaturen bis etwa 1300 °C und noch höher Wärme-zu-Strom-Umwandlungswirkungsgrade von gut 40 % und mehr;
- können durch Gas- und Dampfturbinen hintereinander geschaltet Wärme-zu-Strom-Umwandlungswirkungsgrade von 65 bis 70 % und mehr

realisiert werden. Dadurch kann eine bestimmte Menge an Strom mit entsprechend reduziertem Aufwand an fossilen Energieträgern erzeugt werden.

9.1.2 »Entkarbonisierung« von Kohle zu Wasserstoff und Kunststoffen

Die natürlichen Vorräte an Kohle sind weit größer als die von Erdöl und Erdgas (Reichweiten bei Verbrauch in heutigem Umfang mehrere hundert Jahre) und sind zudem in Lagerstätten

auf allen Kontinenten vorhanden. Wenn nur nicht das leidige Problem der Kohlendioxidemissionen bei der Verbrennung von Kohle im Wege stünde. Dieses Hindernis könnte man vielleicht umgehen, so hofft man, wenn man den aus Kohle zu gewinnenden Energieträger »entkarbonisiert«, d. h. die Kohle unter Druck und hoher Temperatur und Zugabe von Wasserdampf vergast, den dabei gebildeten Wasserstoff als kohlenstofffreien Brenn- bzw. Treibstoff entnimmt und das verbleibende kohlenstoffhaltige Gasgemisch unter Zugabe geeigneter Stoffe zu neuartigen organisch-anorganischen Hybridmaterialien wandelt, diese z. B. als Baustoffe, möglicherweise als Ersatz für Beton, Steine, Metalle und Holz verwendet (und sie bei späterer Entsorgung nicht verbrennt, sondern in die Erde einlagert)¹⁰. Der Energieaufwand für diese Art der Umwandlung von Kohle zu Wasserstoff und organisch-anorganischen Hybridmaterialien beläuft sich schätzungsweise auf etwa ein Drittel des Brennwertes der eingesetzten Kohle. Will man bei diesem Verfahren jegliche Erzeugung und Freisetzung von Kohlendioxid vermeiden, so muß man die für die Umwandlung benötigte Prozeßenergie je nach Gestaltung der Prozesse möglicherweise aus nichtfossilen Energiequellen decken.

9.1.3 Brennstoffzellen

In Brennstoffzellen wird chemische Energie in Form des Brennstoffs Wasserstoff, gegebenenfalls auch von Kohlenwasserstoffen wie z. B. Methan (Erdgas) und Methanol, in katalytischer Verbrennung unter Zugabe von Sauerstoff (Luft) direkt in elektrische Energie mit Umwandlungswirkungsgraden bis zu ca. 60 % gewandelt. Die restliche Energie wird in Form von Abwärme bei der Zellenbetriebstemperatur freigesetzt, typisch bei Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEM-BZ) ca. 80 °C, bei »Solid-Oxid«-Brennstoffzellen (SO-FC) ca. 800 °C. Brennstoffzellen solcher Art bestehen aus möglichst großflächigen Schichtpaketen, die von jeweils zwei porösen, elektrisch leitenden Wasserstoff- bzw. luftdurchlässigen Membranen getrennt sind, in denen Wasserstoff- und OH-Ionen zu Wasser »verbrannt« werden. Beide Arten von Brennstoffzellen bedürfen noch – trotz bereits erzielter beachtlicher Fortschritte – einer breit gefächerten Entwicklungsarbeit. So könnten in PEM-Brennstoffzellen vielleicht mittels optimierter, homogen verteilter Nanostruktur-Katalysatorpartikel wesentlich höhere Leistungsdichten bei höheren Betriebstemperaturen erreicht werden. Wesentliche Verbesserungen könnten auch und nicht zuletzt mit lernendem Blick auf entsprechende Prozeßabläufe im Bereich der Biologie, z. B. in Zellmembranen, erzielt werden. Die für einen kommerziellen Einsatz nötigen Kostenreduktionen um 1 bis 2 Größenordnungen sind wohl nur mit Hilfe neuer Materialien, verbesserter Prozeßabläufe und Verarbeitungsmethoden zu erzielen.

9.2 Nutzung erneuerbarer Energien

Dazu vorweg die Vision von Werner von SIEMENS, veröffentlicht 1880 in der *Elektrotechnischen Zeitschrift* (SIEMENS 1880): »Es gehört sogar kein allzu kühner Flug der Phantasie dazu, um sich eine Zukunft auszumalen, in der die Menschheit die lebendige Kraft, welche die Sonnenstrahlen der Erde in ungemessenem Betrag zuführen, und die sich uns zum Theil im

¹⁰ Aus einer Menge von z. B. 2,2 Milliarden Tonnen Kohle, welche derzeit jährlich weltweit in Kraftwerken verbrannt wird, könnte man so etwa 10 bis 15 Milliarden Tonnen neuartiger Baustoffe erzeugen, eine Menge, welche dem derzeitigen weltweiten Bedarf an Baustoffen entspricht.

Wind und in den Wasserfällen zur direkten Benutzung zur Verfügung stellt, mit Hilfe des elektrischen Stroms zur Herstellung alles nötigen Brennstoffs verwendet und die für ihre Kindheit von der Natur vorsichtig aufgestapelten Kohlenlager ohne Nachteil zu entbehren lernt!«¹¹

Auf dem Weg zur Realisierung dieser Vision ist es notwendig, sich der zeitlich schwankenden und eingeschränkten Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen, vor allem von Wind und Sonnenlichteinstrahlung, aber auch Wasser, bewußt zu sein. Wir haben uns in unserer technisierten Lebensgestaltung darauf eingerichtet, daß alle von uns dazu benötigten Energien, insbesondere elektrische Energie, »Strom«, uns allen jederzeit, unabhängig von Tages- und Jahreszeit und vom Wetter, im jeweils benötigten Umfang verfügbar sind. Wärmekraftwerke (fossil und nuklear beheizt) und – soweit verfügbar – Wasserspeicherkraftwerke können diese Ansprüche erfüllen. (Die unvermeidlich notwendige Kühlung der Wärmekraftwerke, bislang durch – noch – reichlich verfügbares Flußwasser, muß gegebenenfalls auf die – etwas teurere – Verdunstungskühlung in Kühltürmen mit geschlossenem Wasserkreislauf umgestellt werden.) Eine ergiebige Nutzung von Strom aus Stromquellen mit zeitlich stark fluktuierender und mehr oder minder eingeschränkter Leistung, hier vor allem Windkraft- und Photovoltaikanlagen, erfordert zusätzlich zur Bereitstellung dieser Anlagen selbst weitere spezielle, aufwendige und auch mit nicht zu vernachlässigbaren Energieverlusten behaftete Vorkehrungen zum einen zur Leistungskompensation mittels immer verfügbarer und schnell schaltbarer Kraftwerksanlagen bzw. neuer, großer Stromspeicher, zum anderen zu ausreichend weiter Verteilung von anfallenden Leistungsspitzen ein entsprechend ausgebautes Stromnetz.

9.2.1 Biomasse als Energieträger zur Erzeugung von Strom, Heizwärme und Treibstoffen

Biomasse, nicht zuletzt in Form von Reststoffen und Abfällen aus Land- und Forstwirtschaft und aus Gewerbebetrieben, kann direkt oder erst vergast in Heizkraftanlagen zu Strom und Wärme gewandelt werden. Zur Bereitstellung von Treibstoffen aus Biomasse kann diese mittels Anbau von Energiepflanzen gewonnen werden:

- aus Raps kann dieselähnlicher *Rapsmethylester*,
- aus Zuckerrohr kann *Ethanol*,
- aus im Prinzip allen Arten von Pflanzen kann über Vergasung und
- Synthese von Biogas *Methanol* gewonnen werden.

Alle dazu notwendigen Energietechniken sind bereits mehr oder minder gut ausgereift einsetzbar. Und vielleicht kann man sogar einmal die direkte Biomassestromwandlung mittels Bakterien auf einer Biobrennstoffzelle zu kommerzieller Reife bringen (LÖFKEN 2003). Das Nadelöhr ist die Verfügbarkeit ausreichend großer Mengen an Biomasse. Wollte man beispielsweise Biotreibstoffe einer Menge dem derzeitigen Treibstoffbedarf in Deutschland entsprechend über den Anbau von Energiepflanzen erzeugen, so bedürfte dies Anbauflächen von 1,5mal der Fläche Deutschlands, zur Deckung des derzeitigen weltweiten Treibstoffbedarfs bedürfte es Anbauflächen von etwa einem Drittel aller weltweit verfügbaren landwirtschaftlichen Anbauflächen.

¹¹ Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter KIND, PTB Braunschweig, der mich auf dieses Zitat aufmerksam gemacht hat.

Als Ausweg bei gleichzeitiger Sicherstellung ausreichender Nahrungserzeugung für eine bald auf 8 Milliarden Menschen angewachsene Weltbevölkerung über eine künftig weltweit die Bodenfruchtbarkeit erhaltende Landwirtschaft erscheint eine (Re-)Kultivierung zusätzlicher Anbauflächen nötig, heute meist arider, oft ehemaliger landwirtschaftlicher Flächen, und zwar ausreichend großflächig, um zumindest langfristig über regionale Klimaänderungen durch die erfolgte Flächenbegrünung ausreichend Bewässerung aus natürlichen Niederschlägen – somit ohne die Gefahr der Bodenversalzung – zu erreichen. Dazu bedarf es aber zunächst – über Jahrzehnte – Wasser für künstliche Bewässerung, bis ausreichend Begrünung erreicht ist. Und dazu bedarf es z. B. neuartiger technischer Anlagen zur Entsalzung von Meerwasser mittels Solarwärme, welche das benötigte Süßwasser zu bezahlbaren Kosten liefern können, also zu Kosten von der Größenordnung 1 Euro/m³ Wasser, anstatt wie aus heute verfügbaren Anlagen zu vielen Euro/m³ Wasser.

9.2.2 Sonnenlicht zur Stromerzeugung

Dazu bieten sich im Prinzip zwei *sehr unterschiedliche Wege* an:

Der eine Weg ist die direkte Umwandlung von Licht zu elektrischer Energie mittels sogenannter Photovoltaiktechnologien: Auf den bisher – schon seit drei bis fünf Jahrzehnten – verfolgten Entwicklungsschienen bedarf es wohl noch weiterer etwa zwei Jahrzehnte kontinuierlicher Verbesserungen, um schließlich die Gesteungskosten für Strom aus Solarzellen auf ein Niveau von 10 Cent/kWh zu senken.

Man kann bei der Photovoltaik aber auf durchbruchartige Innovationen hoffen, *zum einen* durch neue Ideen, statt wie bisher Lichtquanten in Halbleiterschichten zu absorbieren und dadurch an Atome gebundene Elektronen zur Stromleitung freizusetzen, künftig vielleicht in hauchdünnen Schichten chemischer Photorezeptoren Elektronen freizusetzen und diese in anliegende ultradünne Metall-Halbleiter-Diodenschichten zur Stromleitung zu transferieren (GRÄTZEL 2003), *zum anderen* durch computergestützte Modellierung neuer Photo-Halbleiter-Materialien und Realisierung dieser mittels Nanostrukturtechnologien.

In jedem Fall sollte man aber gleichzeitig – angesichts der zeitlich sehr beschränkten und auch noch stark fluktuierenden Verfügbarkeit von Sonnenlicht zur Stromerzeugung – auch entsprechende Entwicklungsarbeit von *neuartigen Batterien* als Stromspeicher leisten, mit dem Ziel, Energiespeicherdichten von der Größenordnung kWh pro kg Speichermaterial (statt wie bisher Größenordnung 50 Wh pro kg) zu erreichen, um damit letztlich auch zu bezahlbaren Stromspeicherkosten in der Größenordnung weniger Cent pro kWh zu kommen. Nur so ergänzt, kann Photovoltaik zur benötigten kontinuierlichen Stromversorgungsquelle werden und damit auch weltweit höchst bedeutsam werden.

Der andere Weg zur solaren Stromerzeugung ist die Umwandlung von Sonnenlicht zu Wärme bei hoher Temperatur und deren Nutzung zur Stromerzeugung, dies in mehr oder minder großen Kraftwerksanlagen. Eine ökonomische Nutzung dieser Optionen ist regional beschränkt auf den äquatornahen trockenen Sonnengürtel der Erde wegen der benötigten hohen Lichteinstrahlung – und dies bei möglichst geringen Schwankungen zwischen Sommer und Winter auf geographische Breiten innerhalb etwa 30 Grad Nord und Süd.

Auf dieser Jahresversammlung der Leopoldina wurde eine sehr spektakuläre Version eines solarthermischen Kraftwerks, das sogenannte Aufwindkraftwerk, vorgestellt. Alternativ

sei hier eine andere Option skizziert, das thermische Solarturmkraftwerk mit preiswertem Sandwärmespeicher zur Ermöglichung kontinuierlicher Stromerzeugung »rund um die Uhr«. Dabei wird mittels fokussierender Lichtspiegelkollektoren – deren Ausrichtung im Tagesverlauf dem Sonnenstand nachgeführt wird – eines großen Kollektorfeldes (etwa 1 km² Fläche für 100 MW elektrische Leistung) das Sonnenlicht auf einen Empfänger, einen z. B. 100 m hohen Turm, fokussiert, dort damit ein Luftstrom auf bis zu etwa 1000 °C aufgeheizt, damit ein Gasturbinengenerator zur Stromerzeugung betrieben. Ein Teil der tagsüber gewonnenen Hochtemperatur-Solarwärme kann durch Aufheizen von Sand gespeichert und daraus zur dunklen Tageszeit wieder entnommen werden, damit eine über Tag und Nacht kontinuierliche Stromerzeugung erreicht wird. Mit Anlagen dieser Art sollten Stromerzeugungskosten im Bereich von 6 bis 10 Cent pro kWh erreicht werden. Diese Art der technisch relativ einfachen, damit auch in technisch derzeit weniger hoch entwickelten Ländern handhabbaren Stromerzeugung mit Aufwind- oder Solarturm-Kraftwerken könnte zur Deckung des Bedarfs zum einen in bevölkerungsreichen Ballungszentren in äquatornahen Regionen, zum anderen – über verlustarme Hochspannungsleitungen über mehrere 1000 km z. B. aus Nordafrika nach Mitteleuropa – bei uns genutzt werden.

9.2.3 Energieeffiziente Gebäude und Heizwärme

Der *Energiebedarf für Heizung und Kühlung* von Innenräumen von Gebäuden auf Bereiche innerhalb gewünschter Komfortgrenzen kann unter Berücksichtigung des mathematisch-physikalisch einfach und eindeutig zu beschreibenden thermischen Verhaltens von Räumen und der örtlich gegebenen klimatischen Verhältnisse vor allem bei Neubauten, aber auch bei Sanierung von Altbauten unter Nutzung heute verfügbarer Baumaterialien kostengünstig und in architektonisch großer Vielfalt auf einen kleinen Bruchteil des Energiebedarfs in heutigen Gebäuden gesenkt werden. Der resultierende, relativ kleine Bedarf an Wärme kann je nach örtlichen Gegebenheiten gut aus Solarwärme, mittels Wärmepumpen aus Wasser- und Erdwärme und aus verfügbarer Abwärme technischer Anlagen gewonnen werden.

9.2.4 Wasserstoff als Brennstoff und Treibstoff

Der ideale Treibstoff für die PEM-BZ ist *Wasserstoff*, eine Lösung des Problems der H₂-Speicherung im KFZ vorausgesetzt. H₂ wird heute kommerziell aus Erdgas gewonnen. Künftig könnte H₂ in ausreichend großen Mengen erzeugt werden, entweder mittels Elektrolyse, sofern die dazu benötigten hohen Mengen an Strom für die Elektrolyse überhaupt und bezahlbar bereitgestellt werden können¹², oder mittels thermisch- bzw. photochemisch- oder photo-biologisch-katalytischer Wasserspaltung, sofern es gelingt, geeignete Katalysatoren zu entwickeln, die eine ergiebige, sehr hoch effiziente H₂-Erzeugung unter erträglichem Aufwand ermöglichen.

12 Um eine Menge an Wasserstoff mit einem Brennwert dem des derzeitigen gesamten Treibstoffverbrauchs in Deutschland entsprechend bereitzustellen, bräuchte man eine Menge an elektrischer Energie in Höhe des Doppelten des derzeitigen gesamten Stromverbrauchs in Deutschland.

9.3 Nutzung von Kernenergie aus Spaltung schwerer Atomkerne

Jedes technische Gerät kann zu unserem Nutzen gebraucht als auch zu unserem Schaden mißbraucht werden, wie schon am einfachen Beispiel, dem Messer, zu ersehen ist. Hinsichtlich der Nutzung der Kernenergie aus Spaltung schwerer Atomkerne wie Uran sei die Vision von Edward TELLER genannt, ausgesprochen noch vor dem Beginn von Entwicklung und Bau kommerzieller Kernkraftwerke ab der Mitte der 50er Jahre des letzten Jahrhunderts (DYSON 1979): »Nur betriebsmäßig in jeder Hinsicht sichere Kernkraftwerke – also Kernkraftwerke frei von jeglichem Risiko eines großen Unfalls mit Freisetzung großer Mengen an Radioaktivität – können auf Dauer von der Bevölkerung unserer Länder akzeptiert werden.«

Ein solcher Art inhärent sicherer, also katastrophenfrier Reaktor, der sogenannte Hochtemperatur-Kugelhaufen-Reaktor, HTR, mit auf maximal wenige 100 MW beschränkter elektrischer Leistung, wurde in Deutschland an der Kernforschungsanlage Jülich von 1957 bis ca. 1980 entwickelt. Als dieser Reaktortyp nach einer Entwicklungszeit von gut zwei Jahrzehnten schließlich marktreif gewesen ist, war der Markt schon durch den schneller, weil auf der Basis der bereits Mitte der 50er Jahre des letzten Jahrhunderts schon verfügbaren Leichtwasserreaktoren zum Antrieb von U-Booten in den USA entwickelten, marktreif gewordenen Leichtwasserreaktor, LWR, besetzt und wurde auch behauptet.

Inzwischen wurde die inhärent sichere HTR-Technik von China und auch von Südafrika übernommen. In China ist seit ca. zwei Jahren ein HTR Jülicher Bauart in Betrieb. Darauf fußend ist in China der Bau von kommerziellen HTR-Modulreaktoren in Planung mit dem Ziel, innerhalb von ein bis zwei Jahrzehnten den Strombedarf im eigenen Land zunehmend mit Reaktoren dieser Art zu decken und dann auch HTR-Kernkraftwerke auf dem Weltmarkt anzubieten (LOHNERT 2002).

Was die Entsorgung radioaktiver Abfälle betrifft, so ist – abgesehen von der wahrscheinlich prohibitiv aufwendigen Transmutation hochaktiver, langlebiger Atomkerne mittels Neutronen- oder Laserstrahlen zu kurzlebigen bzw. stabilen Atomkernen – auch eine Endlagerung radioaktiver Abfälle, hier in Form »ausgebrannter« Brennstoffkugeln, in welchen die Radioaktivität langzeitstabil in Keramik eingeschlossen bleibt, in Lagerstätten, ähnlich wie in natürlichen Lagerstätten von Uranerzen, wie z. B. in Deutschland im Schwarzwald, ohne das Risiko der Freisetzung von Radioaktivität in bedrohlichem Umfang realisierbar, wenn nach der Einbringung alle verbliebenen Hohlräume mit für Wasser schwer durchlässigem Material dicht verfüllt werden.

Die Vorräte an Uran als Energieträger von Atomkernspaltungsenergie sind beschränkt. Bei Nutzung in heutigem Umfang – weltweit ca. 50000 t Natururan, derzeit zur Deckung von 17 % des weltweiten Strombedarfs – reichen diese – ohne Streckung der Vorräte mittels Erbrütens von weiterem spaltbarem Material aus Uran-238 in speziellen Kernreaktoren – (BGR 1999)

- in Gesteinslagerstätten bei Förderkosten um 80 Euro/kg Uran (entsprechend einem Stromkostenanteil von 0,2 Cent/kWh) etwa 400 Jahre,
- im Meerwasser bei Förderkosten um 800 Euro/kg Uran (entsprechend einem Stromkostenanteil von 2 Cent/kWh) einige 10000 Jahre.

9.4 Nutzung von Kernenergie aus Fusion von Wasserstoffen zu Helium-Atomkernen

Schon seit mehreren Jahrzehnten wird in vielen Versuchsanlagen in vielen Ländern versucht, das Sonnenfeuer aus der Fusion von schweren Wasserstoff- (Deuterium- und Tritium-) zu Heliumatomkernen – angeblich schon von Prometheus Zeus entwendet und zur Erde gebracht – zu bändigen, um es schließlich einmal in kommerziellen Kraftwerksreaktoren zur Stromerzeugung nutzen zu können. Derzeit wird die Kernfusion entlang sehr verschiedener Wege verfolgt:

- (a) magnetischer Einschluß des Fusionsplasmas (TOKAMAK, Stellarator);
- (b) Trägheitseinschluß des Fusionsplasmas (initiiert mittels LASER-Strahlen oder mittels kurzer Strompulse erzeugter Röntgenstrahlen oder mittels Schwerionenstrahlen).

Auf all diesen Wegen sind noch wesentliche technische Probleme zu lösen. Ein herausragendes Problem ist die Entwicklung neuer Materialien

- um den hohen Temperaturen und der hohen Neutronenbestrahlung ausreichend standzuhalten,
 - um ausreichende Abschirmung von Neutronen und gleichzeitig das Brüten vom schweren Wasserstoffisotop Tritium aus Lithium mittels Neutronenbeschuß in möglichst kurzer Materialtiefe der Reaktorgefäßwand zu erzielen,
 - um die in der Reaktorgefäßwand hauptsächlich durch Neutronenbestrahlung erzeugte Wärme zur weiteren Nutzung – ausreichend kompakt nach außen abführen zu können.
- (c) *Last but not least*: muonkatalytische Fusion von Deuterium- und Tritium- zu Heliumatomkernen (einschließlich der sofortigen Muonfreisetzung aus der »Elektron«-Atomhülle des gebildeten Heliums, um für weitere Fusionen wieder verfügbar zu sein) mit Muonen, erzeugt mittels Hochenergieprotonen- oder -ionenbeschleunigern; auch auf diesem Weg sind noch bislang fast unüberwindlich erscheinende hohe Hürden zu beseitigen.

Die benötigten »Brennstoffe« Deuterium und Lithium (letzteres zum Erbrüten des benötigten Tritiums mittels Bestrahlung mit Neutronen aus der Fusion) sind auf der Erde in praktisch unerschöpflicher Menge vorhanden, Deuterium im Meerwasser, Lithium in der Erdkruste.

10. Fazit: Energie für unsere Zukunft. Was müssen wir tun?

Der Optionen umweltschonender innovativer Energietechnologien gibt es viele. Zum Teil können diese bereits heute genutzt werden; zum Teil bedarf deren Realisierung einer künftigen Nutzung aber noch der Forschung und Entwicklung, vor allem interdisziplinärer Spitzenforschung und entsprechender Entwicklung. Eine solche Spitzenforschung und entsprechende Entwicklung wiederum bedarf möglichst freizügiger Förderung ohne das heute übliche hemmende Übermaß an bürokratischen Hürden.

Nach der Bilanz der Optionen von technischen Energien und Energietechnologien können wir mit Blick auf die Zukunft, auf Energie für unsere Zukunft eine Antwort auf die Frage, was wir tun müssen, geben. Unsere ausgiebige Nutzung der außergewöhnlich reichlich, billig und ständig verfügbaren fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas zur Deckung unseres Bedarfs an technischer Energie zeitigt drei Folgen:

- Sie erlaubte, bewirkte die *Industrialisierung*, damit den sprunghaften Anstieg von materiellem Wohlstand (»Cargo¹³«) vornehmlich in den Industrieländern. Sie bewirkte auch den *rapiden Anstieg der Weltbevölkerung*, nicht zuletzt dank der gewaltigen Steigerung der landwirtschaftlichen Erträge durch die »grüne Revolution« mittels Kunstdünger und Technisierung der Landwirtschaft. Und sie bewirkte so und dank weltweitem Verkehr und weltweiter (Tele-)Kommunikation ein *Zusammenwachsen der Völker* rund um den Globus zu einem Organismus, bestehend aus vielen unterschiedlichen Völkern und Kulturen.
- Sie hat uns auch – durch und nach allzu reichlicher Nutzung über 200 Jahre – schließlich die Augen geöffnet, das *Menetekel der Risiken eines weltweit bedrohlichen Klimawandels* zu erkennen.
- Sie hat uns aber auch – gottseidank – die *technischen Möglichkeiten* eröffnet, heute eine künftige, *umwelterhaltende*, ausreichende und bezahlbare *Versorgung mit technischer Energie*, basierend auf erneuerbaren Energien und auf einer sicheren Atomkernenergie, aufbauen zu können.

Aber wir müssen mehr tun, als nur weiter zu technisieren, zu industrialisieren, dies alles nur zunehmend auf einer anderen Basis technischer Energieträger, und immer nur ein weiteres materielles Wirtschaftswachstum im Sinn, welches aber – ob wir wollen oder nicht – nicht zuletzt aufgrund spürbar sinkender Bevölkerungszahlen, heute schon in den meisten Industrieländern, in einigen Jahrzehnten wohl auch in heutigen Entwicklungs- und Schwellenländern, wie z. B. China, an Grenzen stoßen wird. Auf dieses »mehr tun« zielt auch diese Jahresversammlung der Leopoldina zum Thema »Energie«.

Nachdem wir, heute gut 6 Milliarden Menschen, die ganze Erde bereits weitgehend für uns in Beschlag genommen haben, dadurch den Naturraum Erde großenteils zum Kulturraum Erde gewandelt haben, gilt es nun, endlich diesen Kulturraum Erde auch zu bewahren, bewahrend zu gestalten, heute für gut 6 Milliarden Menschen, in einigen Jahrzehnten für wohl 8 Milliarden Menschen einer damit kulminierenden Weltbevölkerung. Darüber – unseren ausufernden, die Umwelt belastenden Lebensstil mit eingeschlossen – haben wir in der Vergangenheit nur wenig nachgedacht, noch weniger getan.

Gerade die Bewahrung des Kulturraums Erde erfordert eine, die natürlichen Kreisläufe erhaltende Nutzung, sowohl der natürlichen als auch der technischen Energieflüsse, damit auch den Erhalt der erst seit Beginn der heutigen Warmzeit vor gut 10000 Jahren günstigen, stabilen klimatischen Bedingungen und darauf fußend den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit der jeweiligen Klimazonen.

Dessen ungeachtet ist auch die Natur immer wieder Veränderungen unterworfen. Ausreichend schnelle Anpassungen an unvermeidliche natürliche Veränderungen als auch an vom Menschen bewirkte Veränderungen in Natur und Kultur erfordern eine dazu ausreichend große Artenvielfalt, sowohl in der Natur, hier von Fauna und Flora, als auch in Kultur, Wirtschaft und Technik.

Das für den Wandel von heute übernutztem Kultur- und Naturraum Erde zu einer erhaltenden Nutzung verfügbare Zeitfenster ist sehr klein. Wir können froh sein, wenn uns die Natur noch ausreichend viele Jahrzehnte Zeit läßt, den Wandel zu vollziehen, ohne daß wir schon katastrophale Einbrüche hinnehmen müssen. Dieser notwendigerweise schnelle und weltweit reichende, umfassende Wandel erfordert die *Vision eines Gesamtkonzepts*. Dieses Konzept ist

13 Siehe Fußnote 4.

zuerst und alsbald von der Wissenschaft in ihrer ganzen Vielfalt zu erarbeiten, transparent und verständlich zu machen. Dies ist ein Unterfangen, zu dem man eigentlich viel Zeit bräuchte, allein schon um die wissenschaftlichen Einsichten in ihrer Gesamtheit so umfassend zu verstehen, daß man sie auch in einer allen verständlichen Sprache einfach und kurz formulieren kann. Aber wir haben uns mit unserer, immer schneller werdenden naturwissenschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Entwicklung, bei welcher das Handeln den Einsichten der Folgen des Handelns immer (noch) vorausseilt, selbst in Zugzwang unter Zeitnot gebracht. Aber nur wenn uns eine klare Formulierung des visionären Gesamtkonzepts gelingt, kann dieses auch in die Gesellschaft der Völkervielfalt eingebracht, verstanden und akzeptiert werden, dies als Basis für das notwendige Handeln seitens der Gesellschaft angetrieben vom Willen zur Realisierung.

Sagen Sie jetzt bitte nicht: »So etwas geht doch nie.« Ein Blick in die Vergangenheit kann uns Beispiele für große, visionäre Konzepte und ihre umgehende Realisierung zeigen: So wurde z. B. schon vor etwa fünf- bis viertausend Jahren in Mesopotamien von den Sumerern durch ein künstliches Bewässerungssystem des Zwei-Strom-Landes, bis hin zur Eindeichung der Euphrat-Tigris-Mündung ins Meer (»... das Meer mit Türen verschlossen ...¹⁴«), das regenarme, bis dahin dünn bewachsene und entsprechend dünn besiedelte Land zu einem landwirtschaftlichen Garten Eden gemacht. Damit wuchsen die früher weiträumig verteilt lebenden, armen und kleinen Familien, Stämme zu einem bevölkerungsreichen, weil nahrungsreichen Volk mit kultureller und wirtschaftlicher Blüte von überregionaler Bedeutung zusammen.

Dieses Beispiel übertragen auf heute: Die Realisierung eines Gesamtkonzepts zu dauerhaftem Erhalt und Nutzung von Natur- und Kulturraum Erde könnte für alle Völker sehr hilfreich sein, könnte die Bewohner der Erde zu einer harmonischen, sich gegenseitig befruchtenden Gemeinschaft verschiedenartiger Völker und Kulturen zusammenwachsen lassen.

Nachdem der Mensch bislang weitgehend unwissentlich durch zu große Eingriffe in die Natur drastische Veränderungen eingeleitet und bewirkt hat, die die Menschheit schon bald in ihrer Existenz bedrohen können, mag es überaus anmaßend klingen, wenn wir uns nun einbilden, wir könnten auf wissenschaftlicher Basis ein Gesamtkonzept für eine Sanierung unseres angeschlagenen Lebensraums Erde erstellen, und wir, die weltweite Völkergemeinschaft, könnte ein solches Gesamtkonzept auch noch zügig realisieren.

In der Tat ist dies anmaßend. Und dennoch müssen wir dieses Wagnis eingehen; denn wahrscheinlich ist es unsere, der Menschheit von derzeit gut 6 Milliarden einzige Überlebenschance. Und dies erfordert aber zunächst auch ein schier übermenschliches Maß an vollständigem Verständnis aller wesentlichen naturwissenschaftlichen Zusammenhänge. Nur aus einem solchen Verständnis heraus kann man hoffen, das Ziel auch noch schnell genug zu erreichen.

Erreichen wir das Ziel, dann haben wir uns zu Recht die Bezeichnung »homo sapiens« zuerkannt. Ansonsten werden wir uns eher als »homo saurier« erweisen, den sein Schicksal ereilt.

14 Altes Testament, Hiob 38,8.

Literatur

- BERZ, G.: Die Zeichen stehen auf Sturm. Forschungsgruppe Geowissenschaften der Münchener Rückversicherungsgesellschaft. *Naturwissenschaften* 81, 1–6 (1994)
- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Ed.): XVII: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 1998. Hannover 1999
- DIAMOND, J.: *Guns, Germs and Steel: The Fates of Human Societies*. New York: W. W. Norton 1997 (dt. Übersetzung: *Arm und Reich: Die Schicksale menschlicher Gesellschaften*. Frankfurt (Main): S. Fischer 1998)
- DYSON, F. J.: *Disturbing the Universe*. New York: Harper & Row 1979 (dt. Übersetzung: *Innenansichten, Erinnerungen an die Zukunft*. Basel: Birkhäuser Verlag 1981)
- Enquete-Kommission* des 11. Deutschen Bundestages (Ed.): *Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre. Schutz der Erde*. Bonn: Deutscher Bundestag 1990
- FLOHN, H.: *Globale Energiebilanz und Klimaschwankungen*. Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften, Vorträge N234. Opladen: Westdeutscher Verlag 1973
- GRÄTZEL, M.: A photovoltaic device structure based on internal electron emission in a dye molecular layer. *Nature* 421, 568–616 (2003)
- GUTH, A. H.: The inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Physical Review D*, 23, 347 (1981)
- GUTH, A. H.: *The Inflationary Universe: The Quest of a New Theory of Cosmic Origins*. Reading, Mass.: Perseus Books 1997
- HALL, D. O., and RAO, K. K.: *Photosynthesis*. 6th Edit. *Studies in Biology*. Cambridge: Cambridge University Press 1999
- HEINLOTH, K.: *Die Energiefrage: Bedarf und Potentiale, Nutzung, Risiken und Kosten*. 2. erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2003
- HEINLOTH, K. (Ed.): *Landolt-Börnstein-New Series. Group VIII 3: Energy Technologies, Subvolume A: Fossil Energy (2002), Subvolume B: Nuclear Energy (2004), Subvolume C: Renewable Energy (2005)*. Berlin: Springer 2002, 2004, 2005
- HOHMEYER, O., and GÄRTNER, B.: *The Costs of Climate Change. Report of the Commission of the European Communities*. Karlsruhe: Fraunhofer Institut ISI 1992
- IPCC* (Intergovernmental Panel on Climate Change): *Frist Assessment Report 1990. Second Assessment Report 1995. Third Assessment Report 2002*. Cambridge: Cambridge University Press 1990, 1995, 2002
- KERR, R. A.: Will the Arctic Ocean lose all its ice? *Science* 286, 1828 (1999)
- LÖFKEN, I. O.: »Strombakterien«. *Angew. Chemie* 28. 06. 2003
- LOHNERT, G. (Ed.): The chinese high temperature reactor HTR-10. The first inherently safe generation IV nuclear power system. *Nuclear Engineering and Design* 218 (1–3) 1–268 (2002)
- PARTHIER, B. (Ed.): *Wasser – essentielle Ressource und Lebensraum*. Nova Acta Leopoldina Bd. 85, Nr. 323 (2002)
- SHELLNHUBER, H. J.: Aussage in ARD-Talkshow Sabine Christiansen. 18. 08. 2002
- SIEMENS, W.: Zitat in *Elektrotechnische Zeitschrift* 1 (1880)
- THEIS, K. A.: VGB-Powertech, Essen. Private Mitteilung 2003
- THORNDIKE, E. H.: *Energy and Environment*. Reading (Ma.): Addison-Wesley 1976
- TRYON, E. P.: Is the universe a vacuum fluctuation? *Nature* 246, 396 (1973)
- VILENKIN, A.: Creation of universes from nothing. *Physics Letters* 117 B, 25 (1982)
- WILSON, E. O.: *The Diversity of Life*. New York: W. W. Norton 1999
- ZEHNDER, A. J. B.: *Wasserressourcen und Bevölkerungsentwicklung*. In: PARTHIER, B. (Ed.): *Wasser – essentielle Ressource und Lebensraum*. Nova Acta Leopoldina Bd. 85, Nr. 323, 399–418 (2002)

Prof. Dr. Klaus HEINLOTH
Rheinische Friedrich-Wilhelms-
Universität Bonn
Physikalisches Institut
Nussallee 12
53115 Bonn
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 228 733604
Fax: +49 228 733518
E-Mail: heinloth@physik.uni-bonn.de

Zusammenfassung der Podiumsdiskussion »Energiepolitische Konsequenzen: Vor- und Nachteile der erneuerbaren Energien«¹

Herbert WALTHER (Garching)
Mitglied des Präsidiums der Akademie

Die Diskussion wurde von Herrn HEINLOTH nach vier Themenschwerpunkten strukturiert:

1. Welche erneuerbaren Energien sind in Deutschland in welchem Umfang zur Deckung des heutigen und künftigen Energiebedarfs an Strom, Heizwärme und Treibstoff verfügbar?
2. Organisation der Energieforschung in Deutschland.
3. Kostenvergleich erneuerbare und nicht erneuerbare Energien.
4. Objektive Information der Öffentlichkeit zur Energiepolitik.
5. Schlußworte der Diskussionsteilnehmer.

1.

Unter den Diskussionsteilnehmern bestand Einigkeit darüber, daß die erneuerbaren Energien zur Zeit nicht in der Lage sind, zur Deckung des Energiebedarfs in Deutschland in wesentlicher Weise beizutragen. Windenergie kann nur 10 bis maximal 15 % der heutigen Stromversorgung abdecken, da sonst erhebliche Investitionen in das konventionelle Energienetz in Form von Leitungen und konventionellen Kraftwerken gemacht werden müssen, um die Schwankungen des Windangebots auszugleichen. Der Beitrag der Solarenergie durch Photovoltaik ist vernachlässigbar und spielt bei der Versorgung von Randlagen eine Nischenrolle. Ein großer Nachteil ist, daß Speichermöglichkeiten in energiewirtschaftlichen Dimensionen noch nicht zur Verfügung stehen (WAGNER). Es wurde betont, daß die erneuerbaren Energien in einem robusten Energieversorgungskonzept nur einen marginalen Beitrag liefern können (PINKAU). Die Erkenntnis, daß dieser Beitrag momentan noch gering ist, sollte Anlaß sein, alle Einsparmöglichkeiten voranzutreiben, um somit den Anteil der erneuerbaren Energien an unserer Versorgung zu erhöhen (KELLER). Es wurde bei der Diskussion von den Vor- und Nachteilen der erneuerbaren Energien die Aufmerksamkeit auf die Frage gelenkt, was getan werden muß, um die erneuerbare Energie zu unserer Zukunft zu machen (IMBODEN), wobei in erster Linie die Einsparungen eine große Rolle spielen werden. Das Niveau des Verbrauchs liegt in Deutschland bei etwa 5000 W/Kopf und in Nordamerika sogar bei 11000 W/Kopf. Es sollte deshalb zu einer intelligenten Nutzung der Energie kommen, wobei ein wesentliches zusätzliches Argument ist, daß in China und Indien der Pro-Kopf-Verbrauch an Energie in der Zukunft erheblich ansteigen wird.

¹ Unter der Moderation von Klaus HEINLOTH (Bonn) waren zur Diskussion gebeten: Dieter IMBODEN (Z rich), Bruno KELLER (Z rich), Klaus PINKAU (M nchen), Hermann-Josef WAGNER (Bochum) und Dietrich H. WELTE (J lich).

Es wurde deshalb eindringlich darauf hingewiesen, daß es in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren zu erheblichen Energieengpässen kommen wird (WELTE). Eine intelligente Nutzung der Energie und ein simultaner Ausbau der erneuerbaren Energien ist deshalb unbedingt notwendig. Es ist jedoch unumgänglich, daß die Grundlast des Energieverbrauchs auch in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren aus fossilen Brennstoffen gedeckt werden muß, auch sollte die in Verruf geratene Kernenergie, insbesondere der Hochtemperaturreaktor, genutzt werden. Die erneuerbare Energie wird gebraucht, sie löst jedoch das Grundproblem der nächsten Jahre nicht.

Vom Diskussionsleiter wurde die Debatte auf die Frage gelenkt, inwieweit die Entwicklungsländer eine Chance durch die Erzeugung erneuerbarer Energien, die dann in die Industrieländer exportiert werden, erhalten könnten. Diese Möglichkeit wurde jedoch von den Diskussionsteilnehmern als nicht realistisch angesehen, wahrscheinlich ist der Zeitpunkt für eine Realisierung dieser Option bereits verpaßt. Es wurde auch kurz die Frage diskutiert, ob die Energieeinsparungen, die möglich sind, auf der anderen Seite in der Bevölkerung Bedürfnisse wecken könnten, das gesparte Geld auf eine andere Weise so auszugeben, die dann wiederum indirekt zu einer Erhöhung des Energiebedarfs führen würde. Es wurde bezweifelt, daß ein solcher Effekt tatsächlich eintritt und erneut eindringlich darauf hingewiesen, daß ein großer Energiebedarf in den weniger entwickelten Ländern in den nächsten Jahren entstehen wird, was die vorhandenen Energiressourcen sehr stark beanspruchen und zu erheblichen Engpässen führen wird (IMBODEN und KELLER). Die langfristige Sicherung der Versorgung mit Energie sollte deshalb ein sehr wesentliches Anliegen sein (WELTE).

2.

Die Diskussion wandte sich dann der Energieforschung zu, die sich in der Bundesrepublik in erster Linie auf die erneuerbaren Energien bezieht. Es wurde unter anderem festgestellt, daß die Forschungsgelder für Photovoltaik nicht abgerufen werden und die Mittel deshalb für den Aufbau von Photovoltaik-Stationen Verwendung finden. Die durchgeführte Energieforschung ist mehr eine Volumenforschung als eine Spitzenforschung (KELLER), und es wird zu viel mittelmäßige Forschung unterstützt (IMBODEN). In Deutschland besteht der Nachteil, daß weder eine Energiepolitik noch eine Energieforschungspolitik betrieben wird (WAGNER). Viele Bereiche der Energieforschung, die bisher beim Forschungsministerium angesiedelt waren, werden in die Betreuung des Umweltministeriums verschoben, was ein Zeichen einer zunehmenden Ideologisierung der Energieforschung ist (WELTE).

3.

Die Diskussionsrunde konzentrierte sich danach auf eine wirtschaftspolitische Frage. Die Nutzung erneuerbarer Energien zur Strom-, Wärme- und Treibstoffbereitstellung wird auch bei ausgefeilter Entwicklung dieser Techniken um den Faktor zwei bis drei teurer sein als das heutige Energieangebot. Um eine Dauersubvention zu vermeiden, muß die Politik einen Weg finden, der die Preise der fossilen Energieträger langsam ansteigen läßt, damit die erneuerbaren Energien eine Chance erhalten. Dies wird jedoch negative Auswirkungen auf das Wirtschaftswachstum haben.

Die Preise der fossilen Kraftstoffe spiegeln keinesfalls die Entwicklung unter den Bedingungen der Marktwirtschaft wider, sie werden heute schon durch andere Faktoren bestimmt, und sie werden auch in Zukunft insbesondere durch ihre Knappheit festgelegt werden. Der Übergang von einem Energiesystem zu einem anderen benötigt einige Jahrzehnte. Eine An-

passung könnte dadurch passieren, daß z. B. der Preis für fossile Brennstoffe ein Prozent pro Jahr zunehmen sollte. Wenn dieses Anwachsen über die nächsten zwanzig Jahre einplanbar wäre, dann würde es durchaus wirtschaftlich verkraftbar sein, und man könnte den Anbietern alternativer Techniken zeigen, mit welchen Konkurrenzpreisen sie zu rechnen hätten. Dies wäre eine vernünftige Energiepolitik. Energiepreisanstiege sind national gesehen kein Konkurrenznachteil. Es bestehen heute bereits unterschiedliche Energiepreise in Westeuropa, Amerika und Japan, ohne daß dies entscheidende Nachteile hätte (IMBODEN). Die Instrumente, um einen vernünftigen Übergang zu erneuerbaren Energien durchzuführen, sind im Prinzip vorhanden. Es ist notwendig, um die erneuerbaren Energien einen Schutzwall zu ziehen, wie z. B. durch das Erneuerbare-Energie-Gesetz, wobei zu klären ist, was dabei wirtschaftlich verkraftbar ist. Wahrscheinlich wird jedoch der Fall eintreten, daß durch die Energienachfrage aus Indien und China und die damit verbundene Verteuerung der fossilen Energieträger der Kohlenstrom genauso teuer wird wie die Windenergie, wodurch sich die neuen Systeme dann schnell einführen werden (WAGNER).

4.

Im nächsten Teil der Diskussion wurde das Problem einer objektiven Information der Öffentlichkeit erörtert. Insbesondere im Zusammenhang mit der Kernenergie hat es dabei in der Vergangenheit immer wieder Schwierigkeiten gegeben. Vom Diskussionsleiter wurde daher die Frage aufgeworfen, wer eigentlich die Verantwortung dafür trage, Öffentlichkeit und Politik ausreichend und wertneutral zu informieren.

Es bestand Übereinstimmung, daß zunächst innerhalb der Wissenschaftsgemeinde ein Konsens herbeigeführt werden muß. Es wurde dabei auf die Rolle der Akademien hingewiesen. Insbesondere müßte man auch einen geeigneten Mediator finden, der die Information in die Öffentlichkeit bringt (WELTE). Das Akademiemodell hat sich vor allem in England und den USA sehr bewährt (PINKAU). Es wurde auch die Frage erörtert, wie es möglich ist, daß Wissenschaftler von den wissenschaftlichen Fakten abweichend ideologisch gefärbte Empfehlungen abgeben können. Leider scheint es so zu sein, daß es genügend Alibiwissenschaftler gibt. Dies macht es dringend nötig, eine Form der Problembewertung zu finden, die die Seriosität der Wissenschaft in der Gesellschaft wieder herstellt (WELTE). Es wurde in diesem Zusammenhang auch die Meinung geäußert, daß die Wissenschaft ein großer Wirtschaftszweig geworden und in die Abhängigkeit von staatlichen und öffentlichen Geldern geraten ist. Ein Wissenschaftler ist damit zum Interessenvertreter geworden; dies erkennen zu müssen ist schmerzlich. Es sollte das Ziel einer Akademie sein, die nicht so impulsiv wie ein Einzelsprecher reagiert, zu versuchen, diese nicht normativen Inhalte zu kommunizieren, und zugleich zu sagen, von diesem Punkt an wird es normativ, und da scheiden sich die Geister (IMBODEN).

5.

Die Diskussion wurde schließlich durch Schlußworte der einzelnen Teilnehmer abgerundet. Herr PINKAU betonte dabei, daß es angesichts der gegenwärtigen Situation bei den erneuerbaren Energien dringend notwendig ist, die Optionen zur Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen und aus Kernenergie weiter zu öffnen, um eine krisenhafte Situation in unserer Energieversorgung zu vermeiden. Es sollte außerdem alles getan werden, das Vertrauen in die Wissenschaft wieder herzustellen.

Herr IMBODEN schwankte zwischen Pessimismus und Optimismus und hielt es in der gegenwärtigen Situation für dringend notwendig, alle Optionen der Energiegewinnung offenzuhalten.

Herr WELTE riet, in der Energiefrage zu einer Entideologisierung zu kommen, damit es endlich zu einem Wettbewerb der Ideen und Konzepte kommen kann.

Herr KELLER betonte, daß Neuentwicklungen eine sehr lange Zeit brauchen. Er ist deshalb der Meinung, daß es bereits zu spät ist, um auf einen positiven Verlauf der im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien begonnenen Entwicklungen zu warten. Die Zukunft der Energieversorgung der Welt wird nicht in Europa entschieden. Wenn man die 2000-Watt-Gesellschaft in China auf die 11000-Watt-Gesellschaft von Amerika projiziert und mit den entsprechenden Bevölkerungszahlen multipliziert, dann wird eindrucksvoll klar, was auf die Welt in naher Zukunft zukommt.

Herr WAGNER betonte, daß es dringend notwendig ist, die Augen der Politik für die wichtigen Fakten zu öffnen, die sie zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht sieht. Hierzu müssen dringend geeignete Wege gefunden werden.

Herr HEINLOTH faßte zusammen, daß sich in der Diskussion gezeigt hat, daß die Probleme, die im Zusammenhang mit der Energieproblematik zu lösen sind, sehr vielfältig sind. Es gibt Zwänge von seiten der Politik, wissenschaftliche Zwänge und Zwänge von seiten der Umwelt. Es wird leider auf Grund der Umstände nicht möglich sein, die Problematik mit der notwendigen Muse und Umsicht anzugehen.

Mit dem Dank an alle Diskussionsteilnehmer wurde die Runde geschlossen.

Prof. Dr. Herbert WALTHER
Max-Planck-Institut für Quantenoptik
Hans-Kopfermann-Straße 1
85748 Garching
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 89 32905704
Fax: +49 89 32905710
E-Mail: herbert.walther@mpq.mpg.de

Deutsche Energieforschung und Energiepolitik auf dem Prüfstand

Thesenpapier als Ergebnis der Leopoldina-Jahresversammlung »Energie« vom Oktober 2003¹

Zusammenfassung

Die Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina hat bei ihrer Jahresversammlung, die vom 17. bis 20. Oktober 2003 in Halle (Saale) stattfand, Fragen der langfristigen Energieversorgung in der Bundesrepublik Deutschland diskutiert. Als Ergebnis wurden folgende Forderungen an die Politik gerichtet:

- Die erfolgreichen Energiesparmaßnahmen Deutschlands in Haushalt, Industrie und Verkehr müssen weiter verfolgt werden.
- Die Bundesrepublik Deutschland ist zur Zeit auf dem Versorgungsmarkt mit Erdöl und Erdgas nicht ausreichend positioniert. Wegen der in Zukunft immer knapper werdenden Ressourcen ist eine langfristige Absicherung dringend notwendig.
- Erneuerbare Energien werden unseren zukünftigen Bedarf an Strom, Wärme und Treibstoffen nur zu einem geringen Teil decken können. Neben wissenschaftlich-technischen Gründen wird auch die zu erwartende Verteuerung der Energiekosten Grenzen der Bezahlbarkeit im Rahmen der Wirtschaftskraft setzen. Eine langfristige Absicherung der Energieversorgung wird nur möglich sein, wenn eine sinnvolle Mischung aus Energie von fossilen Brennstoffen, Kernenergie und erneuerbarer Energie angestrebt wird. Schritte in diese Richtung müssen eingeleitet werden.
- Durch die gegenwärtige Politik der Bundesregierung geht unser *Know-how* auf dem Gebiet der Kernenergie-Nutzung verloren. Die in Deutschland konzipierten und entwickelten katastrophensicheren Hochtemperatur-Reaktoren werden zur Zeit im Ausland (z. B. in China) weiterentwickelt und müssen wahrscheinlich in Zukunft importiert werden. Es ist dringend erforderlich, das gegenwärtige entsprechende *Know-how* zu erhalten.

Bei der weiteren Behandlung der Energiethematik in Politik und Öffentlichkeit ist es wichtig, einen Kontext zu schaffen, in dem Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit effektiv miteinander kommunizieren, um die Zukunft Deutschlands am Energiemarkt zu sichern. Die vergangenen Diskussionen waren allzu stark von wechselseitigen Mißverständnissen und von Mißtrauen geprägt. Dies hat anlässlich der Jahresversammlung auch eine exemplarische Analyse der schweizerischen Entscheidungsprozesse während der Kernenergie-Debatte ergeben. Die

¹ Dieses Thesenpapier wurde im Anschluß an die Jahresversammlung 2003 von einer *Ad-hoc*-Kommission unter Vorsitz des Präsidentschaftsmitglieds Herbert WALTHER (Garching) erstellt. Der Kommission gehörten außerdem an Klaus HEINLOTH (Bonn), Dieter IMBODEN (Zürich), Bruno KELLER (Zürich), Klaus PINKAU (Garching), Hermann-Josef WAGNER (Bochum) und Dietrich WELTE (Jülich).

Komplexität des Energiethemas bedarf einer umfassenden Behandlung, bei der unter Berücksichtigung der naturwissenschaftlich-technischen Fakten und der ökologischen Notwendigkeiten die gesellschaftlichen und politischen Langzeitperspektiven entwickelt werden. Dies ist ein Lernprozeß, der alle Strukturen der Gesellschaft einschließlich der Wissenschaft betrifft.

I. Langfristig Energieversorgung sichern

Ein vernünftiger Einsatz der auf der Erde zur Verfügung stehenden Energieressourcen wird entscheidend für die globale Zukunft sein. Dies gilt insbesondere für ein Land wie Deutschland mit ganz wenigen eigenen Energiequellen. Es ist notwendig, einen langfristigen Weg unserer Versorgung mit Strom, Wärme und Treibstoffen zu finden, der die Begrenzung der vorhandenen Ressourcen und drohende Versorgungsmonopole einerseits und die Umweltbelastung andererseits berücksichtigt. Planung und Umsetzung in der Energieversorgung haben eine Vorlaufzeit von vielen Jahren, deshalb ist eine Entscheidung längst überfällig, um Schwierigkeiten in der Versorgung mit Energie zu vermeiden.

Schwerpunkte der Leopoldina-Jahresversammlung »Energie«, die vom 17. bis 20. Oktober 2003 in Halle (Saale) stattfand, waren Fragen unserer langfristigen Energieversorgung und der zukünftigen Bedeutung der erneuerbaren Energien. Die Diskussionen haben sich vorwiegend mit den wissenschaftlichen und technischen Grundlagen, den wirtschaftlichen Aspekten und dem notwendigen Forschungsbedarf beschäftigt. Im Mittelpunkt stand dabei die gegenwärtige Situation in der Bundesrepublik Deutschland.

Im folgenden werden die Ergebnisse der Tagung dargestellt und die Konsequenzen daraus diskutiert, die unter den Schlüsselbegriffen Versorgungssicherheit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit stehen. Die Akademie bereitet zur Zeit eine ausführliche Publikation der Ergebnisse vor, die als Buch vorliegen wird.

II. Deutschland – eines der energieeffizientesten Länder der Welt

Bemerkenswert ist, daß Deutschland eines der energieeffizientesten Länder der Welt ist. Durch Einsatz von Energiesparmaßnahmen in Haushalt, Industrie und Verkehr ist bereits ein hoher Grad an Einsparungen erreicht worden, der dazu geführt hat, daß der Bedarf an Primärenergie weniger angestiegen ist als erwartet. Zu einem Teil ist dies allerdings auch darauf zurückzuführen, daß energieintensive Industrien Standorte in Ländern mit niedrigeren Energiekosten bevorzugt haben oder aus wirtschaftlichen Gründen geschlossen worden sind. Die Bemühungen, Energie einzusparen, sollten auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen.

III. Fossile Energieträger

Für die nächsten Jahrzehnte wird die Energieversorgung mit fossilen Brennstoffen noch den größten Teil unserer Versorgung mit Strom, Wärme und Treibstoffen ausmachen. Es ist notwendig, die Versorgungssicherheit Deutschlands mit fossilen Brennstoffen durch eine langfristige Energiepolitik zu garantieren. Andere große europäische Länder haben eine bessere Positionierung in punkto Erdöl- und Erdgasversorgung erreicht, als die Bundesre-

publik Deutschland. Die günstige geographische Lage Deutschlands zu den Gasvorräten Rußlands bietet einen sehr großen Vorteil, der den Verbrauch bei den fossilen Brennstoffen zugunsten von umweltfreundlichem Erdgas verschieben sollte.

Die Steigerung der Effizienz von Kraftwerken durch den Einsatz neuer Materialien ist sehr wesentlich, ebenso wie die Steigerung der Effizienz der Verbrennungsmotoren. In diesem Zusammenhang ist auch die Entwicklung der Brennstoffzelle von besonderer Bedeutung. Methanhydrat auf dem Meeresboden bietet möglicherweise eine große Energiereserve, deren Ausbeute allerdings auch Gefahren für das Klima mit sich bringen kann. Die Forschung auf diesem Gebiet ist deshalb erforderlich und auf beide Aspekte zu richten.

IV. Erneuerbare Energie

a) *Biomasse und Biotreibstoffe*: Bei der Deckung des Energiebedarfs durch nachwachsende Rohstoffe kann derzeit nur von einem unter 10 % liegenden Anteil für Strom, Treibstoffe und Wärme ausgegangen werden. Im Rahmen der Europäischen Gemeinschaft werden langfristige Versorgungsmöglichkeiten verfolgt, wobei als Ziel eine Deckung von höchstens 10 % des Energiebedarfs gesehen wird.

b) *Nutzung der Solarenergie*: Es ist im Moment nicht abzusehen, ob diese Form der Energienutzung in der Bundesrepublik Deutschland einen größeren Beitrag zur Energieversorgung liefern kann. Sie ist jedoch als lokale Versorgungsnische in abgelegenen Standorten und durch Einsatz von Solarkollektoren zur Gebäudeheizung und Warmwasserversorgung geeignet. Solarenergie kann jedoch künftig eine große Rolle spielen, falls Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Nutzung der Solarenergie, wie etwa die Entwicklung von Photozellen einer neuen Generation, die Untersuchung photochemischer Prozesse, wie etwa die katalytische Wasserspaltung, und ähnliche Prozesse zu durchbruchartigen Erfolgen führen werden. Gleichzeitig muß die Frage einer sinnvollen Energiespeicherung angegangen werden, da eine ausgiebige Nutzung der Sonnenenergie nur dann möglich sein wird, wenn entsprechende Speicher für Perioden geringerer oder nicht verfügbarer Sonneneinstrahlung vorliegen.

c) *Wasser und Wind*: Die Nutzung der Wasserkraft ist in Deutschland weitgehend ausgeschöpft. Es ist offensichtlich, daß der Anteil der Stromerzeugung durch Wind begrenzt ist, da die Windmenge sehr starken Schwankungen unterworfen ist und deshalb eine Grundlastversorgung auf andere Weise gewährleistet sein muß: Die erforderliche dauerhafte Verfügbarkeit ist also nicht gegeben. Es können deshalb auf absehbare Zeit keinesfalls mehr als etwa 15 % der notwendigen elektrischen Energie durch Windanlagen bereitgestellt werden. Technologisch und wirtschaftlich sinnvoll ist vor allem eine Erzeugung von Windenergie an küstennahen, ökologisch unbedenklichen Standorten. Gleichzeitig sind aber auch Vorkehrungen für Leistungskompensation bei Windflauten und für ein ausreichend weitgreifendes Stromverteilungsnetz zu treffen.

d) *Geothermische Energie*: Die Nutzung geothermischer Energie spielt in Deutschland nur eine Nebenrolle und kann bestenfalls für Hauswärme eingesetzt werden. Weltweit erbringen Erdwärmekraftwerke ca. 0,4 % der gesamten Stromproduktion, hauptsächlich durch Nutzung natürlicher Heißdampfquellen mit ausreichend hohen Dampftemperaturen bis zu etwa 200 °C.

V. Energieerzeugung durch Kernspaltung und Kernfusion

a) *Spaltung*: Die Grundversorgung mit Energie wird in der näheren Zukunft nicht ohne die Kernenergie auskommen. Die Versorgung mit fossilen Energieträgern wird schwieriger werden, und die erneuerbaren Energien werden so schnell keinen Ausgleich schaffen können. Aus diesem Grunde wird die Kernenergie für den Übergang notwendig sein. Neue Technologien, wie z. B. der Hochtemperaturreaktor, führen zu einer größeren Sicherheit als bei den zur Zeit im Einsatz befindlichen Reaktortypen. Die Weiterentwicklung dieser katastrophensicheren Reaktoren, die im wesentlichen in Deutschland ihren Ursprung hatte, ist in den letzten Jahren vernachlässigt worden. Diese Form der Energie wird in Zukunft unentbehrlich sein, auch zur Energieversorgung der Schwellenländer. Der damit verbundene Anstieg des Gesamtenergiebedarfs in der Welt kann wegen der Umweltproblematik und der begrenzten fossilen und erneuerbaren Ressourcen nur durch die Kernenergie gedeckt werden. Die Problematik der Wiederaufbereitung und Endlagerung der Brennelemente wird für lösbar gehalten. Es ist notwendig, daß der Einsatz von Kernenergie in Deutschland neu überdacht wird. In diese Überlegungen sollten der steigende Zugriff europäischer Staaten auf die Kernenergie sowie das energiepolitisch offene Handeln von Schwellenländern einfließen.

b) *Fusion*: Langfristig wird es notwendig sein, die Energieerzeugung durch Kernfusion zur technischen Einsatzreife zu führen. Auf diesem Gebiet gibt es internationale Anstrengungen, in deren Rahmen zur Zeit das Tokamak-Großexperiment ITER mit einem brennenden Fusionsplasma vorbereitet wird. Nach der Realisierung dieser Anlage werden noch weitere langjährige Entwicklungsarbeiten folgen müssen, bis eine breite Nutzung der Fusion möglich ist. Es ist dringend erforderlich, daß sich die Bundesrepublik Deutschland, die bisher bereits grundlegende Beiträge geleistet hat, weiter in angemessener Weise an diesen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben beteiligt.

VI. Ausblick

Bei der weiteren Behandlung der Energiethematik in Politik und Öffentlichkeit ist es wichtig, einen Kontext zu schaffen, in dem Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit effektiv miteinander kommunizieren, um die Zukunft Deutschlands am Energiemarkt zu sichern. Die vergangenen Diskussionen waren allzu stark von wechselseitigen Mißverständnissen und von Mißtrauen geprägt. Dies hat anläßlich der Jahresversammlung auch eine exemplarische Analyse der schweizerischen Entscheidungsprozesse während der Kernenergie-debatte ergeben. Die Komplexität des Energiethemas bedarf einer umfassenden Behandlung, bei der unter Berücksichtigung der naturwissenschaftlich-technischen Fakten und der ökologischen Notwendigkeiten die gesellschaftlichen und politischen Langzeitperspektiven entwickelt werden. Dies ist ein Lernprozeß, der alle Strukturen der Gesellschaft einschließlich der Wissenschaft betrifft.

Halle (Saale), im Dezember 2003