

akzent

Hans-Dieter Naumann

# Wo steckt noch Energie?



---

Hans-Dieter Naumann

Wo steckt noch  
Energie?

---

Urania-Verlag Leipzig · Jena · Berlin

**Autor: Dipl.-Ing. Hans-Dieter Naumann, Radeberg**

**Illustrationen: Gerhard Raschpichler, Leipzig**

**1. Auflage 1983**

**1.–30. Tausend. Alle Rechte vorbehalten**

**© Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin**

**Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, Leipzig 1983**

**VLN 212-475/65/83 · LSV 3209/00450**

**Lektor: Ingelore Naukarinen**

**Einbandreihenentwurf: Helmut Selle**

**Typographie: Julia Strube**

**Printed in the German Democratic Republic**

**Gesamtherstellung: INTERDRUCK**

**Graphischer Großbetrieb Leipzig, Betrieb der ausgezeichneten**

**Qualitätsarbeit, III/18/97**

**Best.-Nr. 6538316**

---

# Inhalt

---

## Energie und Gesellschaft 7

Energieträger heute und morgen 11

Warum regenerative Energiequellen? 16

## Die Sonne – ein Fusionsreaktor im All 19

Sonnenfarmen und Sonnentürme 25

Strom direkt aus Sonnenlicht 37

Solarzellenplantagen in der Wüste? 47

Sonnenkraftwerke im Weltraum? 52

## Energie aus der Atmosphäre 61

## Strom aus Abfällen 71

## Wasserkraftwerk im Grönlandeis? 80

## Energie aus den Weltmeeren 83

Kraftwerksgigant in der Penschina-Bucht 86

Genutzte Wellenkraft 93

Meereswärmekraftwerke 99

## Energie aus Erdwärme 105

## Kommt eine Wasserstoff-Ära? 116

## Bilanz und Ausblick 125



---

# Energie und Gesellschaft

---

Der Griff zum Lichtschalter, das Einschalten von Rundfunk- und Fernsehgerät, elektrischer Waschmaschine oder Gasherd im Haushalt sind uns heute ebenso selbstverständlich wie die Inbetriebnahme elektrischer Werkzeugmaschinen, der Elektroschmelzöfen oder der Stückgutförderanlagen im Betrieb. Niemand könnte sich unser Zeitalter ohne all diese Dinge denken. Wie unentbehrlich sie uns sind, merken wir meist erst, wenn Gas- oder Stromversorgung einmal unterbrochen sind.

Die aus natürlichen Quellen gewonnene Energie hat sich über Jahrhunderte zum Kraftquell unseres Lebens, zur Hauptschlagader menschlicher Zivilisation entwickelt.

»Energie«, so lesen wir in unseren Aufzeichnungen aus dem Physikunterricht, »ist die Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten.« Seien wir ehrlich – wie oft haben wir diese Definition, gedanklich und mit Beispielen versehen, an uns vorüberziehen lassen, ehe wir die eminente Bedeutung des Energiebegriffs als Fundamentalgröße der Physik begriffen? Und wie lange brauchten wir, bevor uns klar wurde, daß Energie noch viel, viel mehr ist – eine Fundamentalgröße fast aller naturwissenschaftlichen Disziplinen, ein Wirtschafts- und Gesellschaftsfaktor ersten Ranges. Ja, wir müssen diese Definition sogar korrigieren, denn sie betrifft eigentlich nur diejenigen Energien, die wir technisch, energiewirtschaftlich auch nutzen können. Viele Systeme enthalten Energien, die auf keinem Weg in Arbeit umzuwandeln sind, sogenannte Anergien.

*Braunkohle in der DDR nach wie vor Energieträger Nr. 1*

Hierauf weiter einzugehen würde jedoch den Rahmen dieses Buches sprengen.

Als es dem Menschen etwa 100000 Jahre vor Beginn unserer Zeitrechnung gelang, durch den Gebrauch des Feuers erstmals die Herrschaft über eine Naturkraft zu gewinnen, trennte er sich, wie Friedrich Engels schrieb, endgültig vom Tierreich. Engels wies damit auf den untrennbaren Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Produktivkräfte und der Nutzung und Erschließung von Energiequellen und des Energieaufkommens hin. Und tatsächlich: Jede große Umwälzung der Entwicklungsgeschichte der menschlichen Gesellschaft ist von der Nutzbarmachung neuer Naturkräfte, neuer Energiequellen begleitet, baut darauf auf, erfordert sie. Die Entwicklung der Energetik liefert uns damit ein imposantes Abbild der Entwicklung der Produktivkräfte.

Die großen Umwälzungen des 18. und 19. Jahrhunderts, die industrielle Revolution, wurden ebenso durch fundamentale Erfindungen und Entwicklungen auf dem Gebiet der Energetik eingeleitet und begleitet wie die wissenschaftlich-technische Revolution des 20. Jahrhunderts. Noch Mitte des 19. Jahrhunderts wurden mehr als 90 % aller benötigten Energien durch menschliche und tierische Muskelkraft aufgebracht. 6 % etwa lieferten Windmühlen, Wasserräder und die ersten Dampfmaschinen. Heute entfällt kaum noch 1 % auf die Arbeitsleistungen von Mensch und Tier, alles andere entstammt technisch genutzten Naturkräften. In der Urgemeinschaft, der Sklavenhaltergesellschaft und der feudalistischen Epoche waren Mensch und Tier Hauptenergielieferanten, obwohl hier schon interessante und durchaus reale Ideen zur Nutzung von Naturkräften zu finden sind. Zur Zeit des Alten Reiches in Ägypten kreuzten auf dem Nil die ersten Segelschiffe, getrieben von der Kraft des Windes. Auf der Pyrenäenhalbinsel sowie in Griechenland entstanden in Anlehnung an die Segelschiffe die ersten Windräder. Antipater von Thessalonien (106–43 v. u. Z.) berichtete schon vom Gebrauch von Wasserrädern, und unter dem römischen Kaiser Augustus entstanden die ersten großangelegten Wasserkraftanlagen. 120 v. u. Z. demonstrierte Heron von Alexandria mit seiner Dampfreaktionskugel

Energie- träger Zeit	Muskel- kraft	Holz	Kohle	Erdöl	Wasser- kraft	Kern- energie	Sonstige
500000 v.u.Z.	100						
2000 v.u.Z.	70	5					25
um 1500	10	70					20
1910		16	65	3			16
1935		7	55	15	5		18
um 1970		10	32	34	5	1	18

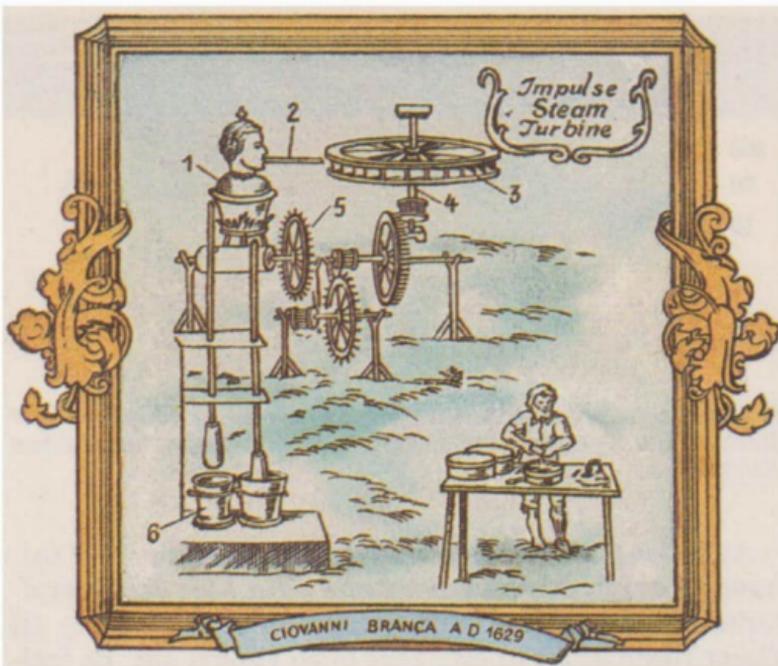
*Prozentuale Anteile verschiedener Primärenergieträger an der Deckung des Gesamtenergiebedarfs in verschiedenen historischen Epochen*

(»Äolipile«) die Kraft des Wasserdampfs, im 17. Jahrhundert durch den Italiener Branca zur Idee der Dampfturbine weitergeführt. Eine großtechnische Nutzung all dieser Ideen und Projekte aber blieb vorerst aus. Es fehlten die technisch-technologische Basis, vor allem aber auch das fördernde ökonomische Interesse der herrschenden Klassen jener Epochen, denen Sklaven und Leibeigene billigere Energielieferanten waren.

Mit der industriellen Revolution begann das Maschinenzeitalter. Der Bedarf an Antriebsenergie überstieg das bis dahin Verfügbare um das Vielfache. Im Jahre 1769 erschloß J. Watt (1736–1819) mit der Erfindung der Dampfmaschine die Energie des Wasserdampfs endlich der industriellen Nutzung. Die Dampfmaschine, deren Energie an beliebigen Orten über riesige Transmissionen zu Arbeitsmaschinen gelangte, wurde zum Symbol einer neuen Epoche, mehr, zu ihrer Grundlage. Sie führte zu einem spontanen Anstieg der Arbeitsproduktivität, vor allem im Bergbau, in der Metallurgie und Textilindustrie.

Hundert Jahre später, im Jahre 1867, fand W. von Siemens (1816–1892) das dynamoelektrische Prinzip – das Duo Dampfmaschine und Elektrogenerator leitete das Zeitalter der Elektrifizierung ein. 1883 erschienen die ersten Modelle von Dampfturbinen, die Watts Kolbendampfmaschinen bald verdrängten.

Die Elektroenergie entwickelte sich schnell zu einer be-



1629 entwarf der Italiener Branca eine Dampfmaschine als Ersatz für menschliche Muskelkraft. 1 – Behälter zum Erhitzen von Wasser; 2 – Dampfaustrittsdüse; 3 – Turbinenrad; 4, 5 – Zahnradgetriebe

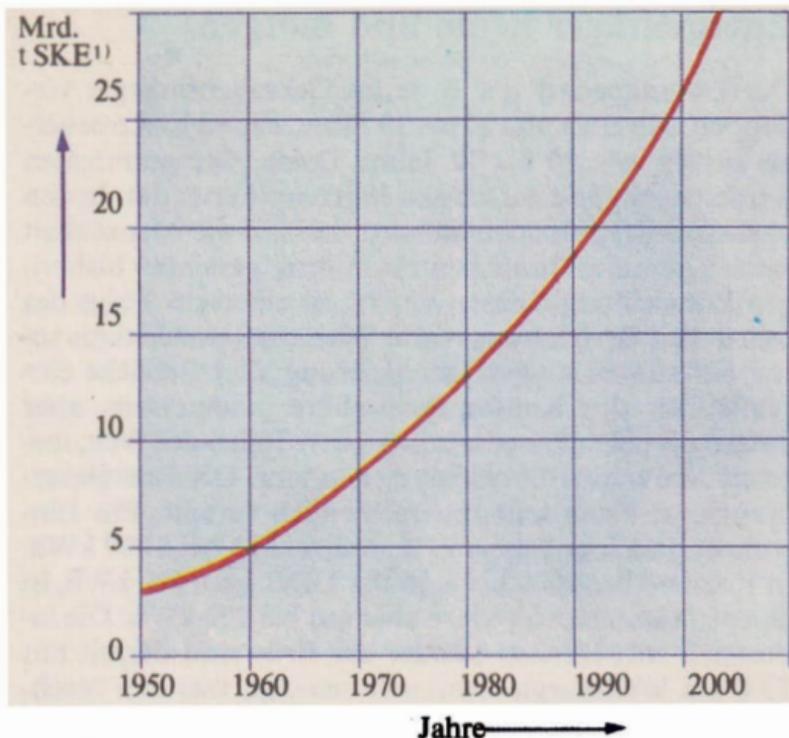
deutsamen Energieform. Sie ist es heute noch und wird es bleiben. Am Prinzip ihrer Erzeugung hat sich seitdem nicht viel geändert. 90% entstehen über den Weg Turbine-Generator.

Aber wir befinden uns heute wieder an einem Wendepunkt – besser in einer zeitlich sehr ausgedehnten Wende: Woher und wie den enorm gewachsenen Energiebedarf decken? Benötigt werden keine neuen Energieformen, sondern neue Wege, vorhandene Quellen rationeller zu nutzen, und neue Primärquellen. Energieeinsparungen durch moderne Geräte und Verfahren, wie sie der umfassende Einsatz der Mikroelektronik in allen Wirtschaftsbereichen beispielsweise erbringt, können wesentlich zur Verbesserung der volkswirtschaftlichen Energiebilanz beitragen, aber sie sind nicht der einzige Weg, den Wissenschaft und Technik zur perspektivischen Deckung des wachsenden Energiebedarfs weisen, den die künftige Entwicklung der menschlichen Gesellschaft erfordert.

## Energieträger heute und morgen

Der Gesamtbedarf der Erde an Gebrauchsenegie verdoppelt sich etwa alle 20 bis 30 Jahre, der an Elektroenergie bereits alle 10 bis 12 Jahre. Diese Wachstumsraten werden auch für die nächsten Jahrzehnte erwartet. In den nächsten drei Jahrzehnten wird deshalb die Menschheit mehr Energie verbrauchen als in ihrer gesamten bisherigen Entwicklung. Dieser Anstieg ist einerseits Folge des weltweiten Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums sowie der zunehmenden Technisierung aller Bereiche einschließlich der Konsumtionssphäre, andererseits aber auch des Nachholebedarfs in großen Teilen der Welt, insbesondere in den Entwicklungsländern. Der Energieverbrauch ist heute sehr unterschiedlich verteilt. Pro Einwohner und Jahr liegt er z. B. in den USA bei 8000 kWh, in England bei 4000 kWh, in der DDR bei 4400 kWh, in den afrikanischen Ländern aber nur bei 100 kWh. Die industriell entwickelten Länder der Erde sind derzeit mit 75 % am Weltenergieverbrauch beteiligt, was den Nachholebedarf bei einer Industrialisierung in den Entwicklungsländern zumindest ahnen läßt.

Den Löwenanteil von etwa 90 % am Primärenergieaufkommen der Erde bestreiten heute die Primärenergieträger Kohle, Erdöl und Erdgas. Sie verkörpern prähistorisch gespeicherte Sonnenenergie und regenerieren sich heute nicht mehr. Obwohl über die tatsächlichen Ressourcen noch recht differenzierte Vorstellungen bestehen, ebenso über die realen Bedingungen und Möglichkeiten des Abbaus besonders in großen Tiefen vermuteter Vorkommen, ist klar, daß die künftige Primärenergieträgerstruktur einen langfristigen qualitativen Wandel erfahren und der summarische Anteil fossiler Energieträger an der Weltenergieerzeugung abnehmende Tendenz haben wird. Wie gesagt, dieser Wandel erstreckt sich über längere Zeiträume, denn allein die technologische Erschließung neuer Energiequellen wird Jahrzehnte dauern. Aus heutiger Sicht aber sind zunächst einmal die fossilen Energieträger in noch ausreichender Menge vorhanden, um auch in den nächsten Jahrzehnten Energieträger Nummer 1 zu bleiben. Im Jahre 2000 wird ihr Anteil am Weltenergie-



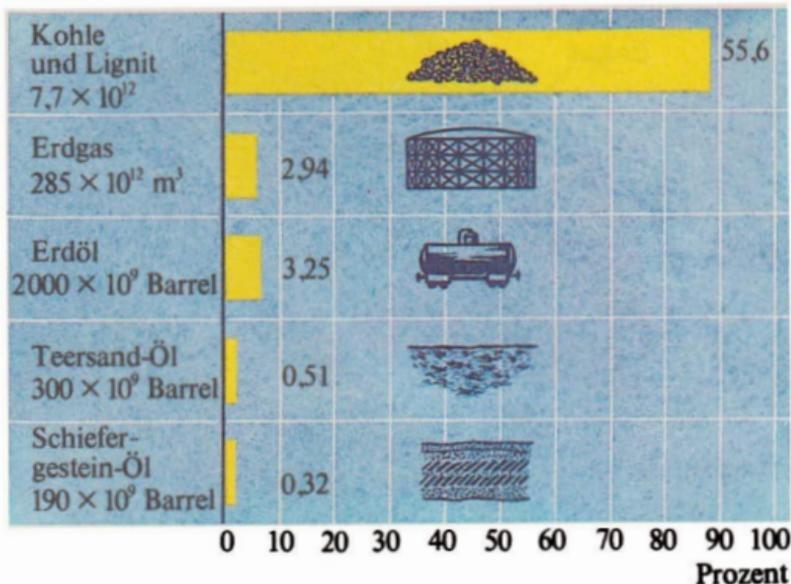
Die Entwicklung des Weltenergieverbrauchs ist durch starkes Wachstum gekennzeichnet (SKE = Steinkohleeinheiten).

aufkommen noch bei 60 bis 80 % liegen – in diesem Bereich bewegen sich heutige Prognosen.

Die Kohle, die in den zwanziger Jahren mit über 50 % ihren Maximalanteil an der Energieträgerstruktur hatte, steht noch etwa 2000 Jahre zur Verfügung, wenn heutige Förderleistungen beibehalten werden. Ihre weltweiten Vorkommen belaufen sich auf etwa  $600 \cdot 10^9$  t SKE (Steinkohleeinheiten).

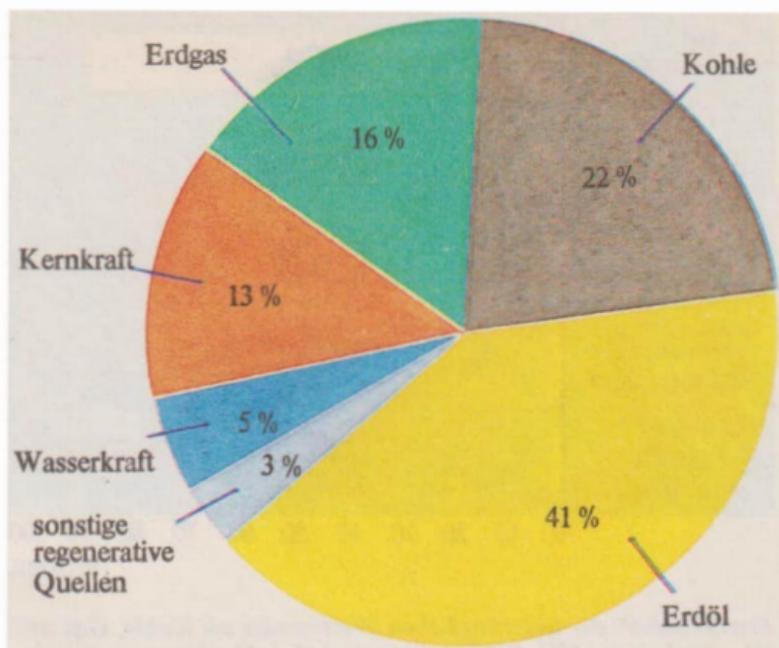
Weitaus begrenzter sind die (bekannten) Vorkommen an Erdöl und Erdgas. Die bekannten förderungswürdigen Vorkommen an Erdöl werden zu rund  $87 \cdot 10^9$  t SKE

<sup>1</sup> Die SKE wird vielfach dem statistischen Vergleich von Brennstoffen aller Art zugrunde gelegt, indem man deren Menge in kg oder t SKE umrechnet. Eine SKE repräsentiert den Wärmeinhalt von  $294 \cdot 10^6$  J/kg. 1 kg Braunkohle mit einem Heizwert von  $735 \cdot 10^5$  J/kg z. B. entspricht damit 0,25 kg SKE.



*Energieinhalt der ursprünglichen Weltvorräte an Kohle, Gas und Öl. Einheiten  $10^{15}$  KWh; ursprüngliche Vorräte an fossilen Brennstoffen 100 %*

eingeschätzt. Die jährliche Förderleistung liegt heute bei  $3 \cdot 10^9$  t SKE. Es sei angemerkt, daß die tatsächlichen Vorkommen hier noch weitgehend unbekannt und daher umstritten sind. Erdgas schließlich erlangte einen Strukturanteil von 20 %, den es bis 1990 zumindest beibehalten wird. Verschiedene Prognosen räumen ihm auch steigenden Anteil ein. Die gegenwärtig bekannten Vorräte belaufen sich auf etwa  $70000 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . Schätzungen noch erschließbarer Lager gehen bis zu  $280000 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . Die jährliche Förderung beträgt derzeit rund  $1400 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  und könnte bis 1990 auf  $4000 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  gesteigert werden, um dann wieder rückläufige Tendenz zu zeigen. Neben den fossilen Energieträgern gehört heute die Kernenergie bereits zu den konventionell genutzten Energiequellen. Seit der Inbetriebnahme des ersten Kernkraftwerkes der Welt in Obninsk bei Moskau im Jahre 1954 hat sie ständig an Bedeutung gewonnen und wird weiterhin steigenden Anteil erlangen. Es steht außer Zweifel, daß die Kernenergie als perspektivischer Hauptenergieträger zu betrachten ist. Gegenwärtig liegt ihr Anteil an der weltwei-



*Prognose der Energieträgerstruktur für das Jahr 2000 – der hohe Erdölanteil allerdings ist stark umstritten.*

ten Elektroenergieerzeugung bei 8%. In einigen Ländern, wie Schweden, Belgien und der Schweiz, betrug dieser Anteil bereits 1975 rund 15 bis 18%, und Frankreich will um die Jahrhundertwende 20% erreichen. Die UdSSR erzeugt derzeit etwa 18000 MW<sup>1</sup> aus Kernenergie, die bis 1990 auf 90000 MW erhöht werden sollen. Die Kernkraftenergie der RGW-Staaten soll bis dahin von heute 37000 MW auf 120000 MW gesteigert werden. Die Zahl der Kernkraftwerke auf unserem Planeten hat 200 bereits überschritten, und ebenso viele befinden sich im Bau. Gemäß einer 1980 veröffentlichten Prognose westeuropäischer Energieexperten ist für das Jahr 2000 mit einer Energieträgerstruktur im Weltmaßstab zu rechnen, wie sie die Grafik zeigt. Wie alle Prognosen sind sicher auch diese Zahlen im Detail anfechtbar, vor allem was den Anteil des Erdöls angeht. Deshalb wollen wir sie auch hier nicht mit buchhalterischer Gründlichkeit sehen, sondern

<sup>1</sup> M = Mega = 10<sup>6</sup>; G = Giga = 10<sup>9</sup>; T = Tera = 10<sup>12</sup>

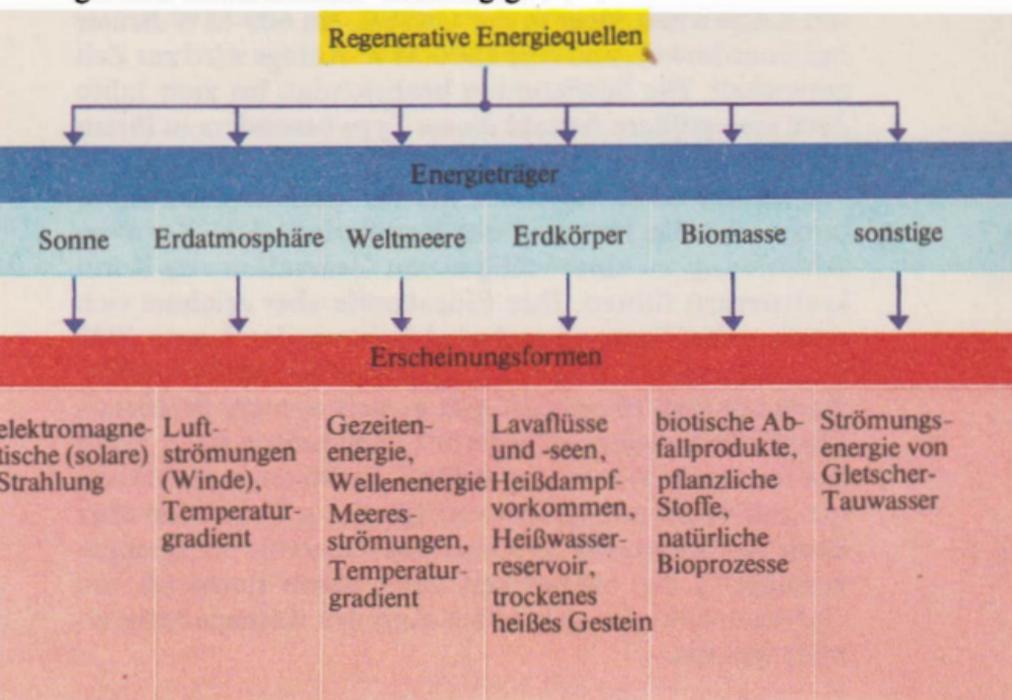
als das, was sie ist, eine Prognose, die die Grundrichtung für die künftige Entwicklung, die qualitative Tendenz, abzeichnet.

Der Kernenergie und ihrer weiteren Entwicklung gebührt im Weltenergiegeschehen deshalb zweifellos die größte Aufmerksamkeit. Obwohl die Kernenergienutzung bereits einen hohen technisch-technologischen Stand erreicht hat, steht auch hier die Entwicklung noch lange nicht still. Die gegenwärtig betriebenen sogenannten Leichtwasserreaktoren ergeben nur eine geringe Ausnutzung des Kernbrennstoffs. Der Bedarf ist dadurch so groß, daß die bekannten Vorräte an Uranerz in zwei bis drei Jahrzehnten erschöpft wären, ähnlich denen des Erdöls. Etwa siebzigmal besser ist die Ausnutzung bei den sogenannten Brutreaktoren, wie sie unter anderem in der UdSSR seit 1949 entwickelt werden und zu denen in den nächsten Jahren zunehmend übergegangen wird. Ihr Einsatz, auch in Kombinationsanlagen, sichert die Nutzbarkeit der Vorräte auf Jahrhunderte. Ein erster Reaktor dieses Typs arbeitet seit 1973 mit einer Leistung von 350 MW am Kaspischen Meer in der UdSSR, ein 600-MW-Brüter bei Swerdlowsk, und eine 1 600-MW-Anlage wird zur Zeit entwickelt. Die Sowjetunion beabsichtigt, bis zum Jahre 2000 eine größere Anzahl dieses Typs besonders in ihrem europäischen Teil zu errichten.

Arbeiten beide Versionen auf der Basis der Kernspaltung, wird die Nutzung der Kernfusion, d. h. Kernverschmelzung, zu einer völlig neuen Generation von Kernkraftwerken führen. Ihre Einsatzreife aber zeichnet sich erst in weiter Ferne ab und wird nicht vor den Jahren 2030 bis 2050 erwartet. Solche Anlagen sind umweltfreundlich. Auch mit dem Brennstoff gibt es weit weniger Probleme. Das unter anderem erforderliche Deuterium ist in Form des Schweren Wassers zu 0,016 % im Meerwasser enthalten und damit unbegrenzt verfügbar. 1 g Deuterium aber kann 10 t Steinkohle ersetzen. Das Reservoir der Energieversorgung der Menschheit kann damit nochmals um Größenordnungen gegenüber dem der Kernspaltung erhöht werden.

## Warum regenerative Energiequellen?

Ziehen wir an dieser Stelle eine Bilanz, die notwendig ist, um das Spektrum jener Energiequellen, mit denen wir uns auf den folgenden Seiten befassen wollen, richtig einzuordnen, so kommen wir zu folgender Erkenntnis: Für die Befriedigung des künftigen Energiebedarfs der Menschheit ist ein großes und ausreichendes Reservoir von Energieträgern verfügbar. Unsere Aufgabe ist es, dieses zu erschließen und optimal zu nutzen; eine gleichmäßige Verteilung eingeschlossen. Die Nutzung fossiler Energieträger wird mit ständig steigendem Aufwand verbunden sein, da die Kosten für weitere Erkundungen und Erschließungen und die Förderung selbst immer höher werden. Die Erschließung gänzlich neuer Quellen, insbesondere der Kernfusion, erfordert noch erhebliche geistige und materielle Investitionen, um Einsatzreife zu erreichen. Insgesamt haben wir also keinen Anlaß zu energetisch düsteren Prognosen, aber auch keinen Anlaß, Energie mit übertriebener Großzügigkeit zu handhaben.



*Nichtnukleare, regenerative Energiequellen*

Wenn wir deshalb fast täglich von Aktivitäten, Vorhaben, Studien, Projekten, Experimenten und Kraftwerken lesen, die noch andere, sogenannte alternative oder, richtiger, ergänzende Energiequellen – insbesondere die Sonnen-, Wind-, Meeresenergie und geothermische Energien oder sogar die Biomasse – nutzen bzw. auf deren Nutzung hinzielen, erhebt sich folgerichtig die Frage nach dem »Warum«. Sie ist nicht mit einem Satz zu beantworten. Gemeinsames Kennzeichen all dieser Energiequellen ist ihre Unerschöpflichkeit. Sie erfahren eine ständige Regenerierung und stehen deshalb zeitlich unbegrenzt zur Verfügung. Ihre Nutzung ist in der Regel mit einer weit aus geringeren Umweltbelastung verbunden als die der fossilen Energieträger und der Kernspaltung. Bei einer Reihe dieser Energieträger bilden allerdings mögliche anderweitige, vielfach noch nicht übersehbare ökologische Auswirkungen Grenzen für den Umfang der Nutzung. Auch muß im Rahmen dieser pauschalen Bemerkungen darauf hingewiesen werden, daß die Nutzung dieser Quellen fast durchweg starken zeitlichen und territorialen Einschränkungen unterworfen ist.

Erschließung und Nutzung der nichtnuklearen und nichtfossilen Energiequellen sind deshalb weder heute noch in Zukunft unter dem Aspekt der Konkurrenzalternative zu sehen, vielmehr geht es um regionale Beiträge zur Deckung des Energiebedarfs im Interesse höherer regionaler Versorgungssicherheit, um die Eigenversorgung territorial abgelegener Verbraucher oder um ergänzende, die Versorgungssicherheit erhöhende Beiträge für Verbundsysteme überall dort, wo günstige Bedingungen für eine Nutzung bestehen und eine ökonomische Konkurrenzfähigkeit mit aus anderen Quellen gewonnenen Energien erreicht wird. Ein sehr wichtiger Nutzungsaspekt kann ferner die genannte Umweltfreundlichkeit, d. h. die im Vergleich zu anderen Quellen geringere Umweltbelastung durch Abprodukte, sein. Damit ist klar, daß all diese Quellen nicht zum Hauptenergieträger einer künftigen Energieträgerstruktur werden können, aber an der Seite fossiler und nuklearer Träger zunehmenden Anteil an der Deckung des Energiebedarfs haben werden. Unter diesen Aspekten sollten wir die folgenden Seiten lesen.



---

# Die Sonne – ein Fusionsreaktor im All

---

Unter den regenerativen Energiequellen gebührt der Sonne eine gewisse Sonderstellung. Als Zentralgestirn unseres Planetensystems ist sie Energiespender allen Lebens auf dem in ihrer Ökosphäre gelegenen Planeten Erde. Alle fossilen Energieträgerressourcen im Schoß unseres Mutterplaneten sind nichts anderes als vor Jahrmillionen gespeicherte Sonnenenergie.

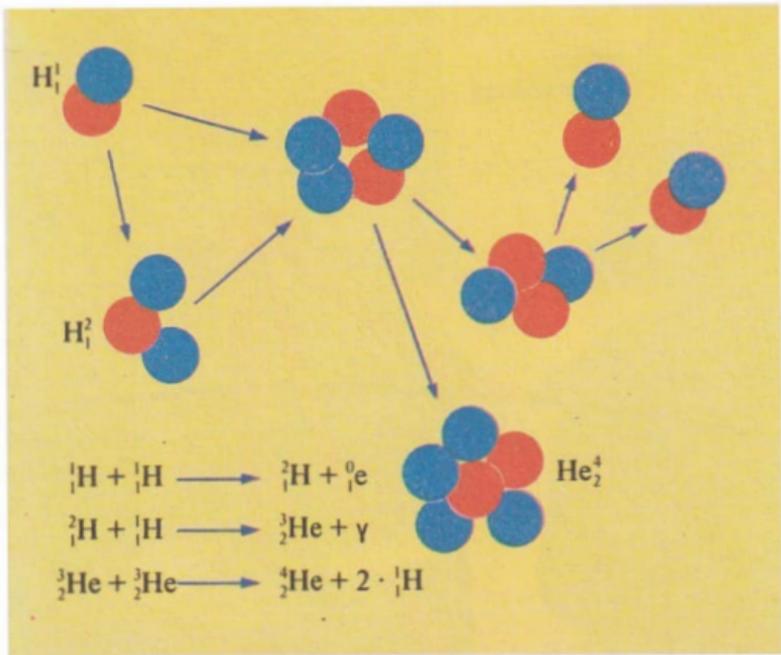
Schon vor Jahrtausenden begannen die Menschen, auch vom Energieangebot der Sonne, das uns kontinuierlich als Strahlung erreicht, Gebrauch zu machen. Vor über 3000 Jahren leiteten die Ägypter mit komplizierten Spiegelsystemen Sonnenenergie durch die weitverzweigten Systeme tief in die Erde führender Gänge und Schächte, um auf diese Weise bei Licht in die Wände der Grabkammern ihrer Könige Verzierungen einzuarbeiten. 214 v. u. Z., so berichtet die Historie, nutzten die Verteidiger der griechischen Hafenstadt Syrakus die Sonnenstrahlen als Waffe gegen die Römer. Die Idee lieferte der berühmte Philosoph und Wissenschaftler Archimedes (um 287–212 v. u. Z.), der auch durch die Entwicklung einer Reihe ingenieur- und kriegstechnischer Geräte hervortrat. Die Syrakuser nutzten eine Vielzahl hochglanzpolierter Bronzeschilder als Hohlspiegel, mit deren Hilfe sie die römischen Holzgaleeren in über 100 m Entfernung in Brand setzten und damit den über drei Jahre andauernden Belagerungszustand beendeten. Archimedes war auch der erste, dem es gelang, mit Sonnenenergie Wasser zum Sieden zu bringen.

*Die Sonne – Energie- und Lebensquell unserer Erde*

Im 17. Jahrhundert finden wir Vorschläge für mit Sonnenenergie betriebene Springbrunnen, und im 18. Jahrhundert waren es besonders französische Wissenschaftler, die mit Ideen zur Nutzung der Sonnenenergie Aufsehen erregten. So experimentierte der Naturwissenschaftler G. L. de Buffon (1707–1788) mit Anlagen, die bis zu 360 Spiegel enthielten und mit denen er Blei und Silber zum Schmelzen brachte. Sein Landsmann G. D. Cassini (1625–1712) erzielte mit einem 1,1 m großen Spiegel eine Brennpunkttemperatur von  $1100^{\circ}\text{C}$ , und A. L. Lavoisier (1743–1794) gelang es, in einem kugelförmigen Glasbehälter auch schwerschmelzende Metalle mit stark konzentriertem Sonnenlicht in die flüssige Phase zu überführen. 1878 erregte anlässlich einer Pariser Ausstellung eine Dampfmaschine Aufsehen, auf deren Dampfkessel mit einem großen Spiegel Sonnenstrahlung konzentriert wurde. Im 19. Jahrhundert entstanden bereits fortgeschrittenere Anlagen und Sonnenöfen mit Spiegeln bis zu 3 m Durchmesser. So baute der Amerikaner J. Bricon (1803–1889) eine sonnenbeheizte Dampfmaschine, die immerhin 2,5 »Pferdestärken« lieferte. Erwähnenswert sind auch die vom Engländer Harding 1883 in Chile entwickelten Geräte zur Wasserdestillation mittels Sonnenstrahlen. Mit diesen und vielen anderen Apparaten und Konstruktionen waren die wesentlichsten Grundideen zur Nutzung der Sonnenenergie bereits entwickelt, aber erst in unserem Jahrhundert ist diese Energiequelle ernsthafter in den Blickpunkt energetisch-technologischer Interessen gerückt.

Astronomisch gesehen, ist die Sonne ein Fixstern der Spektralklasse G 1 und der Leuchtklasse 5. Sie hat einen mittleren Durchmesser von etwa  $1,4 \cdot 10^6$  km und eine Masse, die etwa das 330000fache der Erdmasse beträgt. Ihr Aufbau ist sehr kompliziert und beruht auf einer Schalenstruktur. Die effektive Oberflächentemperatur liegt bei 6000 K. Im Zentrum herrschen vermutlich etwa 20 Mio K bei Drücken von  $10^{16}$  Pa und einer Dichte von  $100\text{g/cm}^3$ .

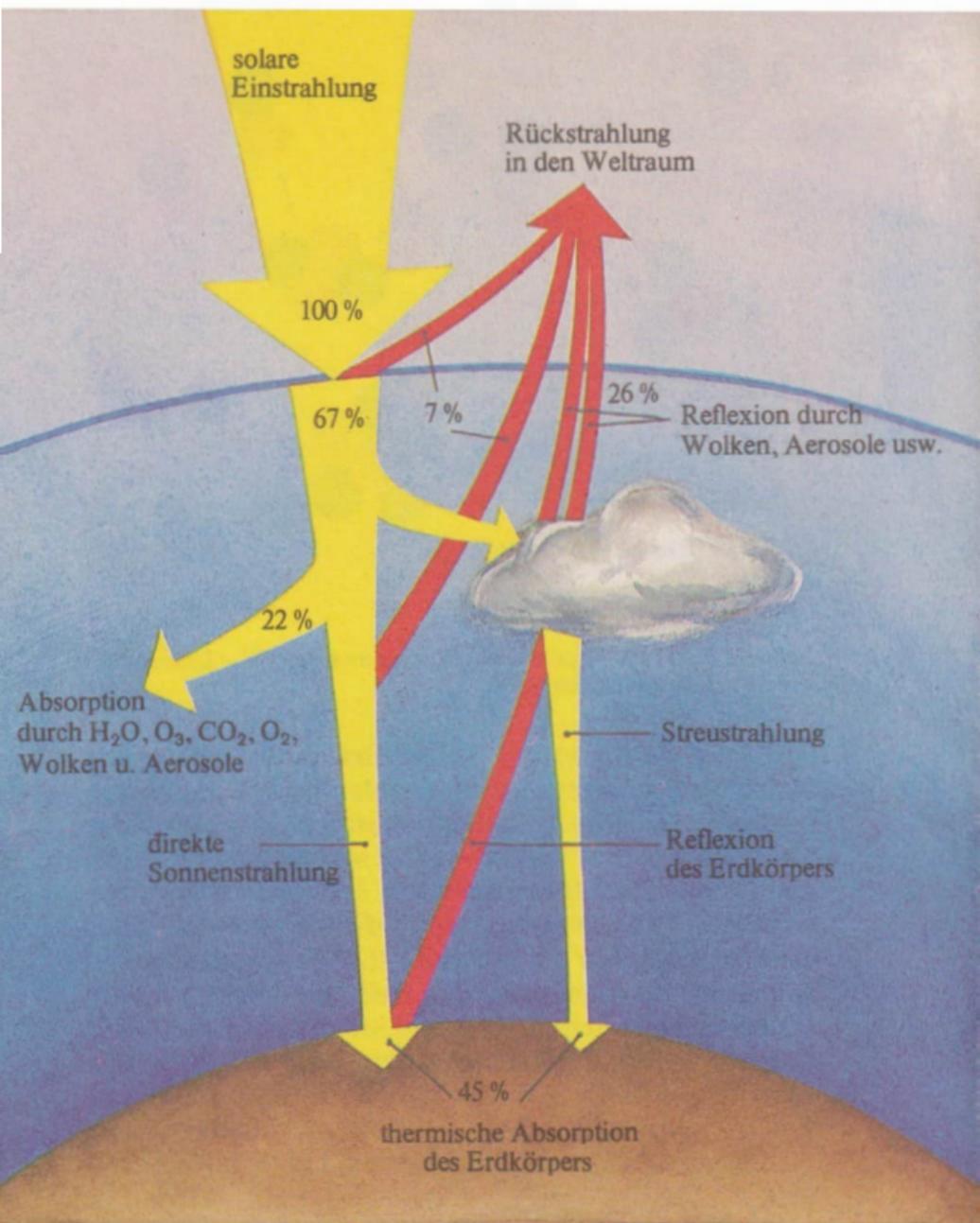
Energetisch verkörpert die Sonne einen riesigen Kernfusionsreaktor, der durch seine Energieabstrahlung pro Sekunde  $4,3 \cdot 10^9$  kg an Masse verliert. Die Energieab-



*Schema der Fusionsreaktionen der Sonnenmaterie – Ursache der solaren Strahlungsenergie*

strahlung erfolgt in der unmittelbaren Umgebung des Zentrums der Sonne durch hier ablaufende Kernfusionsprozesse, bei denen Atommasseanteile in äquivalente Energie umgesetzt werden. Dabei verschmelzen 4 Protonen (Wasserstoffatome) zu einem Heliumkern über verschiedene Zwischenprodukte. Da die 4 Wasserstoffatome einer Masse von  $4 \cdot 1,008 = 4,032$  Masseeinheiten entsprechen, die Atommasse des Heliums aber nur 4,0026 Einheiten entspricht, entsteht ein Massedefekt von 0,0294 Masseeinheiten, für den entsprechend der bekannten Einsteinschen Beziehung für die Masse – Energie – Relation  $E = m \cdot c^2$  ( $E =$  Energie,  $m =$  Masse,  $c =$  Lichtgeschwindigkeit) eine entsprechende Energie als »Gegenwert« auftritt.

Die Sonne strahlt ihre Energie radial in den Weltraum ab. Die Erde selbst erhält davon etwa nur ein halbes Milliardstel. Das ist immerhin pro Minute in etwa noch soviel, wie die ganze Menschheit pro Jahr verbraucht. Die Sonnenenergie, die auf eine  $8000 \text{ km}^2$  große Fläche bei

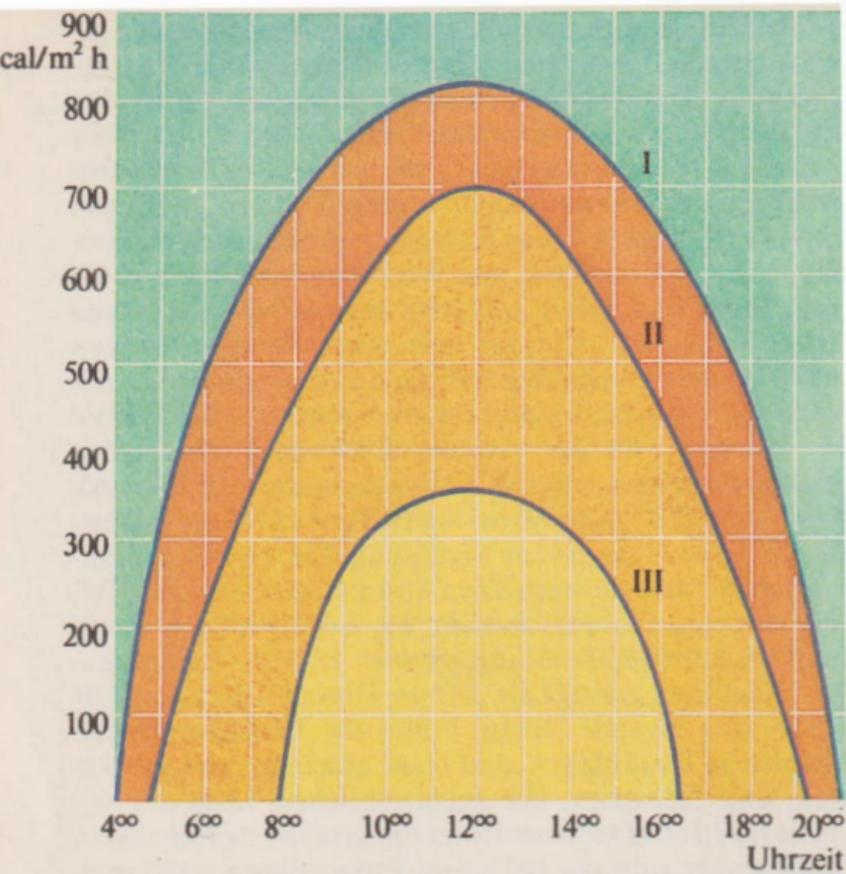


### Energiebilanz der Sonneneinstrahlung

wolkenfreiem Himmel fällt, wäre ausreichend, um den gegenwärtigen Primärenergiebedarf der gesamten Menschheit zu decken. Das freilich sind theoretische Vergleiche, die lediglich die Dimensionen verdeutlichen sollen. Über praktisch Nutzbares sprechen wir später. Der Absolutbetrag, den die Erde empfängt, liegt bei  $173 \cdot 10^9$  MW, also bei 173 Mrd. MW. Diese Energie erreicht uns als elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen zwischen 0,2 und  $5 \mu\text{m}$ . Ihre spektrale Verteilung entspricht etwa der eines schwarzen Körpers mit einer Temperatur von 6000 K. Beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre hat der solare Energiestrom eine Leistungsdichte von  $1,374 \text{ kW/m}^2$ . Diesen Wert der extraterrestrischen Strahlungsleistung bezeichnet man als Solarkonstante. Auf die Erdoberfläche treffen im Mittel weltweit nur 67 % und stehen hier für eine Nutzung zur Verfügung. Ursache sind die atmosphärischen Absorptionen und Reflektionen. Ein Teil der Sonnenstrahlung erreicht die Erdoberfläche direkt und wird direkte Strahlung genannt. Ein Teil der gestreuten Strahlung gelangt als diffuse Himmelsstrahlung zur Erde. Die Summe beider bildet die Globalstrahlung. Sämtliche Strahlungen sind stark abhängig von der Tages- und Jahreszeit, der geographischen Lage auf der Erde und den klimatisch-meteorologischen Bedingungen. Damit aber sind wir bei einem Problemkreis angelangt, der noch voranzustellen ist, nämlich bei den Besonderheiten der Energiequelle Sonne:

– Das Energieangebot ist zeitlich und örtlich nicht konstant. Außer den zuvor genannten Einflüssen sind besonders der Tag-/Nacht-Rhythmus bzw. der durch die Erdrotation verursachte Verlauf des Sonneneinstrahlungswinkels zu nennen, der keine gleichmäßige Energieeinstrahlung gewährleistet und im Interesse einer optimalen Ausnutzung beispielsweise eine Nachführung der Energieauffangflächen entsprechend dem Lauf der Sonne erfordert.

– Durch die Kugelgestalt der Erde ist der Einfallswinkel der Sonnenstrahlen für verschiedene Breitengrade unterschiedlich. Optimale Voraussetzungen bieten die äquatornahen Gebiete, während in nördlichen Zonen eine Nutzung so gut wie ausgeschlossen ist.



*Sonneneinstrahlung für unterschiedlich ausgerichtete ebene Flächen in der Zeit Juni–Juli (50. Breitengrad). I der Sonne nachgeführte Fläche; II horizontale Fläche; III vertikal nach Süden ausgerichtete Fläche*

– Sonnenenergie ist außerordentlich umweltfreundlich und verursacht aus heutiger Sicht keine gravierenden Umweltbelastungen. Zu beachten sind jedoch ästhetische Beeinträchtigungen durch den hohen Flächenbedarf, den die Auffang- und Wandlerysteme für den solaren Energiestrom erfordern.

Welche prinzipiellen Möglichkeiten gibt es für die Nutzung des Energieangebots der Sonne?

Verfügbare und in Aussicht gestellte Umwandlungstechniken lassen sich in wenige Hauptgruppen unterteilen:

- solarthermische Systeme und Anlagen zur Gewinnung von Wärmeenergie,
- solarelektrische Systeme und Anlagen zur direkten Gewinnung von Elektroenergie,
- solarthermoelektrische Systeme und Anlagen zur Gewinnung elektrischer Energie über den Umweg Wärmeenergie,
- Hybridsysteme, genauer thermisch-elektrische Systeme, die zur gleichzeitigen Gewinnung von Wärmeenergie und – auf direktem Weg – elektrischer Energie dienen.

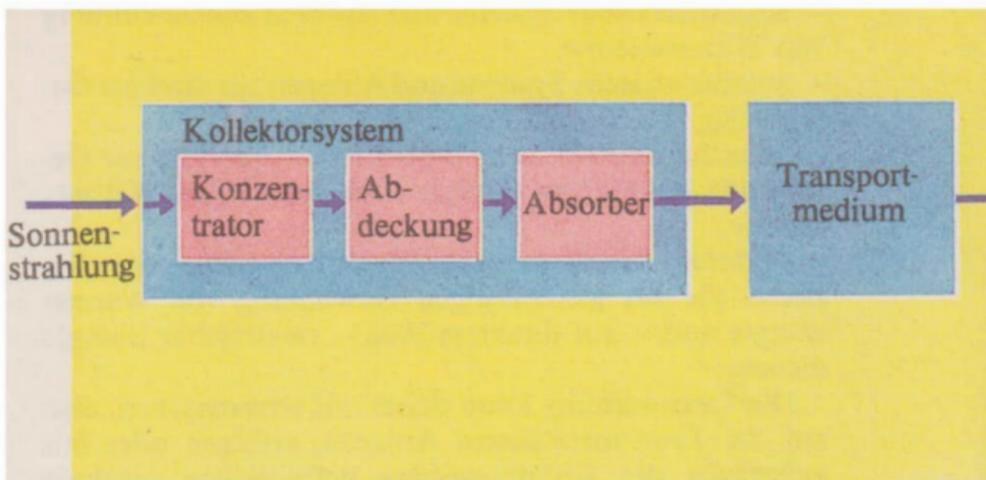
Die Umwandlung kann dabei mit terrestrischen, also auf der Erde installierten Anlagen, erfolgen oder mit außerhalb der Erdatmosphäre befindlichen (orbitale Nutzung). Letztere erfordern unter anderem die Erschließung wirtschaftlicher Methoden für einen gefahrenfreien Energietransport zur Erde.

Sehen wir uns die wichtigsten Methoden näher an!

## Sonnenfarmen und Sonnentürme

Die Wärmeerzeugung steht heute in der Energienutzung obenan. Nahezu drei Viertel der in der DDR bereitgestellten Energie dienen der Wärmeerzeugung. Den Löwenanteil davon verbraucht die Industrie für technologische Wärmeprozesse in Industrieöfen. Nur ein Fünftel wird für die Raumheizung genutzt. In der DDR existieren etwa 40000 Industrieöfen, vor allem in der Metallurgie, der Kohleveredlung, der Glas-, Keramik- und Lebensmittelindustrie. Können sie künftig auf »Sonnenbetrieb« umgestellt werden?

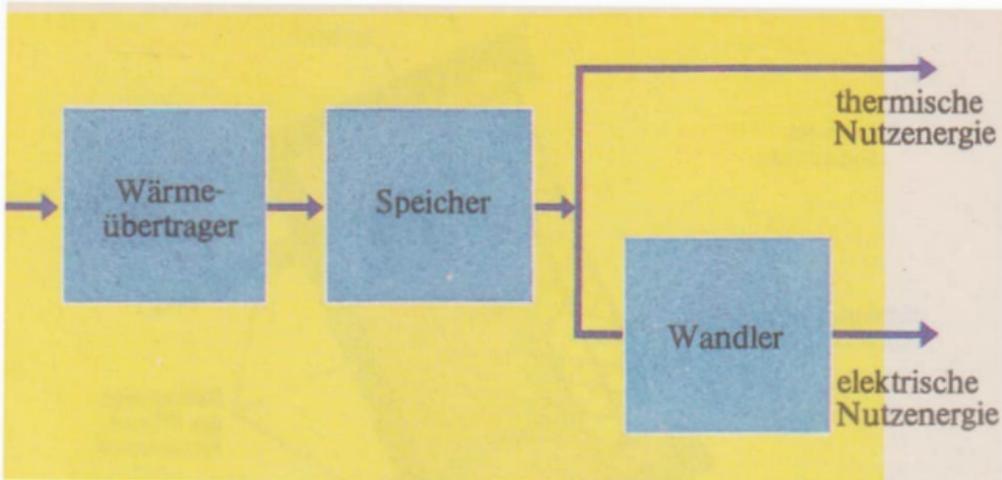
Daß Sonnenstrahlen wärmen, ist eine Alltagserkenntnis. In zahlreichen, besonders tropischen Ländern werden sie schon seit vielen Jahren für hauseigene Kleinanlagen zur Warmwasserbereitstellung und Raumheizung genutzt. In Japan z. B. produzierten 1980 bereits 50 Hersteller etwa 500000 sonnenbetriebene Warmwasseraufbereitungsanlagen, etwa 5 % der japanischen Haushalte waren zu jenem Zeitpunkt mit solchen Anlagen ausgestattet. In weniger dicht besiedelten Südgebieten des Landes er-



*Blockschema solarthermischer Wandlungssysteme*

reichte der Verbreitungsgrad sogar 15%. Bis 1985 sollen rund 10 Mio der japanischen Haushalte mit solarthermischen Raumheizungs-, Heißwasserbereitungs- und Klimaanlage ausgestattet sein.

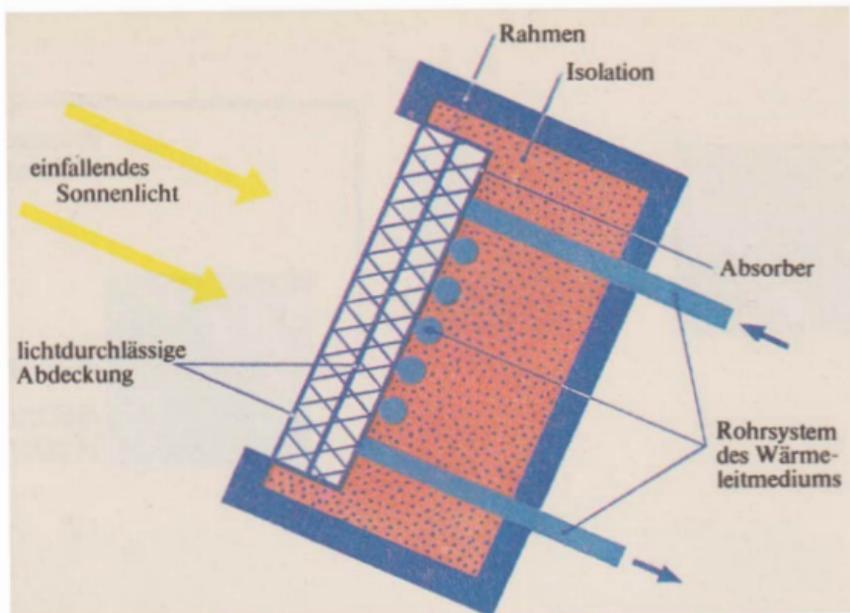
Ersparen wir uns weitere Beispiele der zahllos möglichen, kommen wir zur Technik. Das Blockschema zeigt die Komponenten solarthermischer Systeme. Nicht jede Anlage muß sämtliche Komponenten enthalten; je nach Einsatzfall sind unterschiedliche Kombinationen und Varianten möglich. Die Entwicklung ist alles in allem noch stark in Fluß, und neue Erkenntnisse, z. B. der Werkstoffforschung, bedingen oft neue Lösungen. Kernstück ist der Kollektor, dessen Hauptbestandteil wiederum der Absorber ist, in dem die eigentliche Umwandlung der eingefangenen Sonnenstrahlen in Wärme erfolgt. Er soll möglichst viel Sonnenstrahlung aufnehmen und viel Nutzwärme bei geringen Wärmeverlusten abgeben. Im einfachsten Fall besteht er aus einer geschwärzten Metallfläche (Aluminium, Kupfer), die die solare Strahlung zu 90 bis 97% absorbiert. Verluste entstehen vor allem durch Wärmeabgabe infolge Leitung, Konvektion und Strahlung sowie Reflektionen der einfallenden Strahlung. Bei Sonneneinstrahlung steigt die Temperatur des Absorbers so lange an, bis zwischen absorbiertem Strahlung und



abgegebener Wärme ein Gleichgewichtszustand eintritt. Dieser entspricht praktisch dem Betriebszustand. Um die Verluste gering zu halten, wird die Absorberfläche mit transparenten und strahlungsselektiven Abdeckscheiben aus Glas oder Plast und filternden Oberflächenbeschichtungen versehen.

Die aufgenommene Energie wird einem Arbeits- oder Transportmedium übertragen, von dem sie als Wärme zur Heizung oder Warmwasserbereitung direkt zum Verbraucher gelangt, oder aber über Turbinen und Generatoren weiter in Elektroenergie umgewandelt wird, was allerdings hohe Temperaturen erfordert. Optimale Bedingungen ergeben sich – wie bei allen solarenergetischen Systemen – bei senkrechtem Strahlungseinfall und dadurch höchster Leistungsdichte der Strahlung. Deshalb werden Kollektoren oft beweglich ausgeführt, so daß Neigungs- und Azimutwinkel dem momentanen Sonnenstand angepaßt und dem Lauf der Sonne nachgeführt werden können. Eine weitere Leistungssteigerung ermöglichen Konzentratoren in Form von Spiegeln und Linsen.

Je nach dem Temperaturniveau des Transportmediums unterscheidet man zwischen Niedertemperatur-(NT-) und Hochtemperatur-(HT-)Kollektoren. Die Temperaturgrenze liegt im allgemeinen bei 200 °C. Jedem Typ

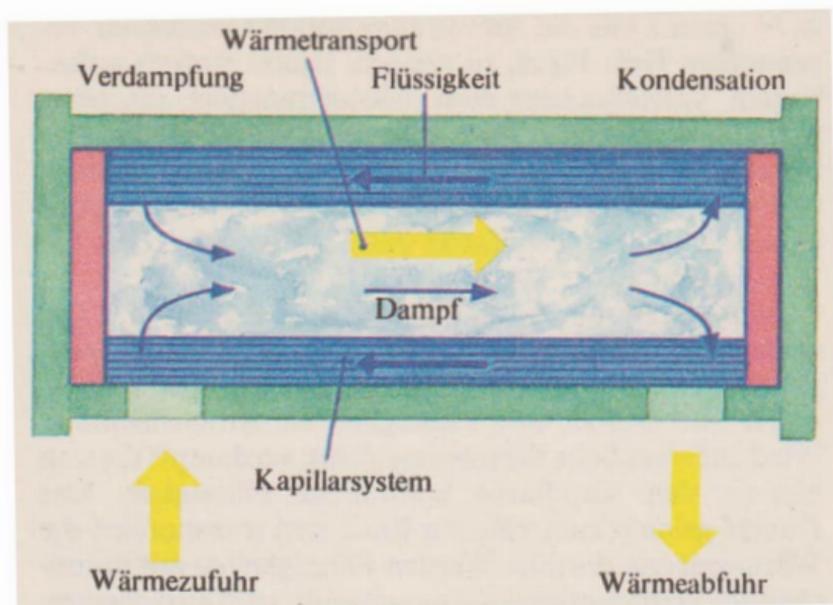


*Aufbau eines Sonnenkollektors*

kann man bestimmte bevorzugte Einsatzgebiete zuordnen. NT-Kollektorsysteme eignen sich besonders für häusliche Brauchwasser- und Heizungssysteme. Für die Erzeugung von Elektroenergie (oder z. B. auch Wasserstoff als Sekundärenergieträger) sind sie hingegen ungeeignet, da die Temperatur des Transportmediums für konventionelle Turbinenkreisprozesse zu kleine (und unwirtschaftliche) Wirkungsgrade ergibt. Hierfür sind nur HT-Kollektoren geeignet.

Von beiden gibt es zahlreiche Versionen und konstruktive Varianten. Sie alle zu erläutern würde den Rahmen sprengen. Wir wollen uns deshalb auf Grundprinzipien beschränken, so wie bei den folgenden Energiequellen auch.

NT-Kollektoren sind meist fenstergroße und durch die Abdeckplatten auch fensterähnlich aussehende Flächengebilde, deren Größe vom gewünschten Energieumsatz abhängt. Unter den Abdeckplatten befindet sich am Boden einer Wanne der Absorber, der in direktem Kontakt mit einem Rohrschlängensystem steht, durch das das Wärmemedium fließt. Hierfür kann Luft dienen, z. B. bei Warmluftheizungen. Meist wird jedoch Wasser verwen-



### Wärmerohr

det, gegebenenfalls mit Zusätzen. Auf letztere wird verzichtet, wenn das Wärmeleitmedium direkt, also ohne weiteres Wärmeübertragungssystem, als Gebrauchswasser dient. Das Ganze ist in isolierende und verlustmindernde Massen eingebettet. Der Wirkungsgrad solcher Standard-Flachkollektorsysteme liegt bei 40 bis 60%, wenn eine Abdeckplatte verwendet wird. Schon eine zweite erbringt spürbare Verbesserungen bis zu 80%, spezielle Kollektoren auch darüber. Hierbei wird z. B. mit besonderen infrarotreflektierenden Abdeckscheiben oder mit einer Vakuumisolierung zwischen den Scheiben gearbeitet, was natürlich höhere Kosten bedingt, so daß im jeweiligen Anwendungsfall immer das günstigste Verhältnis zwischen Technik und Kosten zu suchen ist. Die unter idealisierten Bedingungen theoretisch maximale Temperatur eines solchen Flächenabsorbers liegt wenig über 100 °C, unter realen Bedingungen des praktischen Betriebes ergeben sich aber maximal 60 bis 80 °C.

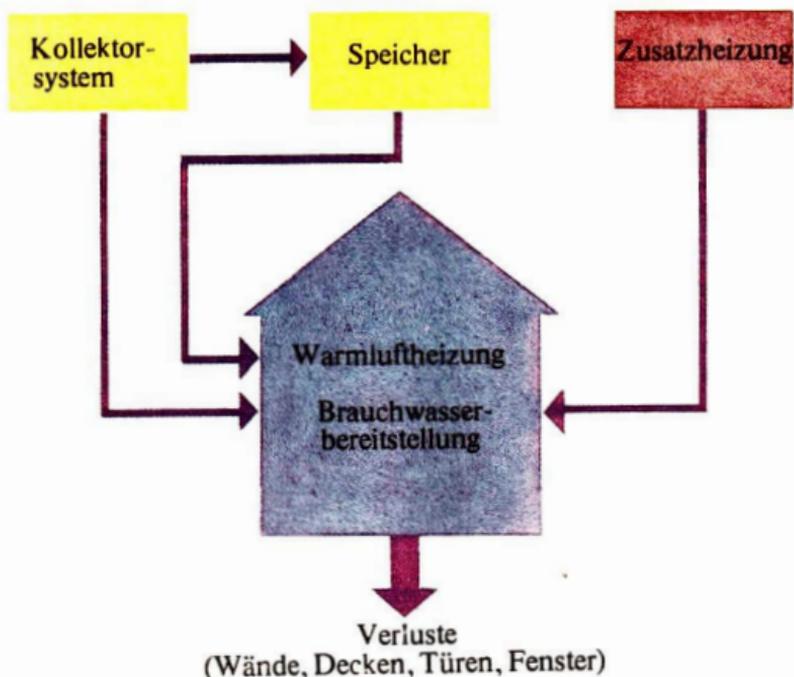
Außer diesen »Standardkollektoren« mögliche weitere Entwicklungen, die sich heute noch im Versuchsstadium befinden, deren massenhafter Einsatz aber zur Zeit meist an höheren Kosten scheitert, seien kurz angedeutet: Hier

ist in erster Linie die Anwendung von Wärmerohren, sogenannten Heat-Pipes, zu nennen, relativ einfach aufgebauten Vorrichtungen zum Wärmetransport, die ohne mechanisch bewegte Teile arbeiten und sich durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit und damit ein hohes Wärmetransportvermögen auszeichnen. Die Wärmeleitfähigkeit kann das Zehntausendfache des Kupfers erreichen, die Wärmestromdichte Werte bis zu  $15000 \text{ W/cm}^2$ .

Das Wärmerohr besteht aus einem thermisch abgeschlossenen Hohlkörper, meist in Rohrform, der im Inneren mit einem Kapillarsystem versehen ist. Er ist evakuiert und enthält eine Flüssigkeit als Arbeitsmedium. Wird auf einer Seite Wärme zugeführt, verdampft die sich hier in den Kapillaren befindliche Flüssigkeit. Der Dampf gelangt zum kälteren Ende und transportiert die Wärmeenergie dorthin. Werden Flüssigkeiten mit hinreichender Verdampfungswärme gewählt, wird eine entsprechend große Wärmemenge transportiert. Am kälteren Ende kondensiert der Dampf und setzt die vorher aufgenommene Energie wieder frei, so daß sie zur Nutzung abgeführt werden kann. Die Flüssigkeit selbst wird vom Kapillarsystem aufgenommen und gelangt durch dieses auf Grund der Kapillarkraft zur Verdampfungsstelle zurück. Der Kreislauf wird mit sehr hoher Geschwindigkeit durchlaufen, da das System immer wieder bestrebt ist, in den Gleichgewichtszustand zurückzukehren. Wärmerohre finden heute vielfältige Anwendung, von der Raumfahrt bis zur Lautsprecherbox. Mit solarthermischen Anlagen wird experimentiert. Dabei befindet sich ein Wärmerohr z. B. direkt im Brennpunkt eines einfachen Spiegels, wobei die Sonnenenergie direkt auf Wasserverdampfer übertragen wird.

Zu den perspektivisch möglichen Varianten von NT-Systemen sind ferner Röhrenabsorber zu rechnen sowie Systeme mit Vakuumverdampfung, bei denen ein Arbeitsmedium durch Sonneneinstrahlung im Vakuum verdampft wird. Über ihre Effektivität und Nutzbarkeit wird die noch zu leistende Forschungsarbeit zu entscheiden haben.

Wir deuteten schon an: Haupteinsatzgebiete der NT-Kollektoren sind örtliche Warmwasser- und Heizsysteme.

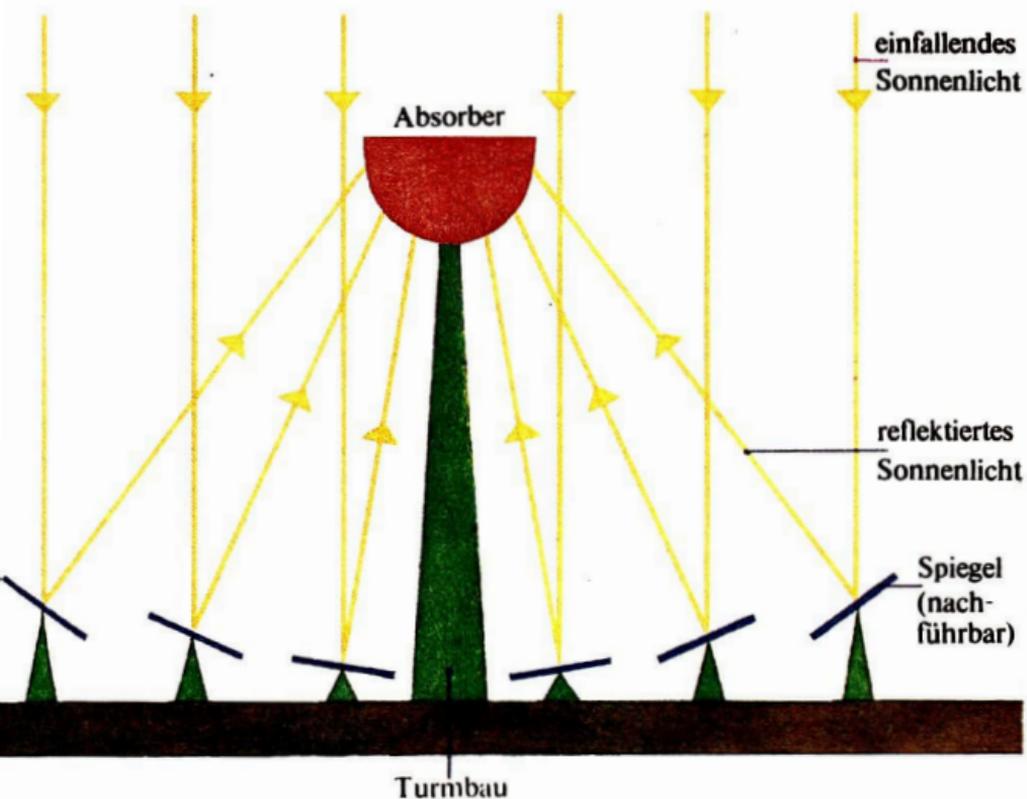


*Kombinierte Hausenergieversorgungsanlage mit solarthermischer Speisung*

Wegen der tages- und jahreszeitlichen Schwankungen sowie der meteorologischen Einflußfaktoren ist dabei eine hundertprozentige, durchgängige Versorgung nicht möglich. Günstige Einsatzbedingungen, auch in den geographischen Breiten Mitteleuropas, ergeben sich für »saisonbedingte« Nutzer, wie Sommerferienobjekte oder Bäder. So arbeitet z. B. in Freiburg/Unstrut eine Anlage, die das Wasser der öffentlichen Badeanstalt erwärmt, was unter anderem den Saisonbetrieb gegenüber anderen Freibädern verlängert.

Hausversorgungssysteme werden als Kombinationssysteme ausgelegt, d. h., sie arbeiten mit einem kleinen Wärmespeicher und einer Zusatzheizung.

Für die Elektroenergieerzeugung nach dem klassischen thermodynamischen Turbinenkreisprozeß werden HT-Kollektorsysteme in Form konzentrierender Kollektoren verwendet. Lichtkonzentratoren in Form von Spiegeln oder Linsen, wie wir sie von optischen Geräten her ken-



### *Solarturmanlage*

nen, konzentrieren das Sonnenlicht auf einen Verdampfer, wo das Arbeitsmedium verdampft wird. Nachteile solcher Systeme sind einmal der hohe Flächenbedarf der Kollektoren selbst, zum anderen die Ausnutzung nur der direkten Sonnenstrahlung. Sie können deshalb lediglich dort wirtschaftlich betrieben werden, wo jährlich ein hoher Anteil von Sonnenscheintagen mit möglichst direkter Strahlungsdichte vorhanden ist. Das ist in äquatorialen Gebieten der Fall, während ein Einsatz in den gemäßigten und nördlichen Gebieten nicht in Betracht kommt. Hier könnte ein perspektivischer Einsatz eventuell dann zur Diskussion stehen, wenn kostengünstige Energiespeicher verfügbar sind.

Zur Energiekonzentration eignen sich mehr oder weniger komplizierte Linsen- und Spiegelsysteme. Die mit ihnen erreichbare Leistungsdichte (und damit Tempera-

tur) hängt ab vom Konzentrationsfaktor, der sich aus dem Verhältnis der senkrecht zur einfallenden Strahlung projizierenden Spiegel- oder Linsenfläche zur bestrahlten Absorberfläche ergibt. Die einfachste Form sind eindimensionale Konzentratoren in Form zylinderförmiger, sphärischer oder parabolischer, wannenförmiger Spiegel. Sie sind einfach herzustellen und ergeben bei nicht zu hohen Genauigkeitsforderungen und geringen Kosten schon Temperaturen von einigen hundert Grad, wie sie zum Betrieb kleiner leistungsfähiger Dampfturbinenanlagen mit hohem thermodynamischem Wirkungsgrad ausreichen. Je nach Ausführungsform sind damit Konzentrationsfaktoren in der Größenordnung von  $10^1$  bis  $10^2$  erreichbar. Um höhere Temperaturen von einigen tausend Grad – der theoretische Grenzwert ist die Strahlungstemperatur der Sonne von rund 5700 K – zu erreichen, sind zweidimensionale Konzentratoren erforderlich, exakte rotationssymmetrische sphärische oder parabolische Spiegel, die Konzentrationsfaktoren in der Größenordnung von  $10^2$  bis  $10^4$  ergeben. Für eine Temperatur von 4000 K z. B., wie sie mit sehr guten Spiegeln schon erreicht wurde, muß ein Parabolspiegel einen Konzentrationsfaktor von rund  $13 \cdot 10^3$  aufweisen.

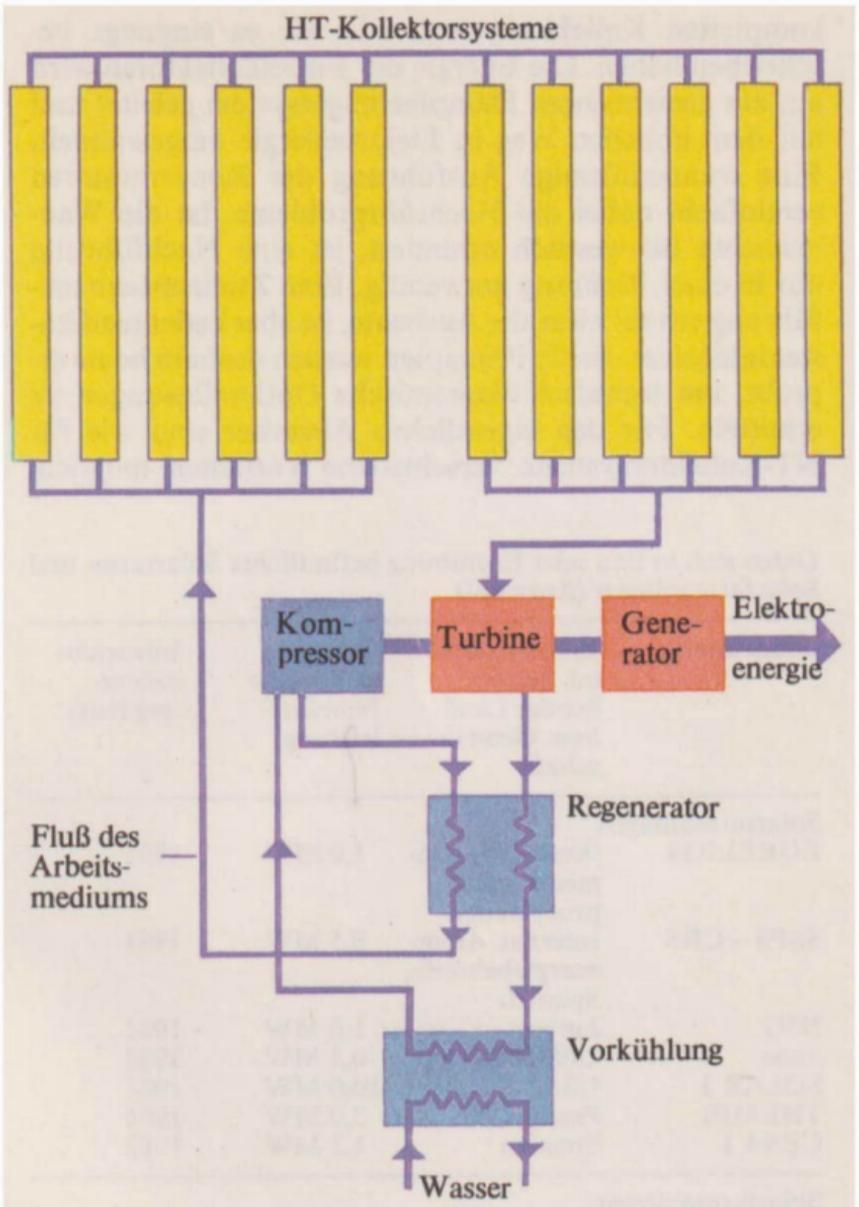
Für die praktische Ausführung von HT-Kollektoranlagen sind zwei Grundvarianten am aussichtsreichsten:

- »Solar-Tower-Anlagen«, einfach oft auch Solentürme genannt, die das Sonnenlicht auf einen an der Spitze eines Turmes angebrachten Absorber konzentrieren,
- »Solarfarmen«, die mit Hilfe von Spiegeln oder Linsen das Licht auf einen in deren Brennpunkt oder Brennnlinie liegenden Absorber konzentrieren.

Beide werden kommerziell noch nicht genutzt. Errichtete oder in Bau befindliche Anlagen dienen vor allem dem Sammeln von Erfahrungen. Nach bisherigen Erkenntnissen sind Solarfarmen vor allem für Leistungen bis zu etwa 50 MW (elektrisch) wirtschaftlich, Solartürme für Werte darüber. Die Gesamtwirkungsgrade liegen bei Solarfarmen zwischen 12 bis 15 %, bei Türmen um etwa 20 %.

Da die Herstellung von Parabolspiegeln der für HT-Systeme erforderlichen Dimensionen zu teuer und zu aufwendig wäre, geht man in der Praxis einen anderen, vom Prinzip her der Radioastronomie entlehnten Weg. Es werden einzelne Planspiegel verwendet, die konzentrisch so angeordnet sind, daß sie als Segmente eines riesigen Hohlspiegels von einigen Kilometern Durchmesser zu dem zentralen Absorberturm wirken. Die Spiegel sind zweiachsig gelagert und müssen mit höchster Präzision zentriert werden, was computergesteuert erfolgt. Computerberechnungen haben ergeben, daß die Flächenbedeckung um den Turm dabei nicht gleichmäßig erfolgen muß. Nahe dem Turm muß sie etwa 40 % betragen, an der Peripherie sind 10 % ausreichend. Die Montage der Spiegel muß so erfolgen, daß sie sich nicht gegenseitig beschatten. Eine Anlage für 100 MW elektrischer Leistung erfordert etwa 20 000 Spiegel von je 40 m<sup>2</sup> Fläche. Der Gesamtflächenbedarf liegt bei 3 bis 5 km<sup>2</sup>. Die Turmhöhe muß 230 bis 300 m betragen, sein Fundamentgrundriß 300 bis 350 m Seitenlänge aufweisen. Auch bei starker Windbelastung dürfen die Auslenkungen 30 cm nicht überschreiten. An der Turmspitze befinden sich als Absorber etwa 25 m lange Edelstahlrohre, durch die das Arbeitsmedium fließt. Die Zahlen verdeutlichen Aufwand und Kosten.

Bisherige Anlagen haben deshalb bescheidenere Dimensionen. Die UdSSR errichtet z. B. auf der Krim eine 5 000-kW-Versuchsanlage, die mit 1 600 Spiegeln arbeitet. Eine französische Versuchsanlage, THEMIS, arbeitet mit 500 Spiegeln von 25 000 m<sup>2</sup> Gesamtfläche und 120 m Turmhöhe. In vielen Ländern arbeiten ähnliche Versuchsanlagen oder befinden sich in Bau und Vorbereitung. Interessant sind die Einsatzmöglichkeiten in tropischen Entwicklungsländern für die dezentrale Versorgung kleiner Siedlungen und Wirtschaftseinrichtungen. So betreibt – um ein Beispiel zu nennen – Mali in Diré, 200 km südlich von Tombouctou, ein 80-kW-Kraftwerk, das Wasser aus dem Niger zur Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen pumpt, für etwa 10 000 Menschen Trinkwasser liefert, ein Kühlhaus betreibt und einen Landwirtschaftsbetrieb mit Strom versorgt. Anla-



*Solarfarm*

gen dieser Art und Einsatzbereiche dürften heute und in absehbarer Zeit die ökonomisch überhaupt vorteilhaftesten sein.

Solarfarmen bestehen aus vielen separat arbeitenden Einzelkollektoren. Jeder von ihnen besteht aus einem

kompletten Kollektorsystem, wie wir es eingangs beschrieben haben. Die Energie der Einzelkollektoren wird auf ein gemeinsames Dampferzeugersystem geleitet und auf dem üblichen Weg in Elektroenergie umgewandelt. Eine wannenförmige Ausführung der Konzentratoren vereinfacht dabei die Nachführprobleme. Ist die Wannenachse ost-westlich orientiert, ist eine Nachführung nur in einer Richtung notwendig. Eine Zweiachsennachführung erhöht zwar die Ausbeute, ist aber bedeutend kostenintensiver. Beide Prinzipien werden deshalb heute erprobt, um technisch-ökonomische Optimallösungen zu ermitteln. Für den eigentlichen Absorber sind wie für NT-Kollektorsysteme verschiedene Varianten möglich.

Daten sich in Bau oder Erprobung befindlicher Solarturm- und Solarfarmanlagen (Auswahl)

Bezeichnung	Errichtendes od. betreibendes Land bzw. Gemeinschaft	Geplante elektrische Nominalleistung	Inbetriebnahme (geplant)
<b>Solarturmanlagen</b>			
EURELIOS	Westeurop. Gemeinschaftsproj., Italien	1,0 MW	1981
SSPS – CRS	Internat. Atomenergiebehörde, Spanien	0,5 MW	1981
NIO	Japan	1,0 MW	1981
ohne	UdSSR (Krim)	0,5 MW	1982
SOLAR 1	USA	10,0 MW	1981
THEMIS	Frankreich	2,0 MW	1981
CESA 1	Spanien	1,2 MW	1982
<b>Solarfarmanlagen</b>			
COOLIDGE	USA	150 kW	1979
GETAFA	BRD/Spanien	50 kW	1980
NIO	Japan	1000 kW	1981
KUWEIT	Kuweit (BRD)	100 kW	1981
SSPS – DCS	Internat. Atomenergiebehörde	500 kW	1981
KORSIKA	Frankreich	100 kW	1982
SONNTLAN	BRD/Mexiko	100 kW	1982
STEP 70	Australien	70 kW	1981

Moderne Hochleistungsabsorber haben zwei ineinandergeschobene Glasröhren, deren Zwischenraum evakuiert ist. Durch die innere Röhre fließt das Arbeitsmedium. Der Reflektor konzentriert deshalb das Sonnenlicht auf sie. Spezielle Metallsegmente an der Innenseite dieses Rohres fördern die rasche und gute Wärmeübertragung auf das Arbeitsmedium.

Wie Solartürme befinden sich auch Sonnenfarmen im Stadium der Projektierung, Testung und Erprobung.

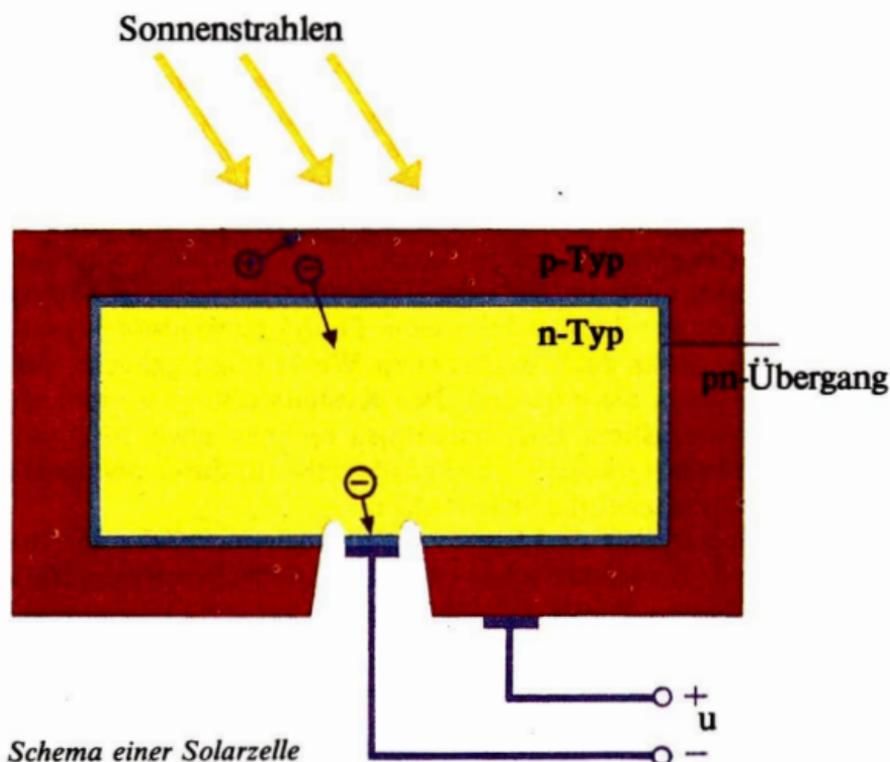
## Strom direkt aus Sonnenlicht

Die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie ist mit Solarzellen möglich. Großtechnisch wird hiervon bisher allerdings nur in der Raumfahrt Gebrauch gemacht. Die terrestrische Nutzung ist weniger eine technische als vielmehr eine wirtschaftliche Frage.

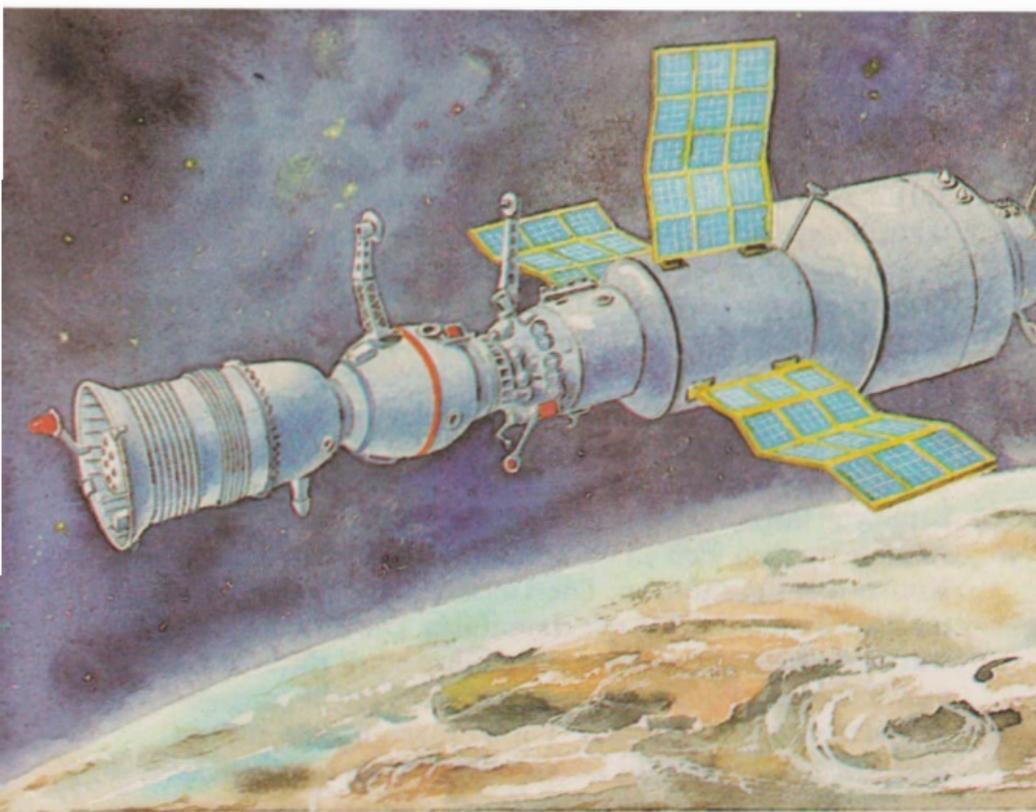
Solarzellen sind relativ unkomplizierte Bauelemente. Sie weisen eine Reihe hervorragender Eigenschaften auf: lange Lebensdauer, außer Reinigung keine Wartung, keine beweglichen Teile, keine Umweltverschmutzung. Selbst bei weltweitem Einsatz großflächiger Anlagen sind keine klimatischen Auswirkungen zu erwarten. Die Zellen sind heute weitgehend technisch ausgereift, jedoch ist ihr Preis noch zu hoch für eine breite Anwendung. Je niedriger er gehalten werden kann, um so greifbarer wird der Einsatz auch auf der Erde. Deshalb wird weltweit besonders an der Entwicklung neuer Fertigungsmethoden gearbeitet, aber auch nach neuen Werkstoffen gesucht, die allerdings die erforderlichen Kostensenkungen nicht allein verheißen. Einschätzungen rechnen etwa 1990 mit Herstellungskosten, die die Solarzelle für die Großenergie-technik diskutabel machen würden.

Solarzellen sind Sperrschichtfotoelemente, die den inneren lichtelektrischen Effekt (Sperrschichtfotoeffekt) ausnutzen. Dieser tritt sowohl in Gasen und Flüssigkeiten als auch in Festkörpern auf, erreicht aber nur bei letzteren für praktische Anwendungen hinreichende Wirkungsgrade. In den Solarzellen auf Halbleiterbasis lösen die Lichtquanten der Sonnenstrahlung positive und negative

Ladungsträger aus, wenn ihre Energie einen vom Material abhängigen Mindestwert überschreitet. Um zu verhindern, daß sich die so entstandenen Ladungsträger wieder vereinen, muß in der Zelle eine Potentialdifferenz zwischen zwei Schichten vorhanden sein. Diese kann durch eine Sperr- oder Berührungsschicht zwischen einem Halbleiter und einem Metall oder zwei Halbleitern unterschiedlicher Leitfähigkeit erzeugt werden, z. B. zwischen einem positiv-leitenden (Löcher-, Defektelektronen- oder p-Leitung) und einem negativ-leitenden (Elektronen- oder n-Leitung) Halbleiter. Wird dabei ein Halbleiter mit unterschiedlich dotierten Bereichen benutzt, wie bei monokristallinen Zellen, spricht man von Homojunctionszellen. Verwendet man zwei unterschiedliche Materialien wie bei polykristallinen Kadmiumsulfid-Kupfersulfid-Zellen, liegen Heterojunctionszellen vor. Praktische Bedeutung haben bisher nahezu ausnahmslos Silizium-Solarzellen erlangt, die auch für die nächste Zeit »Standard-



Schema einer Solarzelle



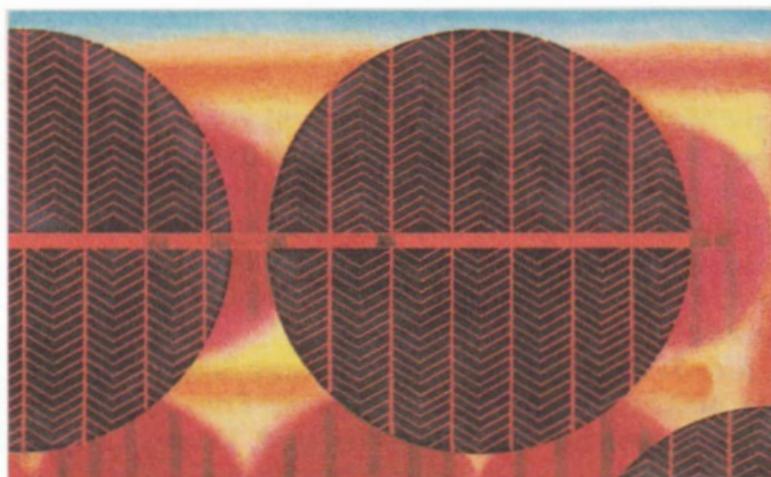
*Die Mehrzahl der bisher gestarteten künstlichen Raumflugkörper bezog und bezieht ihre Bordenergie durch Solarzellen wie hier die sowjetische Raumstation Saljut 6 im Verbund mit einem Sojus-Raumschiff.*

typ« bleiben werden. Dabei ist die Si-Zelle nicht unbedingt die Optimallösung, denn es gibt Halbleiter mit höheren Wirkungsgraden. Die Si-Halbleitertechnologie aber hat heute einen hohen Stand erreicht; Silizium ist der absolut wichtigste Grundstoff der gesamten Halbleiter- und Mikroelektronik und erfährt damit eine sehr breite Anwendung.

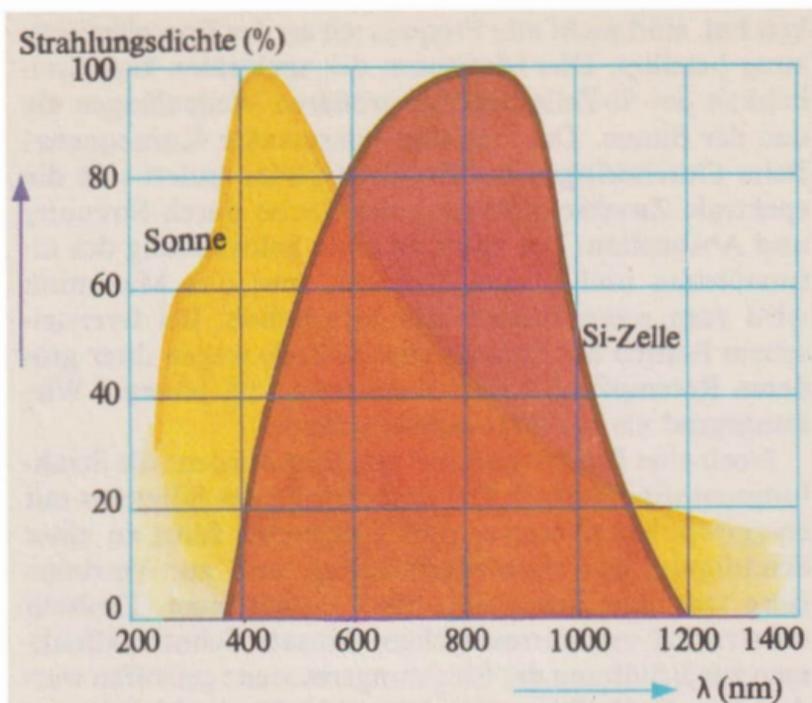
Eine Si-Zelle besteht aus einer dünnen Scheibe hochreinen, einkristallinen Siliziums, dem zur Erzeugung der p-Leitung zunächst Bor zugegeben wird. Diesen Vorgang bezeichnet man als Dotierung. Anschließend wird die n-Leitungszone erzeugt, indem man Phosphor in die

Scheibe diffundieren läßt. Zwischen beiden bildet sich die Sperrschicht aus. Da in ihr die unmittelbaren physikalischen Prozesse der Energiewandlung ablaufen, wird die n-Schicht anschließend weitgehend wieder abgeätzt, so daß die Sperrschicht direkt unter der Oberfläche (0,5 bis 1,0  $\mu\text{m}$  tief) liegt. Zum Abschluß werden metallische Kontakte aufgedampft sowie eine Antireflexschicht aufgebracht. Erwähnt sei, daß außer einer solchen np-Zelle natürlich auch pn-Zellen möglich sind, d. h. Zellen mit rückwärtiger n-Schicht. Sie haben gewisse Vorteile für Solarzellengeneratoren größerer Leistung. An diesem Prinzip der Si-Zelle hat sich seit ihren ersten Weltraumeinsätzen im Jahre 1958 ebensowenig geändert wie am Wirkungsgrad. Auch äußerlich unterscheiden sich heutige Zellen kaum von ihren Vorgängern. Die wesentlichsten Veränderungen ergaben sich in den Schutzbeschichtungen und Kontaktkonfigurationen. Die Ursache ist einfacher Natur: ihre Anwendung in der Raumfahrt. Die Entwicklung wurde deshalb vorwiegend durch ihre stark differenten und extremen Forderungen bestimmt. Erst in jüngster Zeit stehen mehr und mehr Forderungen nach terrestrischen Anwendungen zur Diskussion, was schon zu einfacheren und kostengünstigeren Zellen geführt hat.

Wir können hier aus Platzgründen nicht die gesamte Physik der Solarzelle abhandeln, so interessant sie auch



*Silizium-Solarzellen*



*Spektrale Energieverteilung der Sonne*

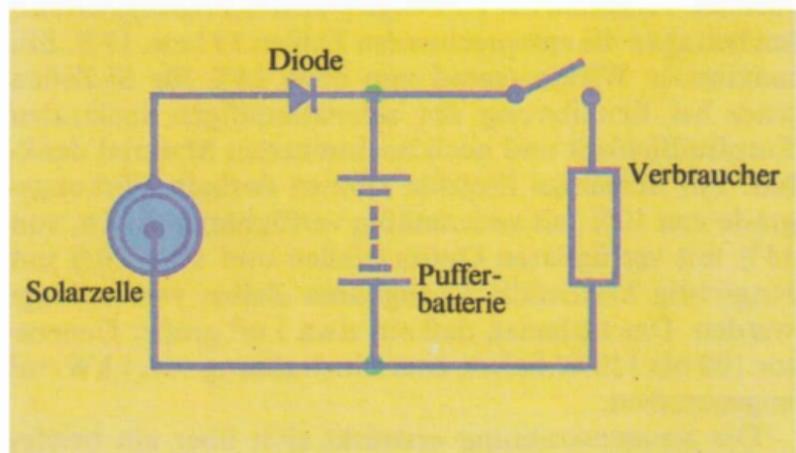
ist. Lediglich noch einige Bemerkungen zu für die Energietechnik wichtigen Eigenschaften: Für Halbleiter-Solarzellen gibt es einen quantenphysikalisch begründeten maximalen theoretischen Wirkungsgrad, der bei 24 %, bei nicht-idealem Verhalten bei 17 % liegt. Für serienmäßige Si-Zellen betragen die entsprechenden Zahlen 19 bzw. 17 %. Ein maximaler Wirkungsgrad von etwa 24 % für Si-Zellen wäre bei Erweiterung der schmalbandigen spektralen Empfindlichkeit und noch hochreinerem Material denkbar. Für derzeitige Projekte können deshalb Wirkungsgrade von 10 % mit serienmäßig verfügbaren Zellen, von 13 % mit verfügbaren Optimalzellen und etwa 20 % mit langfristig bestenfalls verfügbaren Zellen veranschlagt werden. Das bedeutet, daß ein etwa 1 m<sup>2</sup> großer Generator 100 bis 130 W liefert, eine Einstrahlung von 1 kW/m<sup>2</sup> angenommen.

Die Sonnenstrahlung erstreckt sich über ein breites Spektralband mit unterschiedlichen Energieanteilen. Da auch eine Si-Zelle eine bestimmte spektrale Empfindlich-

keit hat, sind nicht alle Frequenzen an der Energieumsetzung beteiligt. Das Maximum der spektralen Empfindlichkeit der Si-Zelle liegt bei größeren Wellenlängen als das der Sonne. Das hat eine interessante Konsequenz: Beim Durchdringen der Erdatmosphäre ändert sich die spektrale Zusammensetzung der Sonne durch Streuung und Absorption. Das führt zu einer Schwächung des ultravioletten und blauen Bereichs, und das Maximum wird zum roten Bereich hin verschoben. Bei terrestrischem Betrieb hat deshalb eine Si-Zelle wegen ihrer größeren Rotempfindlichkeit einen etwa 15 % höheren Wirkungsgrad als bei extraterrestrischem.

Noch eine Eigenschaft soll erwähnt werden: die Strahlungsempfindlichkeit. Die Bestrahlung des Siliziums mit energiereichen Protonen und Elektronen führt zu einer Schädigung des Halbleitermaterials und zur Verringerung von Energieausbeute und Lebensdauer. Deshalb müssen bei extraterrestrischem Einsatz Schutzmaßnahmen zur Erhöhung der Strahlungsresistenz getroffen werden, wie das Aufbringen schützender Deckschichten aus Glas, Quarzglas, integralen Quarz- und Glasschichten oder Teflon. Auch spezielle Dotierungen, z. B. mit Lithium, werden vorgenommen. Terrestrische Anwendungen erfordern diesen Schutz nicht.

Si-Solarzellen werden heute in runder und rechteckiger



*Schaltprinzip einer Solarbatterie*

Form ausgeführt. Die Flächengrößen liegen zwischen 2 und 35 cm<sup>2</sup>, die Dicke beträgt 0,05 bis 0,5 mm. Die üblichste Größe liegt bei 4 cm<sup>2</sup>. Eine solche Zelle gibt je nach Ausführung 55 bis 95 mW ab. Um größere Leistungen zu erreichen, werden viele Zellen zu sogenannten Panels zusammengeschaltet, die eine gemeinsame Grundlage und Schutzschicht haben. Zum Ausgleich von Schwankungen im Energieangebot sind Energiespeicher zur Pufferung erforderlich. Für Raumfahrtanwendungen kommen hier konventionelle Akkumulatoren zum Einsatz. Das Zusammenschalten erfolgt über Dioden, um Entladungen und Kurzschlüsse zu vermeiden. Da es sich hier ebenfalls um Halbleiterbauelemente handelt, können sie mit der Zelle direkt integriert und in einem Herstellungsprozeß hergestellt werden. Eine solche Anordnung nennt man dann Solarbatterie.

Im Bemühen um geringere Kosten und höhere Wirkungsgrade sind zahlreiche Lösungsvorschläge entstanden, die an der Priorität der Si-Zelle nichts geändert haben. Ihre wichtigste Verbesserungsrichtung ist die Erhöhung der Perfektion und Reinheit des Basismaterials. Eine zweite Entwicklungsrichtung ist die Suche nach besseren Materialien. Hier ist vor allem Galliumarsenid zu erwähnen, das höhere Wirkungsgrade erlaubt. Im Labor wurden bisher 19 % erreicht. Allerdings sind solche Zellen zehnmal teurer als Si-Zellen. Ihr Einsatz beschränkt sich deshalb auf solche Fälle, bei denen ihre höhere Temperaturreisistenz zur Geltung kommt, z. B. bei Raummissionen in Sonnennähe oder terrestrischen Anwendungen, bei denen Solarzellen im konzentrierten Sonnenlicht arbeiten.

Große Hoffnungen werden an Zellen aus Kadmiumsulfid und Kadmiumtellurid geknüpft, vor allem für terrestrische Anwendungen. Diese Zellen können großflächig, polykristallin ausgeführt und um den hundertsten bis tausendsten Teil billiger hergestellt werden; erreichte Wirkungsgrade liegen bei 8 %. Noch nicht beherrscht werden ihre Empfindlichkeit gegen Feuchtigkeit und die allmähliche Degradation bei Sonnenlichteinfall.

Eine dritte Entwicklungsrichtung ist die Anwendung spezieller konstruktiver Lösungen. So wurde z. B. vorgeschlagen, das Sonnenspektrum durch Kombination un-

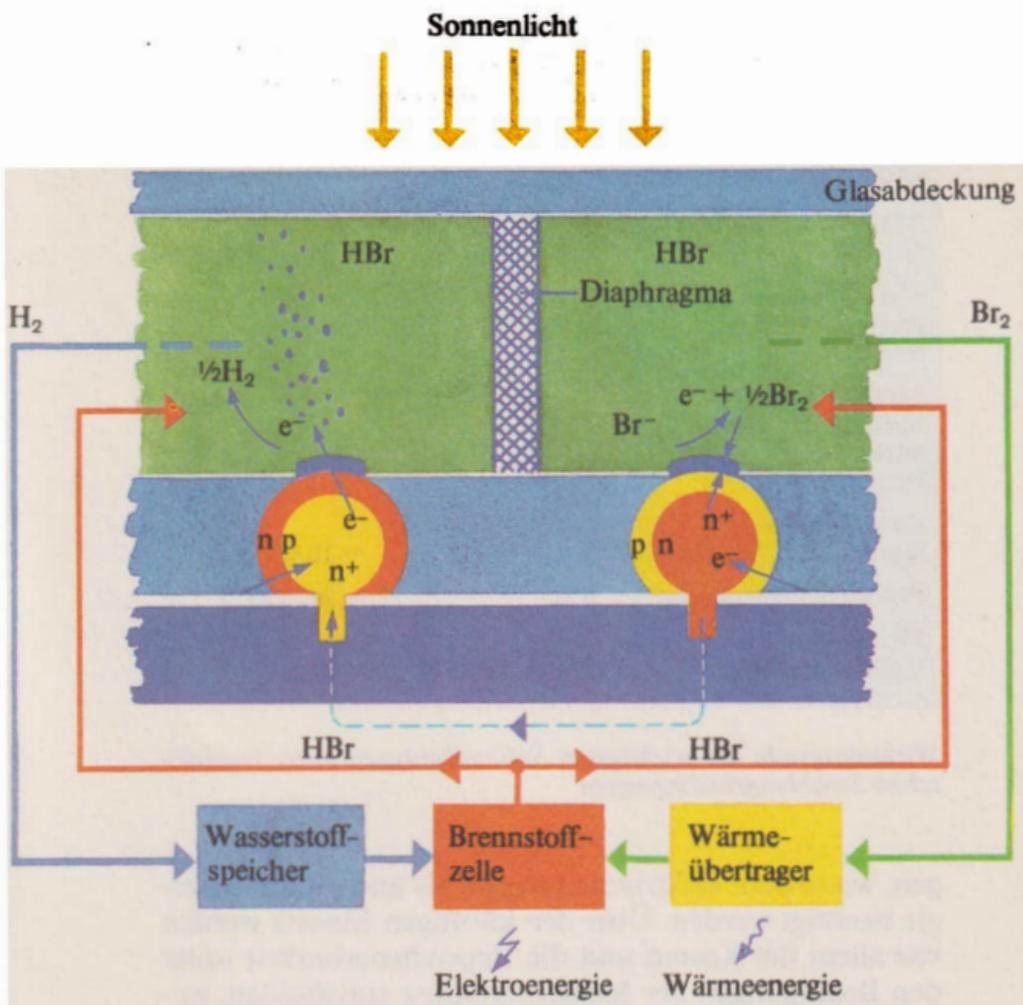
terschiedlicher Halbleiter in einer Solarzelle besser auszunutzen. Die Halbleiter werden so angeordnet, daß das Sonnenlicht durch einen dichroitischen Spiegel durch differenzierte spektrale Durchlässigkeit und Reflexion so aufgeteilt wird, daß jeder Halbleiter den seiner spektralen Empfindlichkeitskurve entsprechenden Strahlungsauschnitt erhält. Auch Schichtstrukturen wurden erprobt, bei denen jede Schicht einen bestimmten, für sie optimalen Strahlungsanteil ausnutzt, andere Anteile an darunterliegende Zellen hindurchläßt. Diese Entwicklungen sind im Laborstadium stehengeblieben, da Aufwand und Nutzen noch in keinem akzeptablen Verhältnis stehen.

Das gilt auch für sogenannte Hochleistungszellen mit Konzentratoren, bei denen durch optische Linsensysteme vor den Zellen eine Konzentration des Sonnenlichts vorgenommen wird. Nimmt man Galliumarsenid-Zellen mit 20 % Wirkungsgrad – sie sind wegen ihrer höheren Temperaturverträglichkeit notwendig –, kann der Flächenbedarf für gleiche Leistung gegenüber Si-Zellen auf ein Tausendstel reduziert werden, d. h., eine Zelle von 8,5 mm Durchmesser kann bis zu 10 W liefern!

Als interessanter Entwicklungsvorschlag soll schließlich die elektrolytische Solarzelle genannt werden, die eine direkte Integration einer Solarzellenanlage mit einem elektrochemischen Speichersystem darstellt. Ihr Prinzip: Der durch Sonnenzellen erzeugte Strom erzeugt auf elektrolytischem Weg sekundäre Energieträger, die gespeichert werden können und auf elektrochemischem Weg wieder Elektroenergie erzeugen.

Als Wandler dienen Silizium-Solarzellen, die jedoch nicht als Scheiben, sondern als kleine Kugeln ausgebildet sind. Jede besitzt an der Oberfläche eine pn- oder np-Sperrschicht und eine Metallelektrode. Die Kugeln befinden sich eingebettet in einer Glasmatrix, wobei die Innenschichten durch eine Metallplatte elektrisch verbunden sind. Über den Kugeln befindet sich wiederum eine Glasplatte. Der Zwischenraum ist mit Bromwasserstoffsäure ausgefüllt.

Bei Lichteinfall laden sich die Metallelektroden je nach Kugeltyp positiv oder negativ auf. Der entstehende Stromfluß zersetzt die Säure elektrolytisch in Brom und



*Elektrolytische Solarzelle.  $\text{n}^+$  = Defektelektron,  $\text{e}$  = Elektron*

Wasserstoff, die abgepumpt und gespeichert werden. Bei Zuführung zu einer Brennstoffzelle vereinigen sie sich unter Energieabgabe wieder zu Bromwasserstoff und schließen damit den Kreislauf. Das System kann gleichzeitig noch zur Warmegewinnung dienen, da sich die Flüssigkeit durch Sonneneinstrahlung erwärmt, so daß man das Brom durch einen Wärmeübertrager führen kann, wo es seine Wärme an Wasser abgibt. Vom Prinzip her ist damit eine solche elektrolytische Solarzelle ein nahezu idealer Sonnenenergiekonverter, vor allem für Hausenergieanla-

Zelltyp	Erreichter Wirkungsgrad		Theoretischer Wirkungsgrad
	Labor	Fertigung	
Normale monokristalline Si-Zelle	17,5 %	13,5 %	
Monokristalline Hochleistungs-Si-Zelle	19 %	16 %	~ 24 ... 25 %
Monokristalline, nichtreflektierende Si-Zelle	20 %		
Monokristalline Si-Billigzelle für terrestrische Breitenanwendung		11 %	
Polykristalline Kadmiumsulfidzelle	8 %	7,2 %	~ 18 %
Polykristalline Si-Zelle	6 %		~ 24 ... 25 %
Monokristalline Galliumarsenidzelle	19 %	15,5 %	~ 23 %

*Wirkungsgrade der wichtigsten Solarzellentypen unter terrestrischen Strahlungsbedingungen*

gen, wo sowohl elektrische Energie als auch Wärmeenergie benötigt werden. Über den künftigen Einsatz werden vor allem die Kosten und die Reproduzierbarkeit unter den Bedingungen der Massenfertigung entscheiden, wobei außer den Solarzellen vor allem die erforderliche Brennstoffzelle und der Wasserstoffspeicher mit ausschlaggebend sein werden.

Wir wollen es bei den genannten Beispielen belassen, da Lösungen dieser Art in absehbarer Zeit keine praktische Bedeutung erlangen werden. In der Abbildung sind die für absehbare Zeiträume verfügbaren und ökonomisch akzeptablen Zelltypen mit ihren erreichten Wirkungsgraden und nach Expertenschätzungen möglichen Entwicklungen zusammengestellt (nach Matthöfer). Sie widerspiegelt das Leistungsniveau, das Einschätzungen und Projekten für künftige Solarzellenkraftwerke zugrunde zu legen ist.

## Solarzellenplantagen in der Wüste?

Kommerziell genutzt werden Solarzellen bisher in größerem Umfang nur in der Raumfahrt. Mehr als 95 % aller gestarteten Raumflugkörper waren bisher mit ihnen ausgerüstet. Irdische Anwendungen sind aus den bereits genannten Gründen auf Einzelfälle beschränkt.

Die Anforderungen bei Raumfahrtanwendungen unterscheiden sich zum Teil grundlegend von denen bei terrestrischen Einsätzen. Sie leiten sich aus der Missionsaufgabe ab und können sehr differenziert sein, sowohl für die Zellen als auch für ihre Anordnung. Für geringe Leistungen erfolgt eine Montage direkt auf der starren Satellitenoberfläche. Der Gesamtwirkungsgrad solcher Generatoren ist mit etwa 2 % sehr niedrig, da immer nur ein Teil der Zellen bestrahlt wird und der Lichteinfall wegen der meist gekrümmten Satellitenoberfläche schräg erfolgt. Die Zellen selbst sind oft Einzelanfertigungen, dem jeweiligen Flugkörper angepaßt. Höhere Leistungen werden mit Auslegern am Satelliten erreicht, wobei der Start in zusammengefaltetem Zustand und das Ausspannen erst in der Umlaufbahn erfolgen. Solche Ausleger können nach der Sonne orientiert werden, was eine optimalere Leistungsabgabe erlaubt. Für mittlere Leistungen genügen starre und starr am Satelliten montierte Strukturen, die alle Spin- und Drehbewegungen mit vollführen. Deshalb müssen beide Seiten der Ausleger mit Solarzellen belegt werden, weshalb auch hier der Flächenwirkungsgrad mit etwa 2 % relativ niedrig ist. 6 bis 9 % ergeben einseitig mit Zellen belegte Flächen, die dann ständig zur Sonne ausgerichtet sein müssen. Sie kommen als starre Gebilde bis zu etwa 1 kW zur Anwendung. Bei höheren Leistungen sind flexible Solarzellengeneratoren allen anderen Strukturen überlegen. Sie werden zusammengefaltet oder -gerollt gestartet und im Orbit entrollt oder entfaltet, wobei Entrollstrukturen günstiger sind. Solche Generatoren bestehen aus dünnen Kunststofffolien mit Glasfaserverstärkung, auf die die Zellen aufgeklebt und alle elektrischen Verbindungen aufgedruckt sind. Beim Zusammenrollen werden dünne Schaumstofffolien zur Verringerung der Bruchgefahr mit eingerollt. Die Leistungsabgabe

kann dem Bedarf durch teilweises Entrollen angepaßt werden.

Der erste Solargenerator dieser Art wurde 1975 beim kanadischen Nachrichtensatelliten CTS (Hermes) eingesetzt. Er lieferte anfangs 1 kW bei 10,5 m<sup>2</sup> Fläche, 25,3 kg Masse und 0,21 m<sup>3</sup> Startvolumen.

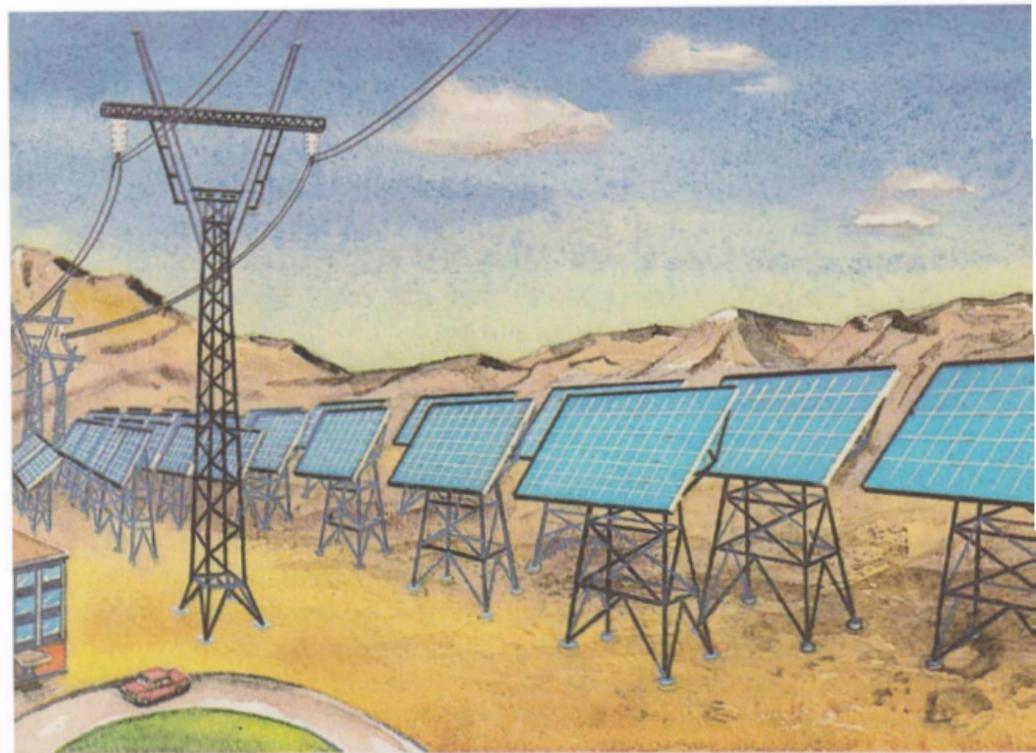
Die größten Solargeneratoren für etwa 25 kW Primärleistung kamen bisher bei Raumstationen zum Einsatz. Dieser Leistungsbereich ist heute für die Raumfahrt praktisch beherrschbar, Anlagen für 100 kW werden entwickelt und sind bald verfügbar. Wir haben über diesen Anwendungsfall etwas ausführlicher berichtet, weil er auch für terrestrische Energieprobleme von Interesse sein kann – doch darüber im nächsten Kapitel.

Wie sieht es heute und morgen mit irdischen Anwendungen aus? Als Folge der hohen Kosten, bedingt vor allem durch die Herstellungskosten, ist derzeit ein wirtschaftlich nutzbares Potential für die fotoelektrische Umwandlung der solaren Strahlungsenergie nur in geringem Umfang vorhanden. Bei noch erheblichen Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen ist eine ökonomische Wettbewerbsfähigkeit terrestrischer Großanlagen auch nicht vor dem Jahre 2000 zu erwarten. Für die örtliche und zeitliche Verfügbarkeit der Energiequelle Sonne und der hieraus abzuleitenden Nutzungseinschränkungen gelten die gleichen Aspekte wie für solarthermische Systeme.

Es gibt aus diesen Gründen ebenso optimistische wie skeptische Stimmen zur künftigen Realisierbarkeit und Rolle von Sonnengroßkraftwerken im Megawattbereich. Eine kontinuierliche Leistungsabgabe erfordert heute noch nicht vorhandene und kostspielige Energiespeicher, so daß die Zukunft solarelektrischer Kraftwerke auch von der Entwicklung ökonomischer Speicher- und Transportsysteme mit bestimmt wird.

Großanlagen erfordern riesige Flächen. Um z. B. das Energieäquivalent von 15 Mrd. t Erdöl aufzubringen, benötigt man eine Solarzellenfläche von 2 Mio km<sup>2</sup>. Die Errichtung ist praktisch nur in tropischen Wüstenregionen möglich. Solche Riesenarrays<sup>1</sup> sind weitgehend wartungs-

<sup>1</sup> array; engl. Ansammlung



*So könnte es aussehen, das Sonnenzellen-Großkraftwerk der Zukunft.*

frei. Mögliche Hageleinwirkungen erfordern Schutzglasschichten; Regen bringt praktisch keine Beeinträchtigung, Staubschichten müssen durch Wässerung entfernt werden. Über das Projekt- und Studienstadium sind solche Anlagen bisher nicht hinausgekommen.

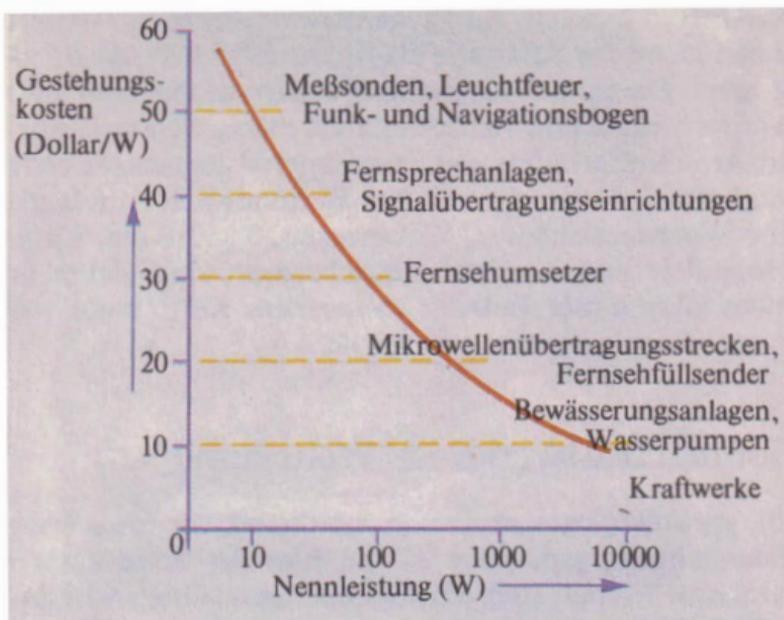
Vielen Vorschlägen kann aus heutiger Sicht ein gewisser utopischer Beigeschmack nicht ganz abgesprochen werden. So wurde in einem der jüngsten Projekte die Errichtung von zehn ausgedehnten »Solarzellenplantagen« in tropischen und subtropischen Gebieten vorgeschlagen. Die Gesamtfläche betrage 2 Mio km<sup>2</sup>, was etwa der Fläche Saudi-Arabiens entspräche.

Die Elektroenergie soll dazu benutzt werden, auf elektrolytischem Weg aus Meerwasser Wasserstoff zu erzeugen, der ähnlich dem Erdgas mit Tankschiffen oder Pipelines zu den Verbraucherländern transportiert und hier

weiter energetisch genutzt werden könnte. Die Wasserstoffherzeugung auf diesem Weg soll nicht teurer sein als die durch Kernenergie. Hierauf wie auf die künftige Rolle des Wasserstoffs als Energieträger überhaupt kommen wir später noch zurück. Weltweit – so wird eingeschätzt – stände eine Gesamtfläche von etwa 500 Mio km<sup>2</sup> zur Verfügung, die maximal mit Solarzellen belegt werden könnte, davon mehr als die Hälfte auf den Weltmeeren. Die künftige Forschung wird über die reale Nutzung allerdings erst zu entscheiden haben.

Anders liegen die Dinge bei terrestrischen Anlagen für kleine und mittlere Leistungen. Hier eröffnet sich für Beträge bis zu einigen kW ein breites Anwendungsfeld zur autarken Stromversorgung recht unterschiedlicher Nutzer. Die erreichten Kosten für die Solarzellen ergeben hier durchaus heute schon ökonomische Wettbewerbsfähigkeit, vor allem, wenn es sich um entlegene Einsatzgebiete handelt, die nur mit erhöhtem Aufwand an terrestrische Versorgungsnetze angeschlossen werden können. Einige Beispiele demonstrieren die Vielfalt möglicher und realisierter Anwendungen in diesem Bereich sicher am besten.

Ein typischer Anwendungsfall ist die Stromversorgung autarker, automatisch und wartungsfrei arbeitender Geräte und Anlagen, wie automatischer Wetterstationen auf den Weltmeeren, in Wüsten oder im Hochgebirge, Leucht- und Navigationsbojen auf den Weltmeeren, automatischer Datensammelplattformen für Satelliten – Datensammelsysteme oder von Fernsehsummentürnen, die zur Fernsehversorgung von Gebirgstälern auf hohen Gipfeln ausgestellt werden. Die Solargeneratoren arbeiten hier meist zusammen mit Pufferakkus. Der Bedarf liegt in Größenordnungen vorwiegend bis zu 1 kW. In der UdSSR werden solche Anlagen schon seit Jahren zur Versorgung von Bezirkstelefonnetzen in Sibirien eingesetzt, in den Alpen und anderen Gebirgen zur Stromversorgung von Alm- und Berghütten, Rettungsstationen der Bergrettungsdienste oder Notrufanlagen. Bewährt haben sich »Taschengeneratoren« für wissenschaftliche Expeditionen, die zumindest die Energieversorgung von Funkprechgeräten gewährleisten. Auch der Strombedarf eines Hauses kann bei abgelegener Lage ökonomisch mit Solar-



*Einige Anwendungen für den sinnvollen Einsatz von Solarzellen in Abhängigkeit von den Kosten*

zellen gedeckt werden, wofür Flächen von etwa  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  als Mindestgrößen erforderlich sind. Solche Anlagen sind zweckmäßig in kombinierte Systeme zu integrieren, wie wir sie bei solarthermischen Hausversorgungsanlagen kennengelernt haben.

Ein breites Anwendungsgebiet ergibt sich schließlich für solarelektrische Anlagen im Bereich 5 bis 10 kW zur Stromversorgung kleiner Wohnsiedlungen und Wirtschaftseinrichtungen in bisher energetisch nicht erschlossenen Gebieten. Hier dürfte in den nächsten Jahren das wichtigste Anwendungsgebiet überhaupt zu sehen sein, vor allem in den Entwicklungsländern, in denen solche Einrichtungen Energieprobleme lösen helfen können und heute schon helfen. So sind z. B. Solargeneratoren für 5 kW ausreichend und vielfach im Einsatz, um Tiefbrunnen von Oasen zu betreiben und deren Bewohner mit Energie zu versorgen. Das ist viel wirtschaftlicher als die Errichtung von Übertragungsnetzen über Hunderte von Kilometern durch Wüstengebiete für einzelne Abnehmer mit relativ geringem Bedarf.

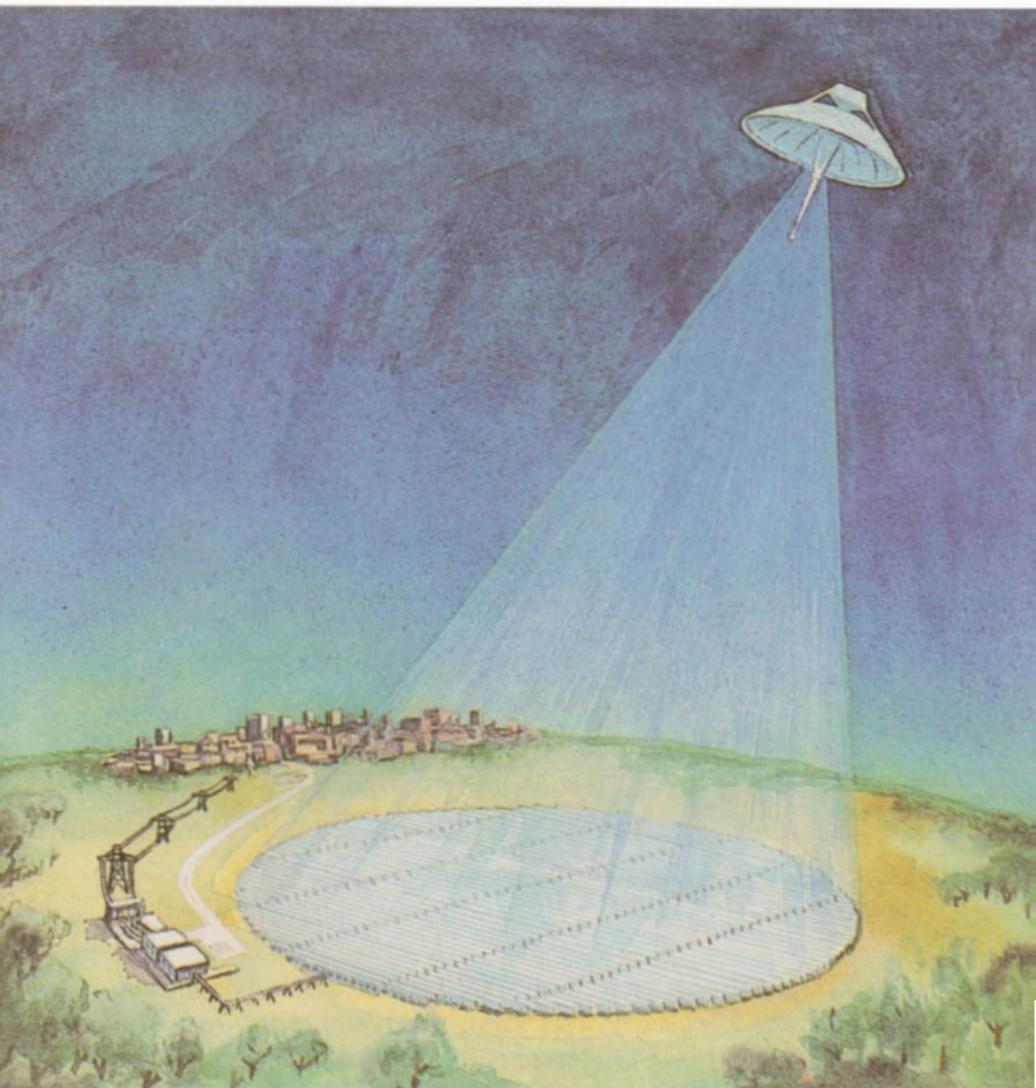
Auch in unserem Alltag werden wir sicher in Zukunft zunehmend der Solarzelle als Kleinenergielieferanten begegnen. Die solarzellengespeiste elektronische Armbanduhr ist heute schon Selbstverständlichkeit. Solarzellenbetriebene Kofferradios und Fernsehportables machen erste zaghafte Gehversuche auf dem Weltmarkt. Solaranlagen für Wochenendhäuser, Wohnwagen, Jagdhütten, Campingplätze und ähnliche Einrichtungen sind sicher in nicht allzu ferner Zukunft technisches Konsumgut wie heute Campingkocher oder Grill.

## Sonnenkraftwerke im Weltraum?

Die spektakulärste, aber auch streitbarste Version solarer Energienutzungsprojekte ist die Idee der Sonnenkraftwerke im Weltall, auch als Solarenergiesatelliten oder Satellitenkraftwerke bezeichnet. Sie geht auf den amerikanischen Ingenieur Dr. P. Glaser zurück, der weithin mitleidiges Lächeln erntete, als er sie 1968 erstmals äußerte. Inzwischen hat er wohl ebenso viele Befürworter wie vorbehaltlose Ablehner gefunden. Bei allem Für und Wider – aus den Überlegungen zu künftigen Nutzungsmöglichkeiten der Sonnenenergie können sie nicht mehr generell ausgeklammert werden.

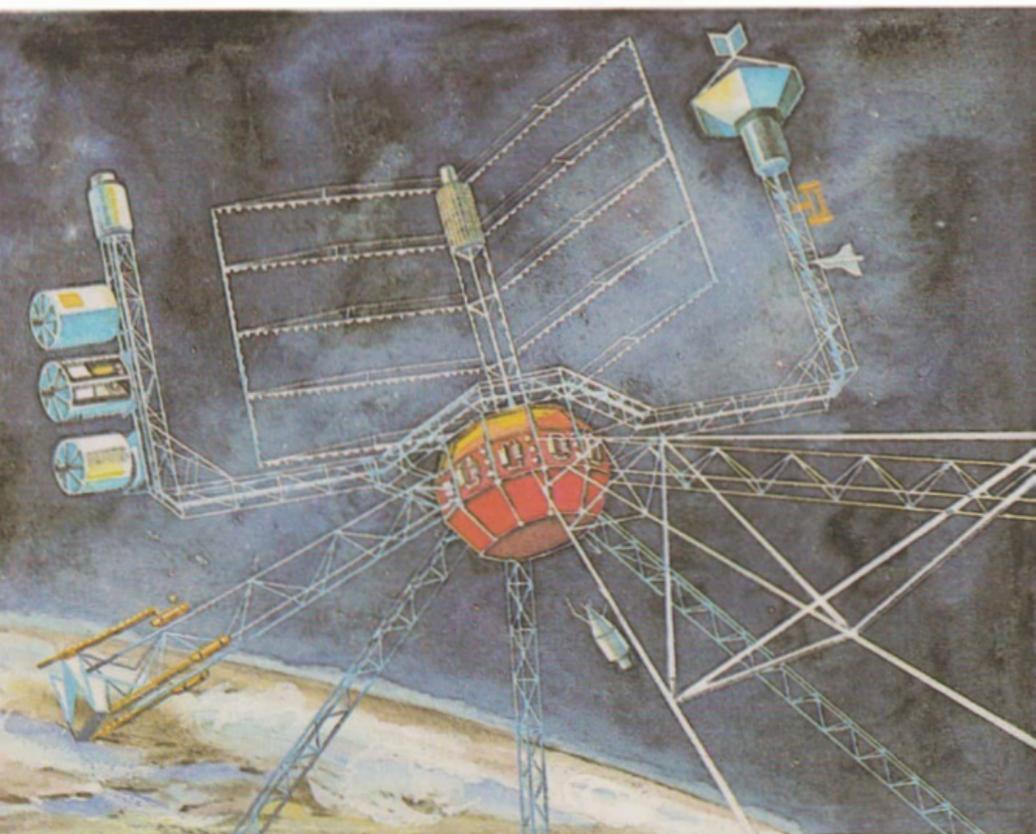
Für die Nutzung der Möglichkeiten der Raumfahrt im Dienst der terrestrischen Energetik gibt es – sieht man von der ebenfalls diskutierten, hier aber nicht betrachteten Möglichkeit der Installation von Kernkraftwerken im Weltall ab – zwei Versionen. Als erste ist die Variante sogenannter Reflektorsatelliten zu nennen, die das Sonnenlicht auf bestimmte Gebiete der Erde konzentrieren, so daß es hier mit höherer Intensität zur Nutzung durch eine terrestrische Anlage verfügbar ist. Als Reflektor eignen sich Spiegel- oder Prismensysteme.

Da eine globale Ausleuchtung der Erde mit konzentriertem Sonnenlicht aus ökologischen Gründen nicht möglich ist, muß die Konzentration auf eine bestimmte Fläche erfolgen. Um aus der Synchronbahn z. B. eine elliptische Fläche von  $88\,000\text{ km}^2$  in  $30^\circ$  geographischer Breite zu erreichen, wäre eine Spiegelfläche von etwa



*So könnte sie aussehen, eine Kraftwerksanlage mit einem Reflektorsatelliten, der das Sonnenlicht auf ein Solarzellenarray auf der Erde konzentriert.*

100000 km<sup>2</sup> notwendig. Im Zentrum des Lichtflecks würde ein Wandlerelement von 8000 km<sup>2</sup> Fläche bei 30 % Wirkungsgrad und 350 Tagen Sonnenschein etwa 1000 GW liefern. Ein solcher Spiegelsatellit hätte allerdings 2,5 bis 3 Mio t Masse und würde mit heute verfüg-



*Modell eines solarthermischen Satellitenkraftwerkes*

baren Trägermitteln zwischen 5000 und 10000 Starts erfordern. Zum Vergleich: Pro Raumfahrtjahrzehnt wurden bisher etwa 1000 Trägerraketen vorwiegend geringerer Nutzlastkapazität gestartet! Wir erkennen hier den utopischen Nimbus, der solchen Projekten heute anhaftet.

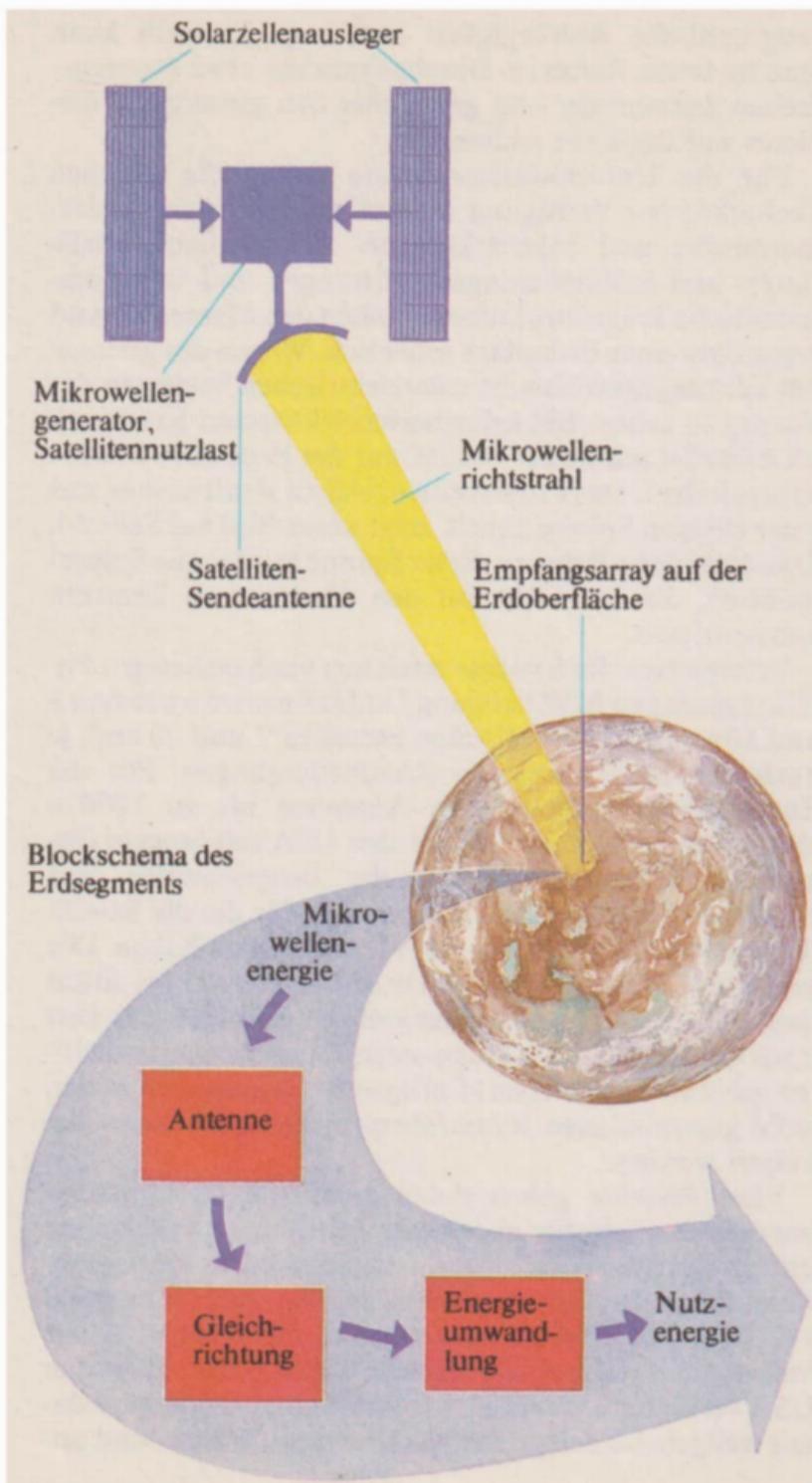
Die zweite Variante geht vom Aufbau solarelektrischer Kraftwerke in Umlaufbahnen und der drahtlosen, gerichteten Elektroenergieübertragung zur Erde aus. Die Gründe für diese Vorschläge sind zunächst recht einleuchtend, denn das Anzapfen der Sonnenenergie im Orbit hätte gegenüber der terrestrischen Nutzung viele Vorteile! Außerhalb der Erdoberfläche steht die Sonnenenergie ungeschwächt zur Verfügung, die tageszeitliche oder

geographische Abhängigkeit fällt weg. Deshalb kann man im freien Raum im Durchschnitt mit etwa der sechsfachen Sonnenintensität gegenüber den günstigsten Gebieten auf der Erde rechnen.

Für die Umwandlungssysteme stehen die gleichen Techniken zur Verfügung wie auf der Erde auch: solarthermische und solarelektrische. Erforderliche Steuerungs- und Stabilisierungsausrüstungen und weltraumspezifische Trägerstrukturen erhöhen den Masseaufwand gegenüber einer Erdanlage erheblich. Wegen des geringeren Leistungsgewichts ist solarelektrischen Systemen der Vorzug zu geben. Ein solarthermoelektrisches Kraftwerk im Erdorbit müßte für 10 GW auf der Erde etwa 57 000 t Masse haben. Das Projekt eines solchen Kraftwerkes, das einer riesigen Spinne ähnelt, zeigt unser Bild auf Seite 54. Zwischen den »Beinen« dieser Spinne werden die Spiegel montiert, die das Licht auf den Absorber im Zentrum konzentrieren.

Solarelektrische Systeme erreichen nach bisherigen Publikationen pro MW Leistung Umlaufmassen zwischen 3 und 10 t und Wandlerflächen zwischen 7 und 20 km<sup>2</sup>, je nach den angenommenen Randbedingungen. Für die Energieübertragung werden Antennen bis zu 1 000 m Durchmesser benötigt. Das in den USA seit langem diskutierte SUNSAT-Projekt geht beispielsweise von 10 000 MW elektrischer Leistung aus, für die die Satellitenpaneele 188 km<sup>2</sup> Fläche mit 14 Mrd. Zellen haben. Der gesamte Satellit ist dann 5 km breit und etwa 25 bis 30 km lang. Auch der Transfer eines solchen Gebildes erfordert noch wenigstens 1 000 Trägerstarts. Sonnenenergiesatelliten gehören damit neben künftigen Raumstationen zu den wohl gigantischsten Raumfahrtprojekten, die heute diskutiert werden.

Viele Projekte gehen dabei auch von an Gigantismus grenzenden, für absehbare Zeiträume zweifelsohne unrealistischen Vorschlägen aus. So wird in einer amerikanischen Studie vorgeschlagen, bis zum Jahr 2000 112 Orbitalkraftwerke zu errichten, die dann 40 % des Strombedarfs der USA decken sollen. Der über den USA verfügbare Raum im geostationären Orbit wäre damit weitgehend belegt, für Nachrichten-, Wetter- und an-



dere Anwendungssatelliten bliebe kaum noch Platz. Auf der Erde würde eine Fläche von der Größe Kaliforniens mikrowellenbestrahlt.

Welche technischen Schwerpunktprobleme sind für Sonnenenergiesatelliten überhaupt zu lösen? Da ist an erster Stelle die Schaffung eines geeigneten Raumtransportsystems zu nennen, das die Transportkosten auf mindestens 20% gegenüber heute senkt und entweder in hoher Anzahl oder kurzfristiger Wiederverwendbarkeit verfügbar ist. Die erste Raumpendlergeneration vom Typ des US-amerikanischen SPACE SHUTTLE erfüllt diese Forderungen bei weitem noch nicht. Gedacht wird an einen Start der Bauteile in eine erdnahe Umlaufbahn, wo die Montage des Satelliten erfolgt. Von hier aus soll er dann durch elektrische Triebwerke in die geostationäre Bahn gebracht werden. Das Verfahren würde den Aufenthalt von 200 bis 500 Menschen in der niedrigen und 10 bis 20 in der geostationären Bahn erfordern. Für sie sind nicht nur Transportmöglichkeiten, sondern auch Raumwohnstätten erforderlich. Welche Umweltbelastungen der Atmosphäre eine solche Starthäufigkeit nach sich zieht, ist noch zu untersuchen.

Für die Wandler Elemente selbst sind nicht nur enorme Kostensenkungen notwendig, sondern auch weitaus bessere Eigenschaften hinsichtlich der Langlebigkeit, denn sie dürfen über zwei bis drei Jahrzehnte hinweg keinen wesentlichen Leistungsabfall zeigen. Auch die Entwicklung der erforderlichen großräumigen, trotz geringer Schwingungsdämpfung stabilen Trägerstrukturen, ihrer Montagetechnologien und räumlichen Stabilisierung erfordern noch Entwicklungsarbeiten. Schließlich ist die drahtlose Energieübertragung zur Erde zu nennen, die mit hohem Wirkungsgrad ohne Belastung und Gefährdung der Umwelt, speziell der Biosphäre, erfolgen muß. Hierfür stehen Mikrowellen und Laserstrahlen zur Diskussion. Laserstrahlen erlauben eine engere Strahlbündelung und stärkere (daher auch gefährlichere) Energiekon-

*Schema eines solarelektrischen Energiesatelliten mit drahtloser Energieübertragung zur Erde*

zentration bei kleineren Systemabmessungen der Übertragungseinrichtungen. Sie unterliegen aber auch stärkeren atmosphärischen Störeinflüssen und Schwächungen. Bisherige Projekte geben deshalb Mikrowellen den Vorzug. Terrestrische Experimente werden damit seit 1963 gemacht, durch die die physikalischen Grundfragen als geklärt betrachtet werden können, noch nicht aber die Technik von Hochleistungsübertragungen Weltraum-Erde.

Empfangsarrays auf der Erde benötigen Flächen von etwa 4 bis 5 km<sup>2</sup> pro 1 000 MW, ein 10 000-MW-Projekt erfordert also 50 km<sup>2</sup>. Hinzu kommt ein zwei- bis dreifach größerer Sicherheitsbereich, so daß der Gesamtbedarf auf 200 km<sup>2</sup> ansteigt. Die Errichtung ist nur in unbewohnten Gebieten möglich, z. B. in Wüstenregionen oder auf künstlichen Meeresinseln. Inwieweit diese Regionen zum generellen »Niemandland« erklärt werden müssen, ist noch strittig. Es hängt sowohl von der Energiekonzentration als auch von der Sicherheit ab, mit der ein Auswandern des Richtstrahls verhindert werden kann. Hierfür müssen adaptive Rückkopplungssysteme Erde-Weltraum eingesetzt werden, die jede Veränderung, z. B. durch Satellitenpositionsänderungen, ohne Zeitverzug korrigieren. Von den Biologen werden zum Schutz der Fauna Absperrungen mit einige hundert Meter hohen Netzen gefordert. Fragen nach möglichen Auswirkungen auf die Luftfahrt, die Raumfahrt selbst oder das terrestrische Funkwesen sind noch weitgehend unbeantwortet.

Diese und noch viele andere Probleme lassen den Schwierigkeitsgrad solcher Projekte erkennen. Für zahlreiche Probleme gibt es heute noch keine praktikablen Lösungen, auf ebenso viele Fragen keine begründeten Antworten. Ökonomische Einschätzungen sind mehr als vage. Es ist deshalb nicht möglich, eine fundierte und endgültige Prognose der Realisierbarkeit und künftig möglichen Bedeutung solarer Weltraum-Satellitenkraftwerke zu stellen. Dementsprechend vorsichtig und mit Vorbehalten müssen heutige Einschätzungen aufgenommen werden. Dennoch: In das Reich der Utopie sind die Projekte nicht mehr delegierbar. Der erreichte Leistungsstand der Raumfahrt, der sich ständig beschleunigende

wissenschaftlich-technische Fortschritt und die perspektivischen Energieprobleme verlangen einfach die Einbeziehung auch dieser Variante in unser Zukunftsdenken. Vor dem Jahr 2000 dürften, das ist der Standpunkt sowjetischer Wissenschaftler, keine Voraussetzungen für eine Inangriffnahme zunächst experimenteller Vorhaben bestehen.



---

# Energie aus der Atmosphäre

---

Die Sonnenenergie steht uns nicht nur in originaler Form, sondern auch in verschiedenen sekundären Erscheinungsformen zur Verfügung. Eine davon sind die Bewegungen unserer Atmosphärenschichten, die Winde. Aus Langzeitmessungen von Boden- und Höhenwinden sowie der Zuggeschwindigkeit von Wolken- und Wetterfronten wurde abgeschätzt, daß ständig etwa 1,5 bis 2,5 % der auf die Erde eingestrahlten Sonnenenergie in atmosphärische Strömungsenergie umgesetzt werden. Das entspricht einer mittleren Leistung von 2,6 bis  $4,3 \cdot 10^3$  TW. Nach heutigen Einschätzungen könnten davon etwa 3 % durch Windturbinen entnommen werden, das wären 6,6 bis  $11,1 \cdot 10^5$  TWh/Jahr.

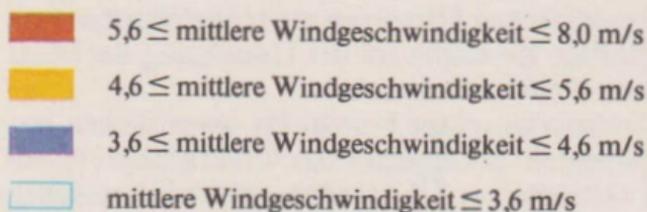
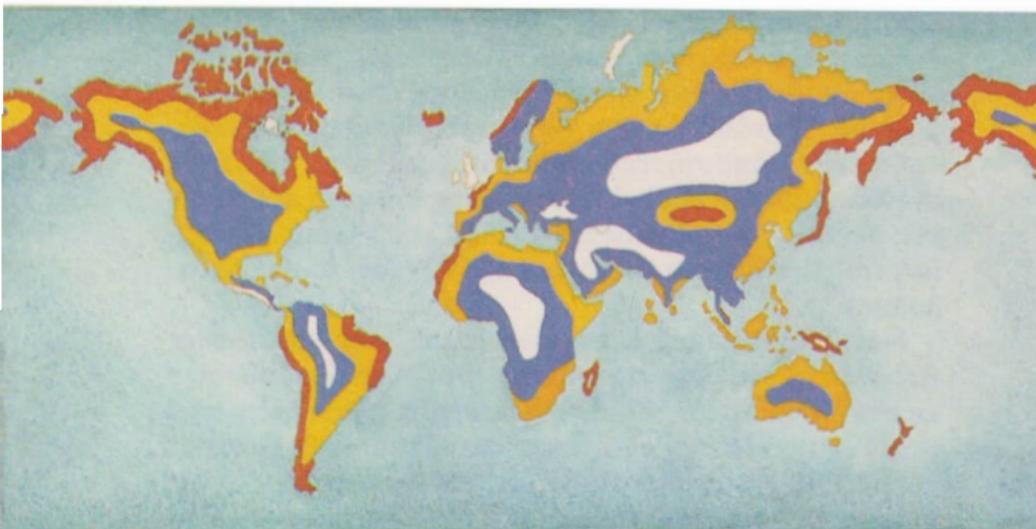
Wie für die Sonnenenergie sind auch für die Nutzung der Windenergie die Voraussetzungen nicht überall gleich. Die kräftigsten Winde treten über den Weltmeeren auf. Da hier die Luftströmungen über den Wasserflächen eine nur geringe Reibung erfahren, erreichen sie die Küsten mit noch hohen Geschwindigkeiten, um dann über 100 km Entfernung und mehr landeinwärts schnell an Energie zu verlieren, verursacht durch die höhere Reibung an den Landflächen. Die Schichten gleicher Windgeschwindigkeit werden damit landeinwärts zunehmend in größere Höhen verdrängt. Die günstigsten Voraussetzungen für die Nutzung der Windenergie ergeben sich mithin in den Küstenregionen, so an der West- und Ostküste Afrikas, der Westküste Süd- und Nordamerikas so-

*Windmühlen prägten viele Jahrzehnte das Landschaftsbild vieler Länder.*

wie den nördlichen Küstenregionen Nordamerikas, Kanadas und der Sowjetunion. In den Zentralgebieten Asiens, Afrikas und Südamerikas sind die Chancen einer wirtschaftlichen Nutzung der Windenergie praktisch gering, in anderen Kontinentalregionen müssen entsprechende Höhenlagen ausgenutzt werden.

Historisch gesehen, ist die Windenergie eine der ältesten, wenn nicht überhaupt die älteste der genutzten natürlichen Energiequellen. Schon vor 5000 Jahren trieb der Wind Segelboote und -schiffe über die Meere. Bereits vor 2000 Jahren wurde die Windmühle erwähnt, und der Grieche Heron von Alexandrien beschrieb die ersten Windräder, die jedoch auf kein Interesse stießen, da in der antiken Wirtschaft noch kein Bedarf dafür bestand. Erst im 12. bis 13. Jahrhundert begann die Windmühle wirtschaftliche Bedeutung zu erlangen. Vermutlich entstanden die ersten Anlagen in Europa, in Nordfrankreich und der Rheingegend. Viel früher allerdings sollen Windmühlen im Orient, im Iran und im Gebiet des heutigen Afghanistan gestanden haben. Sie dienten vor allem als Korn- und Sägemühlen, später auch als Wasserpumpen. Besonderen Aufschwung erlebten sie in Holland. Bis zu 10000 Windmühlen wurden hier betrieben. In den USA zählte man im vorigen Jahrhundert über 6 Mio Windenergieanlagen. Aus Holland beispielsweise stammt auch einer der wichtigsten Entwicklungsschritte der Windmühle, die drehbare Haube, die Andries von Moerbeke im 16. Jahrhundert erfand und mit der das Flügelrad nach dem Wind gerichtet werden konnte. Damit wurde ein Betrieb bei allen Windrichtungen möglich, was besonders für die holländischen Poldermühlen wichtig war, mit denen überspültes Land trockengepumpt wurde. Die Windmühle erlebte im 18. und 19. Jahrhundert ihren Höhepunkt für die Erzeugung mechanischer Energie, ehe dann vielerorts das große Mühlensterben einsetzte.

Aber schon in den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts kündigte sich eine Renaissance an; es wurde an sturmsicheren und weniger wartungsintensiven Windanlagen für die Elektroenergiegewinnung gearbeitet. So entstanden mit Bleiakkulatoren gepufferte Kleinanlagen für Leistungen bis zu einigen 100 W für die Hausversor-



### *Verteilung der Windgeschwindigkeiten auf unserem Erdball*

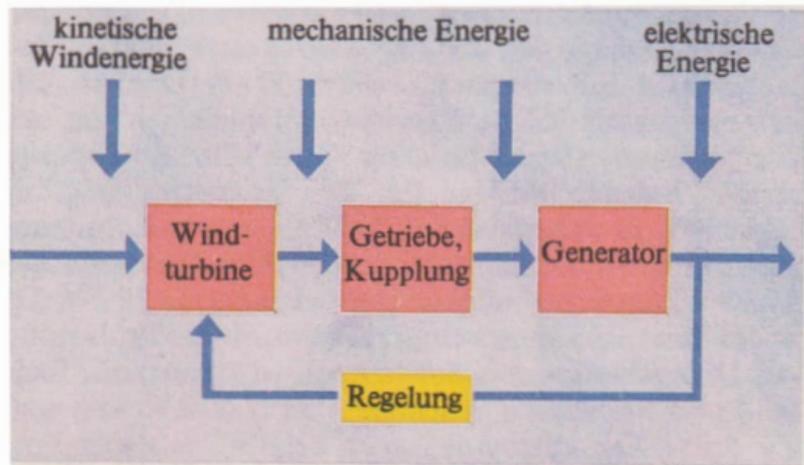
gung, aber auch größere im Kilowattbereich. In Deutschland arbeiteten in den dreißiger Jahren etwa 9000 solcher Anlagen mit Einzelleistungen bis zu 20 kW. Dänische Ingenieure hatten solche Experimentalanlagen schon vor der Jahrhundertwende errichtet. In der UdSSR wurde die erste Windenergieanlage für die Stromerzeugung im Jahre 1931 in Balaklawa auf der Krim errichtet. Sie hatte einen Flügelraddurchmesser von 30 m und erreichte bei 9 m/s Windgeschwindigkeit eine Leistung von 75 kW, die in das Straßenbahnnetz eingespeist wurde zur Entlastung des Dampfkraftwerkes Sewastopol. In Dänemark, England und Frankreich errichtete man 1000-kW-Anlagen. Zu dieser Zeit entstanden auch bereits die ersten Vorschläge für Höhenwindkraftwerke auf 300 bis 400 m hohen Türmen, die auf eine Idee des deutschen Ingenieurs

Hornoff zurückgehen. Mit 160 m großen Flügelrädern wollte er eine Leistung von 326 kW erreichen; freilich Projekte, die heute noch unreal erscheinen. Naheliegender jedoch die Begründung: Im Gegensatz zur Erdoberfläche, auf der der Wind ein recht unbeständiger Partner ist, wird in Höhen über 90 m die Luftbewegung immer gleichmäßiger, um über 300 m Höhe mit 10 bis 12 m/s Geschwindigkeit eine Kontinuität zu erreichen, die Wasserläufen nahekommt.

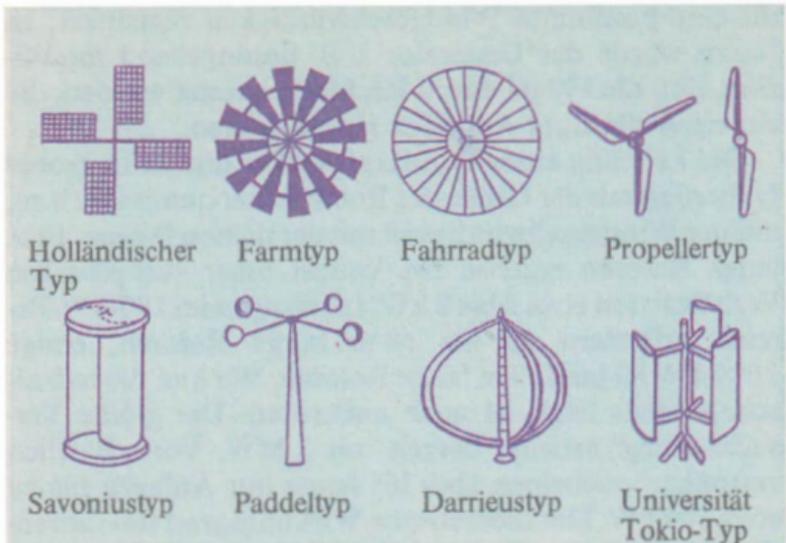
Nach Jahrzehnten kontinuierlicher, aber verhaltener Arbeiten ist seit etwa einem Jahrzehnt auch das Interesse an der Nutzung der Windenergie wieder gewachsen, und es gibt eine Vielzahl von Experimenten und Projekten.

Für Windenergiekonverter ist heute ein relativ hoher Erkenntnisstand vorhanden. Im Gegensatz zu Solarzellen kann man hier davon ausgehen, daß keine prinzipiell neuen technologischen Prinzipien mehr zu erwarten sind, sondern künftige Konzepte auf der Umsetzung des heute vorhandenen Know-how beruhen.

Eine Windenergieanlage besteht im wesentlichen aus drei Komponenten: der eigentlichen Windturbine (Windrad), dem Getriebe zur Übertragung der mechanischen Energie und dem Generator zur Elektroenergieerzeugung. Hinzu kommen Hilfseinrichtungen, vor allem Regelgeräte zur Laufregelung der Turbine.



*Komponenten eines Windenergiekonverters*



### *Ausführungsformen von Windturbinen*

Für die Windturbine selbst sind im Laufe der Jahrzehnte zahlreiche Ausführungsformen entwickelt und erprobt worden. Sie sind nach der Art der Achslagerung unteilbar in Turbinen mit Horizontalachsen und in Turbinen mit Vertikalachsen. Davon sind für eine wirtschaftliche Energiegewinnung praktisch nur die Horizontalachsenanlagen geeignet, hiervon wiederum speziell die Propellermaschinen, sowie die Vertikalachsenanlagen nach dem Darrieus-Prinzip, die allerdings noch durch gezielte Grundlagenforschung zu untersuchen sind. Die heute in vielfacher Hinsicht optimale Lösung ist der schnelllaufende Rotor mit horizontaler Achse und ein bis drei Rotorblättern. Allerdings müssen die Flügel aller Horizontalanlagen immer in Windrichtung weisen, was bei Großanlagen technische Probleme mit sich bringt. Diesen Nachteil umgehen die vertikalen Typen wie der genannte Darrieus-Generator. Er besitzt zwei bogenförmige Flügel, die an einem etwa 15 m hohen bogenförmigen Schaft sitzen, um den sie sich drehen. Dieser Generator läuft allerdings nach einer Windstille nicht wieder von allein an – ein Problem, das noch einer Lösung bedarf. In Versuchsanlagen wurden ein Windmeßgerät und ein Motor eingebaut, der die Flügel in Bewegung setzt, sobald das Meßge-

rät eine bestimmte Windgeschwindigkeit registriert. In Japan wurde der Generator z. B. dahingehend modifiziert, daß die Flügel durch Rechtecke ersetzt wurden, die ein eigenständiges Anlaufen gewährleisten.

Die Leistung eines Windkraftwerkes nimmt in grober Näherung mit der Größe der Rotorblätter quadratisch zu, mit der Windgeschwindigkeit mit der dritten Potenz. 10 m lange Rotoren ergeben bei Vollast unter europäischen Verhältnissen etwa 3 bis 8 kW. Leistungen im 100-kW-Bereich erfordern 40 bis 50 m lange Rotoren, einige 1000-kW 80 bis 120 m lange Rotoren. Wo hier die technische Grenze liegt, ist noch umstritten. Die größte Versuchsanlage arbeitet derzeit mit 3 MW. Wirtschaftlich vertretbar erscheinen aber bis heute nur Anlagen bis zu etwa 100 kW. Der theoretische Wirkungsgrad frei fahrender Windturbinen liegt bei knapp 60 %, reale Einsatzbedingungen ergeben maximal 46 bis 50 %. Bei konstanter Drehzahl ergibt sich im Mittel über alle Betriebszustände eine optimale Energienutzung von 25 bis 32 %.

Eine Umweltbelastung durch Abprodukte tritt nicht auf, wohl aber durch die Geräusentwicklung bei Großanlagen. Optisch dürften sie nicht mehr und nicht weniger störend empfunden werden als Hochspannungsfreileitungen. Erheblich ist bei Windanlagen auch der Flächenbedarf, wenngleich der Bedarf eines Einzelkonverters vergleichsweise gering ist. Ein 300-MW-Kraftwerk aus 100 Einzelkonvertern benötigt z. B. etwa 10 bis 12 km<sup>2</sup>, was bei einem Aufbau in zwei Reihen von 1 bis 1,2 km Abstand eine Gesamtlänge von 10 km erfordert.

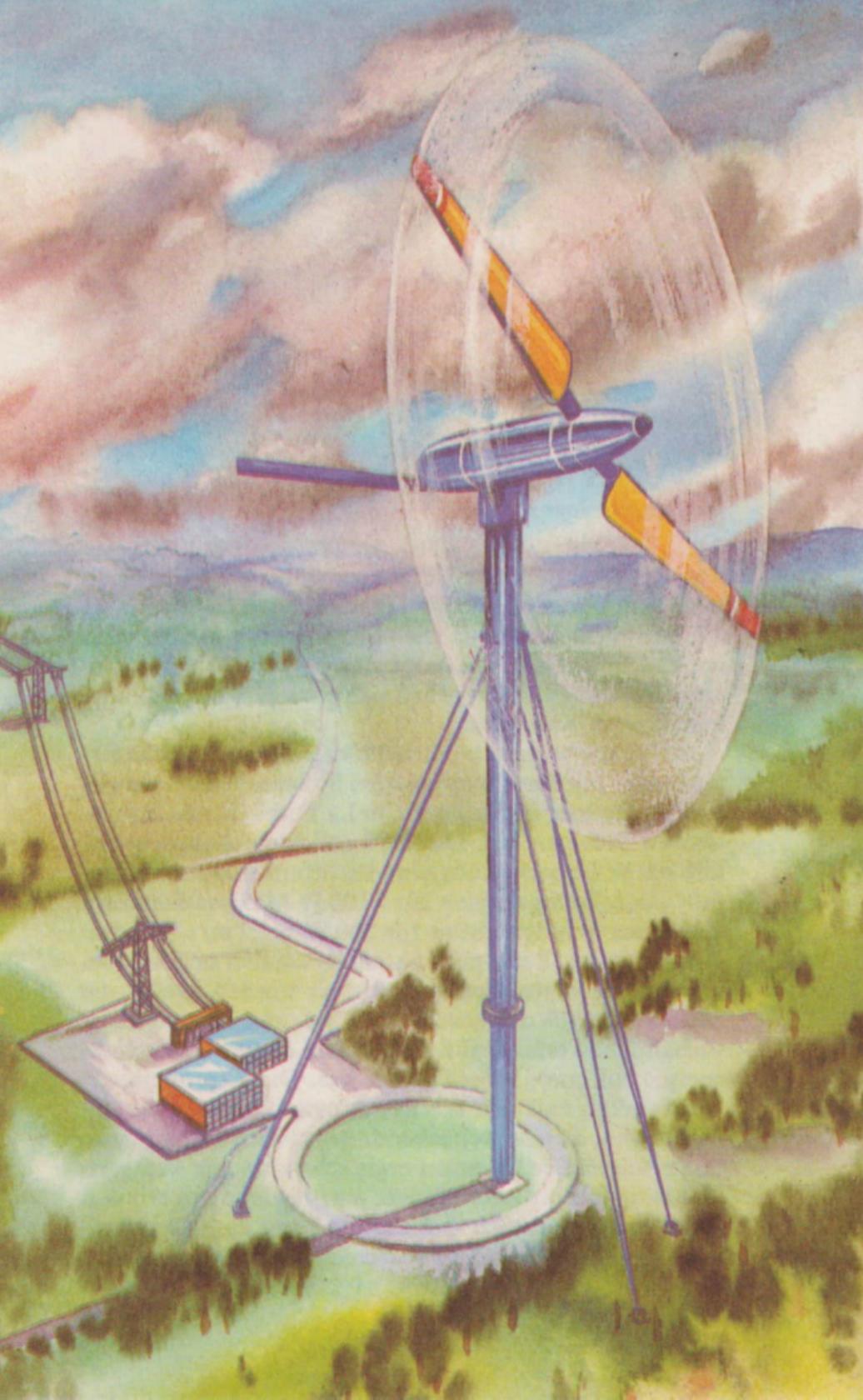
Ein Nachteil der Energiequelle Wind ist die Diskontinuität des Energieangebots. Autarke Anlagen erfordern deshalb Energiespeicher. Eine andere Möglichkeit ist der Verbundbetrieb mit anderen Kraftwerken, z. B. Wasserkraftwerken. Einen Ausgleich kurzzeitiger Schwankungen können auch landesweit verteilte Windkraftwerke in Verbundsystemen gewährleisten, wie Untersuchungen in der BRD zeigten. Hier wurde eine Simulation mit 25 ausgewählten Meßstationen in großräumiger Verteilung durchgeführt, die ergab, daß ein solches Verbundsystem nur fünf Stunden im Jahr keine Energieabgabe aufweisen würde. In das Experiment einbezogen waren auch Statio-

Monat	Mittlere Leistung (Watt)		gesamt
	Sonnen- generator	Windgenerator	
Juli	133	71	204
August	112	105	217
September	132	61	193
Oktober	115	116	231
November	135	91	226
Dezember	107	68	175
Januar	76	165	241
Februar	105	128	233

*Erprobungsergebnis einer französischen kombinierten Wind-Solar-Energieanlage*

nen mit einer niedrigen Energieabgabe, die 7200 Stunden/Jahr keinerlei Energie lieferten. Natürlich wäre die Abgabe nicht konstant. Die volle Leistung wurde praktisch nicht erreicht, die halbe nur etwa zu 20 % im Jahr. Über ein halbes Jahr ergaben sich etwa 40 % der maximal installierten Kapazität.

Auf eine interessante Variante wiesen französische Experimente mit einer kombinierten Sonnen-Wind-Energieanlage, genannt »Aerosolec«, in La Turbie in den französischen Seealpen hin. Die 1978 errichtete Anlage speist mit 200 W Dauerleistung eine Richtfunkstation. Sie umfaßt einen Solargenerator für 1 100 W Maximalkapazität und einen Windgenerator für 300 W bei 7 m/s Windgeschwindigkeit. Beide sind parallelgeschaltet und können getrennt oder gleichzeitig betrieben werden, wobei die Aufteilung nach den jeweiligen Wind- und Bestrahlungsverhältnissen erfolgt. Ein Pufferakku nimmt Überschußenergie auf und gleicht Defizite aus. Das Erprobungsergebnis zeigt, daß sich die Kombination als sehr vorteilhaft erwies, da eine weitgehende gegenseitige Kompensation erfolgte. Die Gesamtenergie schwankt nur wenig, so daß lediglich für zwei Monate eine Speisung durch den Akku erfolgen mußte. Die Lösung kann deshalb durchaus als zukunftssträchtiger Vorschlag angesehen werden.



Welche Rolle kann und wird die Energiequelle Wind künftig spielen? Windkonverter sind gegenüber Solarzellen bedeutend kostengünstiger. Da die relativen Stromerzeugungskosten mit wachsender Größe einer Anlage sinken, wäre ein Windkonverter von einigen Megawatt schon heute prinzipiell konkurrenzfähig. Dabei allerdings nicht berücksichtigt ist das erforderliche Energiespeichersystem, für das zur Zeit noch keine praktikable Lösung vorhanden ist, das aber auch in diesem Falle ein entscheidendes Problem für die Bewertung der künftigen Rolle darstellt. Vorerst müssen wir deshalb auch für die Windenergie zu einer ähnlichen Einschätzung kommen wie für die Sonnenenergie.

Der technisch und ökonomisch akzeptable Anwendungsbereich liegt für Horizontalläufer im Leistungsbereich bis etwa 100 kW, wie sie für dezentrale, autarke Anlagen interessant sind. Ihre Anwendung erfolgt in industrialisierten Ländern vor allem für die Versorgung abgelegener Verbraucher. Ein breites Anwendungsspektrum eröffnet sich auch hier für Entwicklungsländer zum Aufbau dezentraler, regionaler Versorgungsnetze, z. B. zum Betrieb von Wasserpumpen, Industrie- und Landwirtschaftskomplexen oder zur Versorgung kleinerer Wohnsiedlungen. In der UdSSR werden Anlagen dieser Größenordnung schon seit 1976 serienmäßig hergestellt, die sich in der Steppe ebenso bewähren wie im Hohen Norden. Allein an der Baikal-Amur-Magistrale waren bis zu 100 installiert, in unserem Jahrzehnt sollen landesweit etwa 150000 hinzukommen. 1990 sollen in der Sowjetunion 4,5 GW durch Windkraftwerke erzeugt werden, weltweit im Jahr 2000 etwa 5 % des Gesamtbedarfs, was allerdings ein optimistischer Wert ist. Zur Erreichung dieses Zieles ist noch erhebliche Forschungsarbeit notwendig, deren Grundlage eine Reihe errichteter und projektierte Großanlagen ist. Ihr Betrieb aber zeigt schon heute die Probleme auf, denn so einfach das Prinzip auch ist, die Technik der Großanlagen wird noch nicht beherrscht. So ist zu registrieren, daß bis Ende 1981 noch keine »Superwindmühle« mehr als 1000 Betriebsstunden an-

*Windgigant GROWIAN (BRD)*

standslos gelaufen ist. Die 30 m langen Rotorblätter einer 1979 im USA-Staat North Carolina errichteten Anlage, die für 2000 Bewohner Strom liefern sollte, mußten beispielsweise schon nach sechs Monaten wieder von dem 42 m hohen Turm genommen werden, da sie den mechanischen Belastungen nicht standgehalten hatten. Auch eine in Dänemark errichtete 2-MW-Anlage kann nur im »Schonbetrieb« arbeiten. Die extremen mechanischen Belastungen für die rotierenden und auch stationären Komponenten haben sich als eines der Hauptprobleme solcher Riesenanlagen überhaupt herauskristallisiert. Experten glauben, daß Anlagen mit bis zu 100-m-Rotoren beherrschbar sein werden, darüber wird es kritisch. Bei etwa 170 m wird derzeit eine generelle technische Grenze für absehbare Zeiträume gesehen.

Zu den Riesen unter den Giganten von Windenergieanlagen zählt die in der BRD errichtete Anlage GROWIAN (Große Windanlage) bei Brunsbüttel. Auf einem 120 m hohen Turm befindet sich ein Zweiflügelrotor aus glas- und kohlefaserverstärktem Kunststoff mit 100,4 m Rotorlänge. Er ist für 2 bis 3 MW ausgelegt. Allerdings kommt er erst bei 21 km/h Windgeschwindigkeit auf volle Touren und bringt die volle Leistung nur bei Windstärke 5 der Beaufortskala. Darunter und darüber muß die Anlage aus technischen Gründen abgeschaltet werden, so daß sie maximal 6 Monate/Jahr voll gefahren werden kann. Trotz dieser Probleme liegen noch größere Projekte vor, so das eines 10-MW-Giganten mit einem Einflügelrotor von 170 m Länge. All diese und zahlreiche andere Großprojekte dienen vorerst Forschungs- und Testzwecken, um Betriebsverhalten und -eigenschaften zu untersuchen, vor allem auch die Langzeiteigenschaften des Materials und der hochbelasteten Komponenten. Der Testbetrieb wird entscheidende Aussagen dafür liefern, wohin sich die technisch und ökonomisch vertret- und nutzbare obere Leistungsgrenze in Zukunft verlagern lassen wird.

---

# Strom aus Abfällen

---

Haben Sie sich beim sonntäglichen Waldspaziergang nicht oft schon die Frage gestellt, ob die zur Verbrennung angehäuften Holzabfälle auf dem Einschlag nicht einer nützlicheren wirtschaftlichen Verwendung zugeführt werden könnten? Weltweit fallen jährlich erhebliche Mengen solcher und ähnlicher Abfallprodukte an, für die heute kein anderer Weg als der der Vernichtung bleibt. Ein Weg, der nicht nur wenig umweltfreundlich ist, sondern auch Energie verschenkt. 1 kg Stroh hat z. B. einen Wärmeinhalt von etwa 0,6 l Heizöl. Die Strohmenge, die auf 1 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche erzeugt wird, erreicht das gleiche Potential wie 1200 bis 1500 l Heizöl. Würde es sich deshalb nicht lohnen, diese Reserven zu nutzen? Tatsächlich ist auch die Erschließung biologischer Energiequellen, auch als biotische Energiequellen bezeichnet, wieder zu einem weltweiten Betätigungsfeld der Wissenschaftler geworden. Dabei steht nicht unbedingt die Elektroenergiegewinnung im Vordergrund – die Stromerzeugung aus Stroh beispielsweise ist aus heutiger Sicht unökonomische Utopie –, sondern die Gewinnung von Roh-, Kraft- und Brennstoffen. Die Biomasse unseres Erdballs stellt hierfür ein beachtliches Potential dar.

Als Biomasse der Biosphäre unseres Erdballs bezeichnet man die Gesamtheit der organischen Substanzen in Form lebender Zellen. Zu ihrem Aufbau und ihrer Regeneration erfordert sie ständige Energiezufuhr. Diese wird von der Sonne geliefert und durch Photosynthese in chemische Energie umgesetzt. Bioenergie also ist ebenfalls nichts anderes als gespeicherte Sonnenenergie. Die biologische Energieumwandlung läuft seit Millionen von Jah-

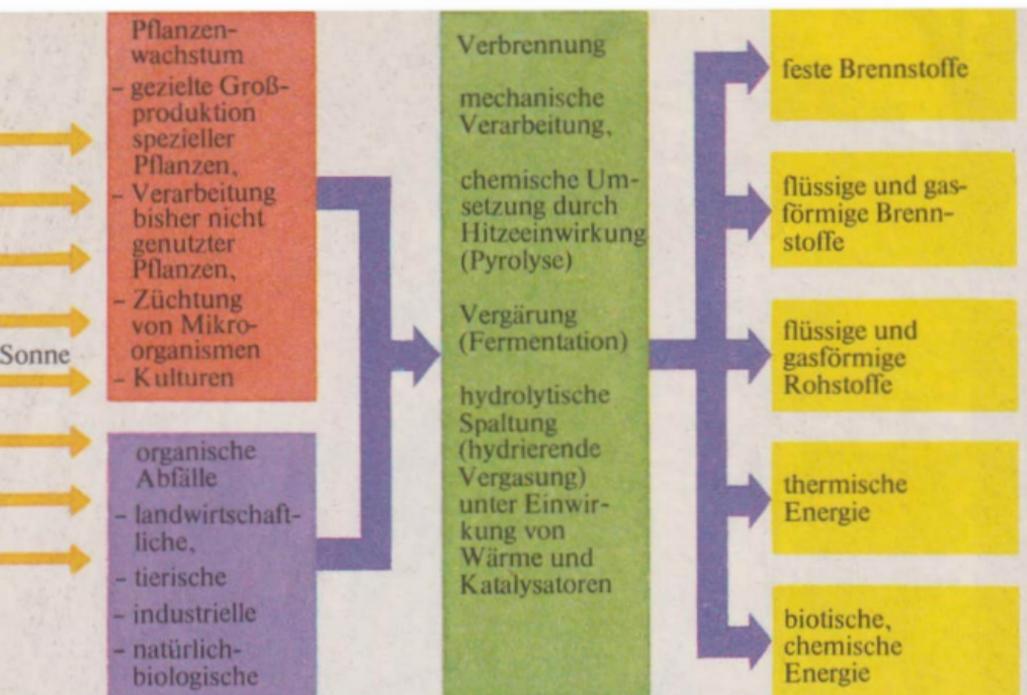
ren, unbeeinflusst durch den Menschen, im Rahmen eines natürlichen geschlossenen Kreislaufs ab und fixiert pro Jahr etwa  $2 \cdot 10^{11}$  t Kohlenstoff, was einem Äquivalent von 3 bis  $4 \cdot 10^{12}$  GJ gespeicherter Energie entspricht. Nur 1 bis 2 % davon werden als Nahrungsmittel verwendet, weitere 2 % als Holz und für die Papierherstellung. Den »Rest« bildet die Nettoproduktion, die maximal für energetische Zwecke nutzbar wäre. Rund 65 % davon wiederum werden auf dem Festland akkumuliert, während die Weltmeere ein nur geringes Potential aufweisen.

Erste Ideen zur Nutzung biotischer Energien entstanden schon im 19. Jahrhundert. Im Jahre 1888 demonstrierte der Franzose Gayon vor der »Société des Science« in Bordeaux die Gaserzeugung durch Vergären von Stalldung und Wasser in einem luftdicht verschlossenen Behälter. Sein Experiment bildete die Grundlage eines in den zwanziger Jahren entwickelten Gärverfahrens, mit dem eine kontinuierliche Erzeugung von Biogas erreicht wurde. Mit Anlagen dieser Art wurden später vielerorts städtische Kläranlagen ausgestattet, die Biogas für kommerzielle Zwecke produzierten, so in Halle und Erfurt. Die Wirtschaftlichkeit aber war gering, Erdöl und Erdgas kostengünstigere Energieträger. Es gab kaum technische Weiterentwicklungen, bis man sich heute auch dieser Energiequelle wieder erinnert.

Insgesamt zeichnet sich Biomasse durch enorme Vielseitigkeit und differenzierte Erscheinungsformen aus. Entsprechend verschiedenartig sind die Nutzungsmöglichkeiten und -aspekte. Voraussetzung ist in jedem Fall ein billiger, häufiger und möglichst überall verfügbarer Rohstoff, der leicht gewinnbar ist und eine einfache und sichere Aufbereitung ermöglicht, wobei ein Wirkungsgrad des gesamten technologischen Prozesses von wenigstens 10 % erreicht werden sollte. Der Gesamtvorgang soll ferner umweltfreundlich sein, ökologisch nicht belastend und ohne schädliche Abprodukte verlaufen. Zur Erschließung von Biomasse für energetische Zwecke bieten sich im wesentlichen vier Möglichkeiten an:

*38 % des Festlandssockels unseres Planeten werden von Wäldern bedeckt, die ein riesiges Energiereservoir darstellen.*





### **Nutzung von Biomasse**

- die gezielte Großproduktion spezieller Pflanzen in Großfarmen,
- die Verarbeitung bisher wirtschaftlich nicht genutzter Pflanzen, besonders möglichst schnellwachsender Arten,
- die Züchtung spezieller Kulturen, z. B. von Mikroorganismen,
- die Verwertung biologischer Abfallprodukte aus der Land- und Forstwirtschaft.

Dabei sollte die Abfallverwertung zunächst einmal an vorderster Stelle stehen.

Im Mittel liegt die biologische Ausbeute der auf die Erde gelangenden Sonnenenergie bei nur 0,14%. Die höchsten Wirkungsgrade erreichen natürliche Vegetationszonen, wie Wälder und Sumpfgebiete. Tropische Regenwälder verbuchen eine Ausbeute von 0,8%, sonnengrüne Wälder eine solche von 0,5%. Bei 50 Mio km<sup>2</sup> Waldbestand entspricht das einem jährlichen Energieäquivalent von  $322 \cdot 10^9$  MWh. Grasland erreicht zum Vergleich

nur 0,3 % Ausbeute, die Tundra 0,06 %. Praktisch Null ist die Ausbeute der Wüstengebiete. Eine Erhöhung des Wirkungsgrades ist durch die Erschließung brachliegenden oder die Kultivierung bisher unfruchtbarer Landes möglich, ebenso durch den verstärkten Anbau ergiebigerer Vegetationsarten. Andererseits erfordern solche Maßnahmen höheren Energieaufwand für Bearbeitung und Düngung, so daß hier Grenzen gesetzt sind. Diese ergeben sich auch durch die Vegetationsperioden und das schwankende Strahlungsangebot.

Für die energetische Verarbeitung von Biomasse gibt es mehrere Möglichkeiten. Da ist als naheliegendstes Verfahren die Verbrennung zu nennen, die natürlich nur für brennbare, trockene Komponenten anwendbar ist, wie Holz, zellulosehaltige Industrieabfälle und landwirtschaftliche Abprodukte. Eine zweite Variante ist die chemische Umsetzung durch Hitzeeinwirkung, die ebenfalls auf Festprodukte begrenzt ist. Im Gegensatz hierzu sind bei der Vergärung von Biomasse auch wasserhaltige Stoffe umsetzbar, ebenso bei der hydrolytischen Spaltung unter Einwirkung von Wärme und Katalysatoren.

	Biotische Ausbeute an der Sonneneinstrahlung bei einer mittleren jährlichen Strahlungsdichte von $133 \text{ W/m}^2$ in %	Gesamtfläche auf der Erde in Mio $\text{km}^2$
Wüste	0,0	24,0
Sumpf	0,8	2,0
Süßwasser (Seen, Flüsse)	0,5	4,0
Grasland	0,3	24,0
Tundra	0,06	8,0
Buschwüste	0,03	18,0
Tropischer Regenwald	0,8	17,0
Sommergrüner Wald	0,5	7,0
Regengrüner Wald	0,6	7,5
Hartlaubwald	0,4	1,5
Kulturland	0,3	14,0

***Biotische Ausbeute einiger Vegetations- und Erdregionen***

Welches Verfahren zum Einsatz kommt, hängt sowohl von den verfügbaren Ausgangsprodukten als auch vom gewünschten Endprodukt ab. Grundproblem bei der Verwendung pflanzlicher Rohstoffe ist der hohe Aufwand für das Sammeln und Einbringen, bei dem möglicherweise ebensoviel Energie verbraucht wird, wie die Verbrennung ergibt. Diese Bilanz wird noch negativer, wenn eine vorherige Aufbereitung unter Energieverbrauch notwendig ist. Günstigere Bedingungen ergibt da die Verwertung tierischer und menschlicher Abprodukte, z. B. bei unmittelbarer Verbindung von Kläranlagen mit Bioreaktoren.

Als wichtigste Quelle von Biomasse für die energetische Nutzung wird heute allgemein Holz angesehen. Die Wälder bedecken etwa 38 % des Festlandssockels unseres Planeten und enthalten zur Zeit schätzungsweise 3 bis  $4 \cdot 10^{11}$  m<sup>3</sup> Holz, was 92 % der Biomasse ausmacht. Der jährliche Zuwachs liegt bei  $10^{10}$  t, wovon nur 20 % genutzt werden! Diese riesigen Holzvorräte sind allerdings territorial recht ungleichmäßig verteilt und können aus ökologischen Gründen nicht extensiv ausgebeutet werden. Allein aber die Nutzung anfallender Holzabfälle birgt unvermutete Reserven. In den USA würden sie beispielsweise ausreichen, um 95 % aller aus Erdöl, Erdgas und Kohle produzierten Polymere herzustellen. In der DDR liegt der Kohlenstoffwert aller nicht genutzten Holzabfälle über dem des in der Chemieindustrie verarbeiteten Erdöls.

Die Nutzung aber scheitert heute in erster Linie am Problem des Sammelns und Einbringens. Diese Probleme sind vor allem durch eine effektivere Bewirtschaftung und intensivere Holznutzung zu lösen, wobei das Ziel darin besteht, alles, was über dem Erdboden steht, zu nutzen, bis hin zu Nadeln und Laub. In der UdSSR laufen gerade hierzu Experimentalanlagen. In den USA bestehen staatliche Forschungsprogramme zur Züchtung produktiverer Baumarten. Gleichzeitig sollen die Erträge der Waldflächen durch dichteres Bepflanzen und besseres Bewirtschaften verdoppelt werden. Ähnliche Bestrebungen und Vorhaben sind in zahlreichen anderen Ländern zu verzeichnen.

Ein weiteres Betätigungsfeld für die Forschung ist die Erschließung heute nicht genutzter Pflanzen. Die Bemühungen vor allem der USA, auch Getreide energetisch zu verwerten, seien hier nur am Rande vermerkt. Sie erscheinen stark zweifelhaft, solange auf der Erde noch Hunger herrscht und alljährlich in zahlreichen Ländern Menschen den Hungertod sterben. Es gibt durchaus eine Vielzahl reellerer Vorhaben. In Schweden z. B., wo rund 100 000 ha Schilffläche vorhanden sind, wird schon seit vielen Jahren Schilfpulver als Brennstoff verwendet. 10 t sind einem Heizwert von 50 000 kWh äquivalent. In Kalifornien laufen Untersuchungen zur Nutzung einer bestimmten Wolfsmilchart für die Benzinherstellung. Bei Bepflanzung ungenutzter Trockengebiete der USA könnte pro Hektar ein Äquivalent von 4 000 l Öl erreicht werden. In tropischen Süßwassergebieten wuchert eine Wasserhyazinthe, die außerordentlich schnell wächst und mit viel Aufwand bekämpft werden muß. Durch mikrobiellen Abbau wäre es möglich, wie Versuche ergaben, aus 1 kg Trockenmasse der Pflanze nahezu 400 l Biogas zu gewinnen. In diese Bemühungen einzuordnen sind auch die Versuche, beispielsweise in Japan, in Küstenregionen Tang- und Algenfarmen zur Biogaserzeugung anzulegen, wobei die Algen selbst auch Dünge- und Futtermittel abgeben können. 8 km vor der kalifornischen Küste arbeitet in den USA schon seit Jahren eine 1 000 m<sup>2</sup> große Farm, in der die als Kelp bezeichneten Braunalgen gezüchtet werden. Diese Algen wachsen pro Tag bis zu 60 cm, erreichen 50 bis 70 m Länge und Erträge von 100 t pro ha. Die Algen werden auf einer künstlichen, netzartigen Unterlage in 20 m Tiefe gehalten und durch Meerwasser aus 300 bis 500 m Tiefe mit Nährstoffen versorgt. Sie werden jährlich vier- bis sechsmal mit Spezialschiffen geerntet, zerkleinert und mit Mikroben fermentiert. Pro Hektar Algenkultur rechnet man mit 7 000 m<sup>3</sup> Biogas. Für die nächsten Jahre sind 200 bis 400 ha große Plantagen geplant. Ähnliche Projekte bestehen in Japan, das auf diese Weise im Jahre 1990 220 000 t, im Jahre 2000 sogar 4 Mio t Biogas gewinnen will.

Verbleibt schließlich das Reservoir der Abfallprodukte, deren Erschließung einen nicht weniger breiten

Spielraum läßt. Hier ist vor allem die Vergrößerung tierischer Abprodukte (Mist, Gülle) zu nennen, aus der Großteile des Energiebedarfs landwirtschaftlicher Betriebe gedeckt werden könnten. Das Vergären findet ohne Sauerstoff in luftdicht abgeschlossenen Behältern bei Temperaturen von 30 bis 35 °C statt. Das bedeutet, daß die Gärtanks beheizt werden müssen. Das Gärgut wird dabei ständig bewegt. Als Abfall entsteht Gärschlamm, der sehr stickstoff- und phosphorhaltig ist und einen hochwertigen Dünger abgibt. Der Einsatz solcher Anlagen ist vor allem dort interessant und lohnend, wo die Tierproduktion großindustriell betrieben wird. Er gewinnt mit zunehmender Industrialisierung der Landwirtschaft wachsende Bedeutung. Ein Rind liefert für den Vergärungsprozeß so viel Biomasse, daß pro Tag etwa 1,5 m<sup>3</sup> Biogas erzeugt werden können. Auf den Philippinen arbeitet schon seit geraumer Zeit ein Schweinemastkombinat, dessen Bioenergieanlage täglich 1 300 m<sup>3</sup> Gas liefert und mit dem Stallung von 15 000 Schweinen beschickt wird. Gegenwärtig wird auch auf diesem Gebiet in zahlreichen Ländern an verbesserten Technologien gearbeitet, zu denen z. B. die Züchtung von Bakterien gehört, die den Gärprozeß beschleunigen. In der DDR laufen Untersuchungen zur Biogaserzeugung im Zusammenhang mit der Großviehhaltung; entsprechende Testanlagen sind in Betrieb.

Biologisches Abfallprodukt ist auch das Stroh, das ebenfalls vergärt werden könnte; ökonomischer ist aber, es zu verbrennen. Die Menge des heute ungenutzten Strohes in den Mais- und Getreideanbaugebieten der Erde wird auf  $1,7 \cdot 10^9$  t geschätzt, was einem Äquivalent von 4,0 bis 4,5 Mio t Heizöl entspricht. In der BRD z. B. fallen jährlich 5 Mio t Überschußstroh an, die 1,3 Mio t Heizöl äquivalent sind. Sie sollen in Zukunft zusammen mit 14 Mio t Abfallholz verbrannt werden. Dazu ist die Entwicklung entsprechender Ofentypen und Brennverfahren erforderlich, deren Technik heute noch nicht ausgereift ist. Die Zielstellungen bei all den Arbeiten zur Erschließung von Biomasse für die industrielle Verwertung sind sehr unterschiedlich und reichen von der Zuckergewinnung über die Gewinnung von Alkohol und Äthanol bis

hin zu der von Biogas. Unter den energetischen Projekten – und das deuten die aufgeführten Beispiele an – nimmt die Biogasgewinnung zweifellos eine Vorrangstellung ein.

Biogas besteht aus rund 65 % Methan, 30 % Kohlendioxid, 2 % Stickstoff, 2 % Wasserstoff und geringen Anteilen Schwefelwasserstoff. Es entspricht energetisch etwa dem Erdgas und stellt kein Endprodukt im Rahmen der »energetischen Kette« dar wie die Elektroenergie am Ausgang der Solarzelle, sondern eine Zwischenstation, die energetisch wie Erdgas weiterverwertet werden kann. Im Vergleich zu Kohle und Erdöl weist Biogas als Energieträger allerdings zahlreiche Nachteile auf, die erhebliche technische und agronomische Probleme bedingen. Expertenschätzungen zufolge wird deshalb Biomasse weltweit niemals mehr als 5 % des Energiebedarfs decken können. Für die Mehrzahl der verfügbaren und nutzbaren Ausgangsstoffe sind bisher keine ausgereiften Technologien vorhanden, so daß auch hier noch eine Fülle an Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten ist. Dennoch werden wir ein ständig wachsendes Potential zu erwarten haben, sowohl in Entwicklungs- als auch in Industrieländern, in letzteren vor allem im Rahmen struktureller Umgestaltungen in der Landwirtschaft (größere Wirtschaftseinheiten). Besonders günstige Einsatzbedingungen ergeben sich dort, wo Koppelanlagen errichtet werden können, z. B. von Kläranlagen und Biogeneratoren oder aber industriemäßig arbeitenden Tierzuchtbetrieben. Dort muß der Abfall ohnehin beseitigt und vernichtet werden, und für den Einsatz von Biogasgeneratoren ist nicht nur die ökonomische Konkurrenzfähigkeit mit anderen Energieträgern entscheidend, sondern es werden auch die entstehenden Kosten für die Abfallbeseitigung und -vernichtung einbezogen.

---

# Wasserkraftwerk im Grönlandeis?

---

Auch im Bereich der unbelebten Natur unseres Erdballs schlummern gewaltige, noch ungenutzte Energieressourcen.

Vielleicht hatten die beiden Schweizer C. F. Kollbrunner und H. Stauber gerade die oft verheerenden Auswirkungen der als Folge der Schneeschmelze in den Alpen und anderen Hochgebirgsregionen niedergehenden Wassermassen vor Augen, als ihnen die Idee kam, Gletscherschmelzwasser zur Energiegewinnung auszunutzen. Freilich sind hierfür potentielle Voraussetzungen nur in Grönland und der Antarktis gegeben, wo riesige und mächtige Inlandeismassive mit entsprechender Höhenlage über der Meeresoberfläche vorhanden sind. Solche »Gletscherkraftwerke« sind nichts anderes als Wasserkraftwerke, die das Schmelzwasser der Gletscher ausnutzen. Ihr Betrieb wäre im wesentlichen auf die Sommermonate beschränkt bzw. auf die Nutzung gestauten Wassers im Winter. Das allerdings kann schon am Einfrieren scheitern. Die Errichtung der technischen Anlagen, Staubecken und Kanäle wäre selbst in den geeigneten Territorien auf wenige Gebiete beschränkt, in Grönland z. B. auf den südlichsten Teil – südlich des nördlichen Polarkreises –, da sich nur an den Randgebieten des Eispanzers Schmelzwasser bildet. Aus der hier für die energetische Nutzung maximal verfügbaren Höhe von etwa 900 m wurde ein technisch nutzbares Potential von  $10^5$  GWh ermittelt, für die Antarktis liegt es wenig darunter.

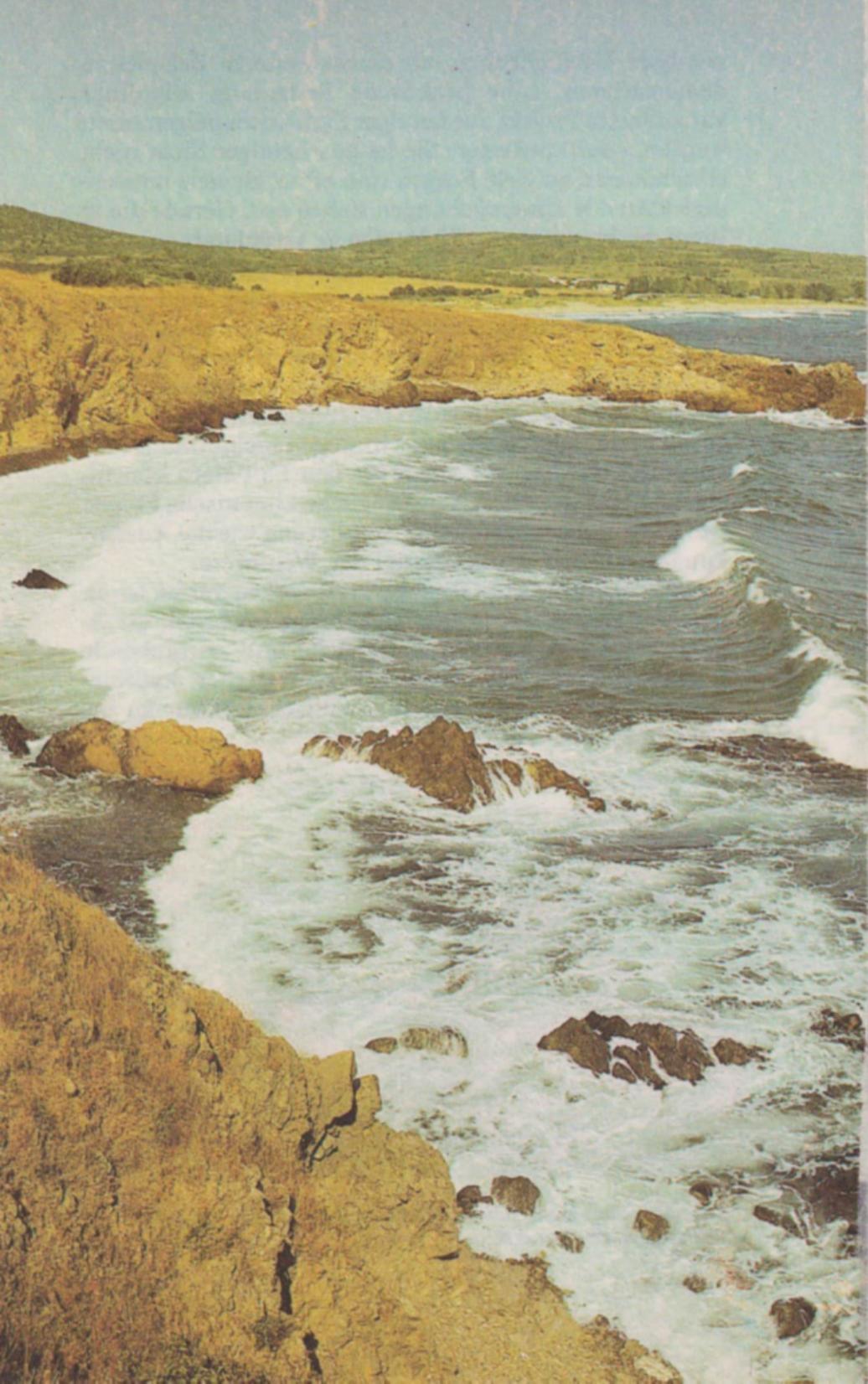
Wir haben das Projekt des Gletscherkraftwerkes hier der Vollständigkeit halber erwähnt, um die Vielfalt und Breite der Ideen und Vorschläge, aber auch prinzipiell

nutzbare Möglichkeiten mit einem weiteren Beispiel zu demonstrieren. Eine praktische Bedeutung allerdings kann diesem Projekt aus heutiger Sicht nicht beigemessen werden, oder konkreter: Sie ist aus heutiger Sicht nicht einschätzbar, zu viele Fragen sind offen, zu viele notwendige klärende Untersuchungen stehen aus. Gerade die in Betracht kommenden Südregionen Grönlands sind zu wenig erforscht. So sind keine Angaben zur tatsächlichen Schmelzwassermenge, zu ihrer Verteilung und ihren Fließwegen bekannt. Auch die für die Errichtung der notwendigen technischen Anlagen erforderlichen Daten zur Eisbewegung, zu Struktur, Aufbau und Art des Festlandes sind nicht bekannt. Und schließlich kann der Fragenkomplex zu den Umweltauswirkungen nicht fundiert beantwortet werden, vor allem für den Fall eines künstlichen Abtaus der Gletscher. Mögliche klimatische Folgen bedürfen ebenso gründlicher Sondierung wie die Auswirkungen auf den Wasserspiegel der Weltmeere.

Alles in allem: Aus Gletscherkraftwerken dürfen wir in absehbarer Zeit keine Energiebeiträge erwarten, ob jemals, wird erst durch umfangreiche und zeitraubende Untersuchungen glaziologischer, geologischer, hydrologischer und geophysikalisch-klimatischer Natur zu beantworten sein.



*Schema einer Gletscher-Kraftwerksanlage nach Vorschlag des Schweizer Dr. Stauber*



---

# Energie aus den Weltmeeren

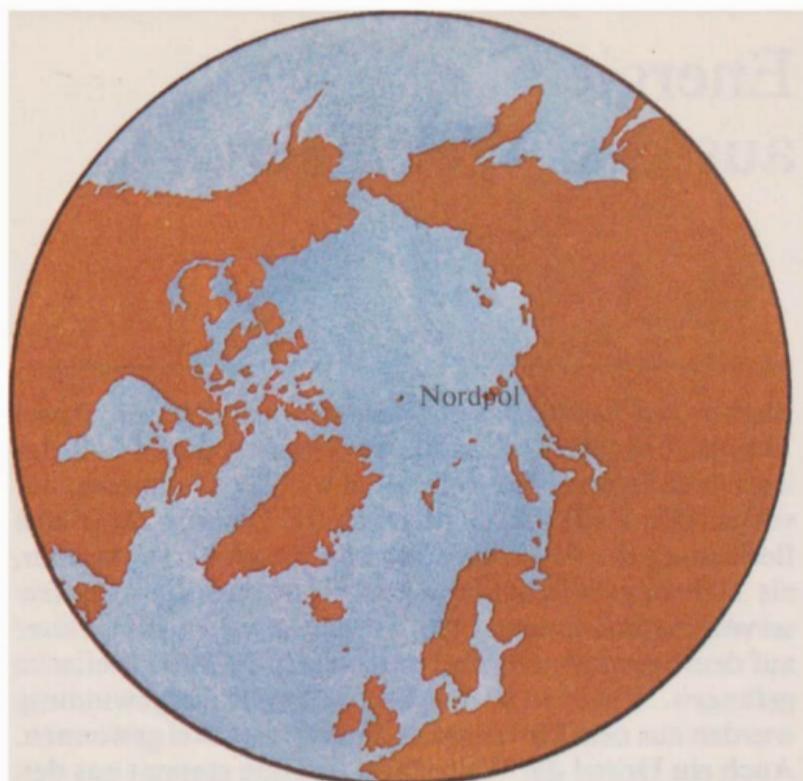
---

Bleiben wir beim nassen Element, dem Wasser. Rund 70 % der Erdoberfläche sind mit Wasser bedeckt. 94 % der irdischen Hydrosphäre entfallen auf die Weltmeere, davon entfällt die Hälfte auf den Pazifik. Die wirtschaftliche Bedeutung der Weltmeere hat ständig als Verkehrsraum, als Nahrungslieferant sowie als Roh- und Brennstoffreservoir zugenommen. 1980 wurden etwa 3 Mio t Güter auf dem Seewege befördert und nahezu 70 Mio t Seefische gefangen. Etwa 30 % der weltweiten Rohölgewinnung wurden aus dem küstennahen Festlandssockel gewonnen. Auch ein Drittel der Weltsalzproduktion stammt aus den Weltmeeren, bei Magnesium sind es 61 % und bei Brom 70 % der Weltproduktion.

Trotz dieser imponierenden Zahlenbeispiele müßten, wie Wissenschaftler der UdSSR auf einer Konferenz zur Erschließung der Weltmeere äußerten, die riesigen Flächen auf den Atlanten eher weiß statt blau erscheinen, so wenig erschlossen und genutzt sind heute die Ozeane. Doch ist die breit angelegte Nutzung der Meeresressourcen nicht aufzuhalten. Ökonomische, technische, wissenschaftliche und ökologische Probleme sind noch zu lösen, aber auch politische und juristische.

Energetisch sind die Weltmeere allerdings nicht nur wegen der beachtlichen Erdölvorkommen interessant. Die Wassermassen selbst beinhalten vielmehr ein riesiges Energiepotential. Wie Wind und Sonne sind diese Meeresenergien umweltfreundlich und regenerativ. Von besonderem Vorteil ist die Tatsache, daß hier Energie in ver-

*Das Meer – ein vielseitiges Energiereservoir*

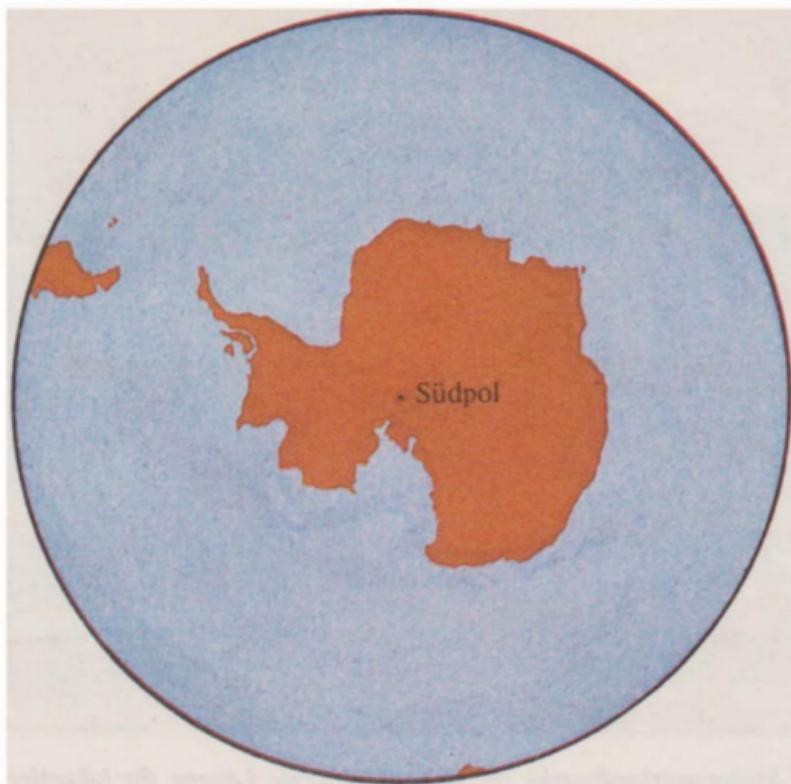


*Rund 70% der Erdoberfläche sind mit Wasser bedeckt.*

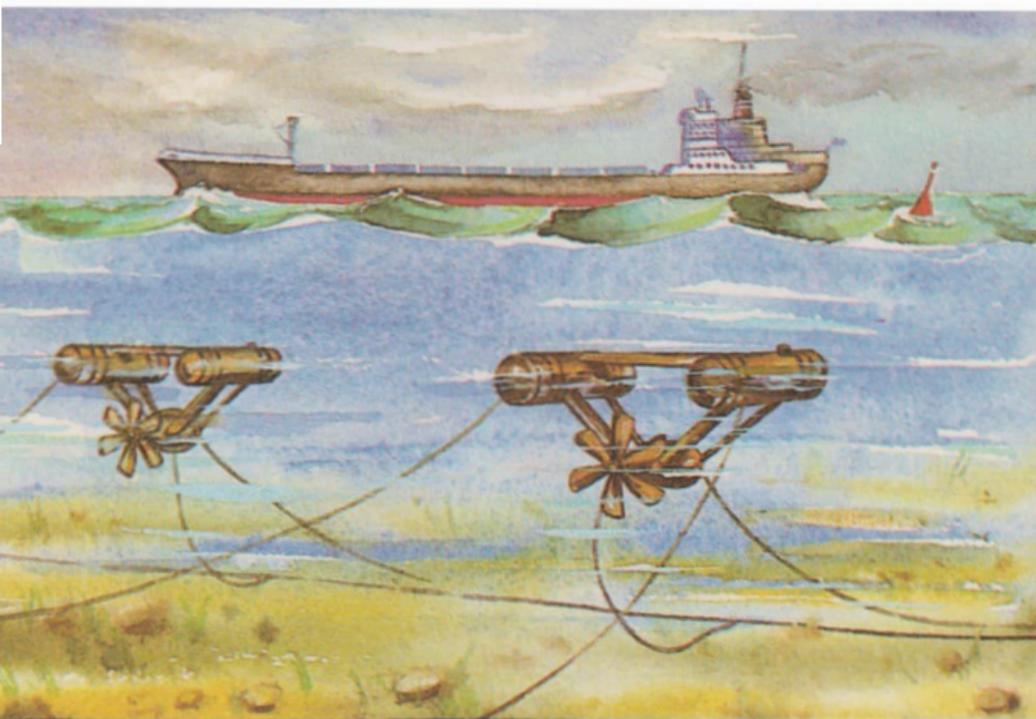
schiedenen Formen vorhanden ist und für die Nutzung den jeweiligen Bedingungen am besten entsprechende, variable technische Lösungen angewandt werden können. Im einzelnen sind folgende Energiepotentiale nutzbar:

- die Energie der Gezeiten,
- die Wellenenergie,
- die Meereswärme, d. h. die vertikalen Temperaturgradienten,
- die Meeresströmungen.

Von diesen vier Möglichkeiten sind die drei erstgenannten in der Lage, Beiträge zur Lösung von Energieproblemen zu leisten. Lediglich von den Meeresströmungen darf zunächst kein wirtschaftlicher Beitrag erwartet werden ohne eventuell folgenschwere ökologische Auswirkungen.



Wie der Wind sind die Meeresströmungen eine sekundäre Form der Sonnenenergie, da sie als Folge der regional unterschiedlich einfallenden Sonnenstrahlung entstehen. Eine energetische Nutzung wäre durch Wasserturbinen möglich, die durch die Strömung in Gang gesetzt und betrieben werden. Der Energieentzug führt jedoch zu einer Verzögerung der Strömung, bei maximal 59 % Energieentzug auf ein Drittel. Die Folge davon wäre eine Verbreiterung der Strömung. In welchem Umfang das ohne wesentliche ökologische Auswirkungen zugelassen werden kann, ist heute nicht eindeutig zu beantworten. Mit Sicherheit aber liegt der zulässige Energieentzug weit unter 50 %, so daß er undiskutabel niedrige Werte annimmt. Für den Golfstrom mit über 2 m/s Strömungsgeschwindigkeit führen Abschätzungen für das Kerngebiet bei 20 % Energieentzug zu einer erzielbaren elektrischen Lei-



*Strömungskraftwerke im Atlantik – keine Lösung für lukrative Energiebeiträge*

stung in der Größenordnung von nur 2 GW. Dieses Ergebnis würde den hohen Aufwand bei weitem nicht rentieren.

## Kraftwerksgigant in der Penschina-Bucht

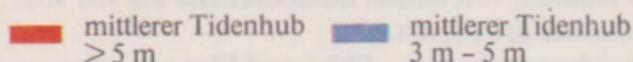
Günstigere Aussichten für Energiegewinnung bieten die Gezeiten. Bereits 321 v. u. Z. erkannte Pytheas die Anziehungskraft des Mondes als Ursache des ständig wiederkehrenden Wechsels von Ebbe und Flut. Heute wissen wir, daß außer dem Mond auch die Sonne mit dafür verantwortlich zeichnet, wobei ihr Einfluß aber nur etwa die Hälfte des des Mondes ausmacht.

Vorläufer moderner Gezeitenkraftwerke soll es in Form sogenannter Flutmühlen schon im 11. Jahrhundert in Ve-

nedig gegeben haben. Der erste nachweisbare Entwurf allerdings stammt aus dem Jahre 1438 von Jacopo Mariano. Er schlug vor, bei Flut Wasser in einen Teich laufen zu lassen, den Zufluß nach der Flut abzuschließen und das Wasser bei Ebbe in das Meer zurückfließen zu lassen. Hierbei sollte es eine Mühle betreiben. Für solche Flutmühlen gab es in den folgenden Jahrhunderten eine Vielzahl von Vorschlägen. 1637 errichteten Holländer bei Brooklyn (USA) gezeitengetriebene Mühlen, bei denen sich die Tore der Staubecken mit eintretender Ebbe automatisch schlossen. 1713 schlug der Zimmermann Perse erstmals Flutmühlen vor, die sowohl den Ebbe- als auch den Flutstrom ausnutzen sollten. In diesem Jahrhundert entstanden derartige Anlagen an zahlreichen Küsten der Welt, so an der französischen Küste in der Bretagne oder an Kanadas Küsten, von denen noch manche bis vor wenigen Jahrzehnten arbeiteten.

Der Wunschtraum aber, aus Ebbe und Flut auch Strom zu erzeugen, wurde erst in unserem Jahrhundert Realität. Die ersten Projekte für Gezeitenkraftwerke zur Erzeugung von elektrischer Energie entstanden in den dreißiger Jahren in Kanada, den USA und Frankreich. Ihr Bau aber wurde durchweg aufgegeben, so 1935 der des amerikanischen Kraftwerkes »Quoddy«, vor allem wegen der hohen Gesteungskosten. Erst 1966 wurde das erste Gezeitenkraftwerk auf unserem Erdball errichtet, an der Mündung der Rance in Frankreich, wo heute 38 Turbinen 240 MW elektrischer Leistung liefern. Bau und Betrieb dieses Kraftwerkes erbrachten erstmals den Beweis für die praktische Nutzbarkeit der Gezeiten auch zur Elektroenergiegewinnung. Eine Vielzahl technischer, technologischer und materialtechnischer Probleme konnte geklärt werden oder wurde für experimentelle Untersuchungen erschlossen. Aber auch die Nachteile wurden schnell offenkundig: Die Gesteungskosten lagen beim Zweieinhalbfachen derjenigen eines Wasserkraftwerkes vergleichbarer Leistung, weil konventionelle Kraftwerkstechnologien angewandt wurden und sie sich als ökonomisch zu aufwendig erwiesen.

Das zweite Gezeitenkraftwerk entstand in der UdSSR und speist seit 1968 Strom in das Verbundnetz auf der



*Regionen mit für Gezeitenkraftwerke ausreichendem Tidenhub*

**Halbinsel Kola.** Bei seiner Errichtung nutzten die sowjetischen Ingenieure die französischen Erfahrungen und kamen zu einer neuen Lösung des Bauverfahrens. Um die Errichtung kostspieliger Hilfsanlagen zu vermeiden, wurde das Kraftwerk in Murmansk vorgefertigt. Die Elemente gelangten als Flöße in die Kisslaja-Bucht, wo sie auf ein vorgefertigtes Fundament unter Wasser montiert wurden. Mit dieser kostengünstigeren Technologie konnten die Hoffnungen auf künftige Gezeitenkraftwerke wieder genährt werden. Inzwischen existieren zahlreiche Projekte bis in den Bereich von 10000 MW, die wesentliche Beiträge der Gezeitenenergie zur Weltenergieversorgung leisten sollen.

Die Einschätzungen über das weltweite Potential der Gezeiten schwanken zwischen  $3 \cdot 10^6$  und  $40 \cdot 10^6$  MW. Eine Nutzung ist nur in Küstennähe möglich, da lediglich hier die Voraussetzungen für die Errichtung der technischen und baulichen Anlagen bestehen. Zum anderen erreicht der sogenannte Tidenhub, wie der Unterschied zwischen Hoch- und Niedrigwasser genannt wird, nur hier

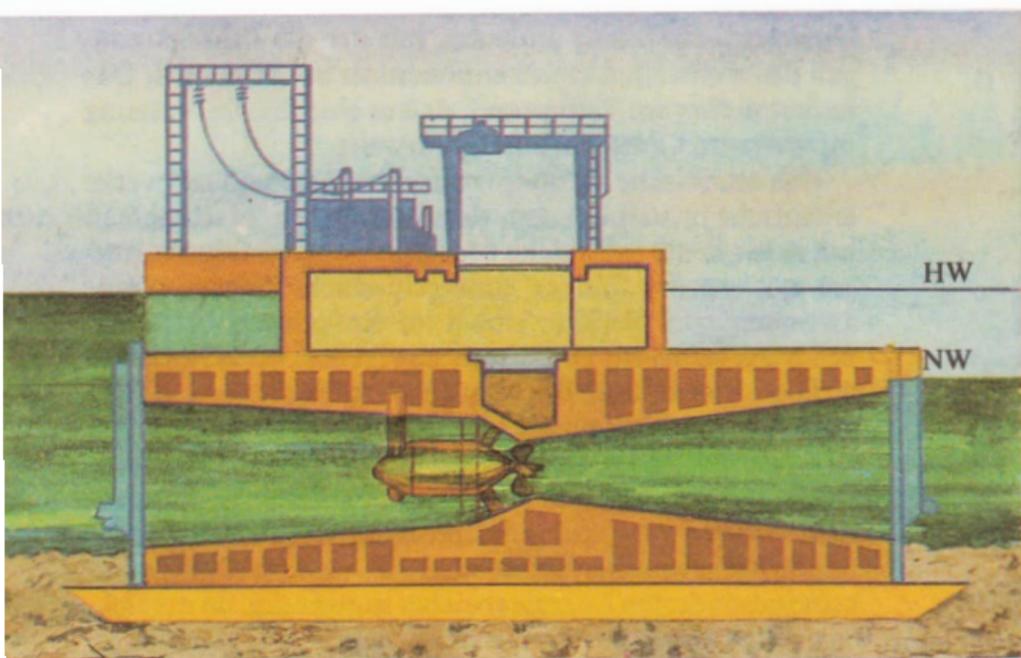
nutzbare Größen. Auf dem offenen Meer liegt er bei 1 m, in Küstenregionen jedoch kann er durch Resonanzeffekte, Buchten und Fjorde und ihre Trichterwirkung Werte bis zu 20 m und darüber erreichen. Mindestwerte für Gezeitenkraftwerke liegen bei 3 m, für eine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit der gewonnenen Energie jedoch bei mindestens 5 bis 6 m. Die höchsten Tidenhübe treten in der Fundy-Bay in Nordamerika auf (bis zu 21 m), an der französischen Atlantikküste werden bis zu 13 m erreicht, am Bristolkanal bis zu 14 m, in der Penhina-Bucht 14 m oder in der Mezenser Bucht am Weißen Meer 9 m – um nur einige Werte zu nennen.

Die hydrodynamische Leistung der Gezeiten ist dem Quadrat des Tidenhubes proportional. Von dem genannten weltweit verfügbaren Gezeitenpotential entfallen auf die zur Nutzung geeigneten Küstenregionen etwa 30 %, davon wiederum 20 % auf Gebiete, in denen eine Errichtung der Kraftwerke aus territorial-geographischen Gründen auch tatsächlich möglich ist. Das führt zu einer Größenordnung eines zur Nutzung effektiv verfügbaren Potentials von etwa 200 GW. Vergleicht man heutige Projekte und Vorhaben, so ist deren angestrebte Kapazität summarisch bereits etwa doppelt so hoch, was die große Unsicherheitsspanne andeutet, mit der die Einschätzungen des weltweiten Gezeitenpotentials behaftet sind. Das ändert nichts am Tatbestand, daß es eine für die Nutzung interessante Größenordnung aufweist.

Das technische Grundprinzip der Gezeitenkraftwerke entspricht prinzipiell dem der Flutmühlen. Naturgemäß hat es bis heute zahlreiche Modifikationen erfahren. Ausgenutzt werden immer unterschiedliche Wasserstände zwischen zwei Becken, wobei im einfachsten Fall eines das Meer selbst ist. Die Errichtung ist dort günstig, wo natürliche Fjorde und Buchten für den Beckenbau ausgenutzt werden können. Das Energieangebot eines solchen Kraftwerkes ist im Gezeitenrhythmus diskontinuierlich. Deshalb hat es besonders als Bestandteil von Verbundsystemen Bedeutung. Ein kontinuierlicheres Angebot kann durch Mehrbeckensysteme erreicht werden. Dabei sind keine gesonderten Energiespeicher notwendig, da die Becken selbst Speichersysteme darstellen.

Wie schon angedeutet, sind für die praktische Ausführung zahlreiche Varianten möglich. Im einfachsten Fall wird ein Becken angelegt, das durch die Flutwelle gefüllt wird. Bei Ebbe fließt das Stauwasser in das Meer zurück und treibt Turbinen – Generatorsysteme an; Energieabgabe erfolgt also nur bei Ebbe. Etwa 20 % Gewinn ergeben sich, wenn sowohl Ebbe als auch Flut ausgenutzt werden. Die Turbinen werden hierbei zunächst durch das bei Flut in das Becken strömende Wasser und nachfolgend durch das bei Ebbe in das Meer zurückfließende Wasser betrieben. Die Turbinen arbeiten dabei reversibel, also in beiden Strömungsrichtungen. Werden sie so ausgeführt, daß sie gleichzeitig als Pumpen betrieben werden können, kann eine solche Anlage zeitweise auch noch nach dem Pumpspeicherprinzip arbeiten. Verschiedene Varianten erlauben auch Mehrbeckensysteme, deren Becken hintereinanderliegen und eine bestimmte Höhendifferenz aufweisen. Beispielsweise ist für ein Zweibeckensystem folgendes Arbeitsregime denkbar: Die Flutwelle füllt zu-

*Schematischer Aufbau eines Gezeitenkraftwerkes. HW = Hochwasser, NW = Niedrigwasser*

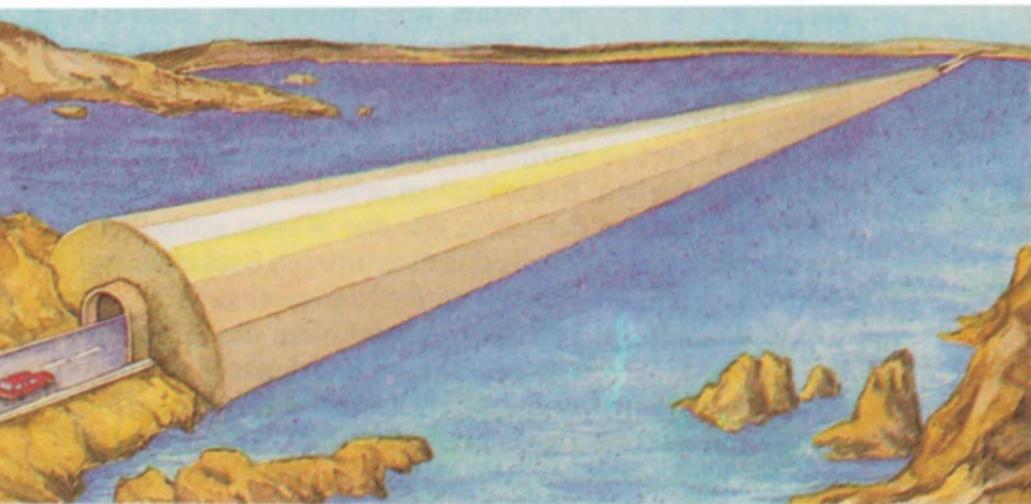


nächst beide Becken, wobei über reversible Turbinen Strom erzeugt wird. Bei Ebbe entleert sich zunächst das untere Becken in das Meer, nachfolgend das obere in das untere. Nunmehr kann das Wasser aus dem unteren in das obere Becken zurückgepumpt werden und erneut nach unten fließen. Beide Becken arbeiten als Pumpspeicherwerk während der Ebbe, ehe das Wasser schließlich vor der nächsten Flutwelle aus dem unteren Becken in das Meer zurückfließt – immer unter Energieabgabe.

Wie schon angedeutet – Hauptproblem der Gezeitenkraftwerke sind die hohen Gesteungskosten. Schwerpunkt der Arbeiten sind deshalb kostensenkende Herstellungs- und Errichtungstechnologien. Probleme beim Betrieb bereiten vor allem die Versandung der Becken sowie die Korrosion der technischen Anlagen durch das Meerwasser. Von Vorteil dagegen sind die niedrigen Unterhaltungskosten. Schädliche Abfallprodukte bringt ihr Betrieb nicht mit sich. Mögliche Umweltauswirkungen, wie Veränderungen des Tidenhubes, Einflüsse auf Meeresströmungen oder auf den Fischbestand und seine Entwicklung, erscheinen aus heutiger Sicht nicht als Hinderungsgründe. Etwaige Beeinflussungen von Schifffahrtslinien sind planungstechnisch lösbar.

An dieser Stelle jedoch einige Worte zu einem Problem, das mehr oder weniger alle Energiequellen betrifft, die wir in diesem Bändchen vorstellen: Die ökologischen Auswirkungen der großtechnischen Nutzung dieser Energiequellen enden zumeist nicht an den Landesgrenzen des betreibenden Staates, sie sind multinational, betreffen unsere Erde als Ganzes. Ihre Untersuchung und Überwachung sind deshalb ein internationales Problem wissenschaftlich-technischen und vor allem rechtlich-politischen Charakters. Wer, wenn nicht die UNO, muß sich deshalb damit befassen und Gremien schaffen, die sich eben diesen Fragen widmen.

Gezeitenkraftwerke sind heute die realistischste Variante zur Nutzung der Meeresenergie. Ihre größte Bedeutung dürfte in der Eingliederung in Verbundsysteme zu sehen sein, wo sie vor allem dem Spitzenlastausgleich dienen. Für Entwicklungsländer, aber auch autonome Regionen entwickelter Länder, wie Insel- und Halbinselge-



*Gigant unter den Gezeitenkraftwerksprojekten – eine 100000-MW-Anlage in der Peshina-Bucht (UdSSR)*

bierte, können sie regionale, autarke Bedeutung erlangen. Heute existieren etwa 25 Projekte unterschiedlichsten Entwicklungsstandes für Gezeitenkraftwerke.

Ein gigantisches Projekt ist das eines 100000-MW-Kraftwerkes in der Peshina-Bucht des Ochotskischen Meeres in der UdSSR, an der »Nahtstelle« zwischen dem Festland und der Halbinsel Kamtschatka. Diese Bucht ist 75 km breit und von felsigen Ufern eingeschlossen, der Tidenhub beträgt hier 14 m. Das Kraftwerksprojekt spielt eine entscheidende Rolle in Zukunftsplanungen der wirtschaftlichen Entwicklung der fernöstlichen Regionen der UdSSR. Das Kraftwerk soll in der Mitte der Bucht errichtet werden, wo es durch einen Damm, durch den ein Tunnel führt und in dem die Blöcke angebracht werden, mit den Ufern verbunden wird. Für die Errichtung des Dammes ist ein Aufwölben des Meeresbodens durch dezentralisierte Sprengungen vorgesehen. Das Kraftwerk selbst besteht aus 320 Turbinenblöcken, die, zentral gefertigt, in die Bucht eingeschwommen und auf dem vorgefertigten Unterwasserfundament befestigt werden.

Ein interessantes Projekt besteht auch für die Mesen-Bucht am Weißen Meer, die ein 86 km langer, ähnlicher Tunnel für ein 10000-MW-Kraftwerk abtrennen soll.

Das größte Projekt, das sich derzeit in der Diskussion befindet, ist das einer 270 000-MW-Anlage in Kimberleys (Australien) im Indischen Ozean, das möglicherweise eine schon viel zu optimistische Idee darstellt.

## Genutzte Wellenkraft

Nicht zu verwechseln mit den Gezeitenwellen ist die nahezu ständig vorhandene Wellenbewegung der Ozeane. Ihre Entstehung kann an jedem ruhenden Gewässer beobachtet werden, wenn leichter Wind eine Kräuselung der Wasseroberfläche erzeugt. Auch die Wellenbewegung der Weltmeere entsteht durch Einwirkung von Windkräften, wobei die Detailprozesse noch nicht allseitig geklärt sind. Offenbar versetzt der Wind die Wasserteilchen durch seinen Anstoß in eine kreisende Bewegung, die von Teilchen zu Teilchen übertragen wird. Somit verbleibt jedes Teilchen an seinem Ort, während sich die Wellen in Richtung des anregenden Windes fortbewegen. Die Meereswellen sind Transversalwellen; Art, Aufbau und Intensität sind von der Windgeschwindigkeit, der Winddauer, der Wassertiefe, der Streichlänge des Windes über der Wasseroberfläche und der Wellenlauflänge abhängig. Leichter Wind erzeugt auch auf den Ozeanen nur leichte Kräuselung. Bei größeren Windstärken entwickelt sich eine Dünung mit großen Wellenlängen und unter Umständen hohen Geschwindigkeiten. Bei mäßig bewegtem Ozean erreicht die Wellenhöhe 2 bis 4 m. Wellenhöhen von 10 m sind schon maritime Seltenheiten und entstehen dann, wenn langanhaltende, kräftige Winde aus konstanter Richtung auf weite, freie Flächen mit großer Wassertiefe einwirken.

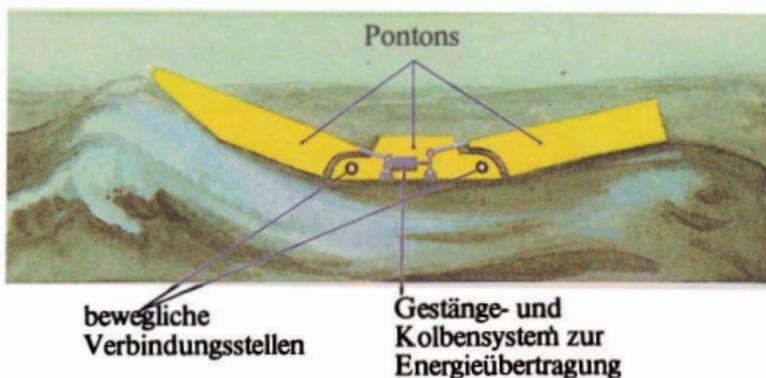
Aus diesen kurzen Darlegungen zur Physik der Meereswellen ist schon eine wichtige Eigenschaft dieser Energiequelle ableitbar: zeitliche und örtliche Diskontinuität mit dem Wetter vergleichbarer Erscheinungsweise und ein dementsprechend diskontinuierliches Energieangebot. Für die künftige Nutzung können wir deshalb eine ähnliche Bewertung vornehmen, wie sie auch für Gezeitenkraftwerke gegeben wurde. Dort, wo entsprechende Voraus-

setzungen bestehen, können Wellenkraftwerke zeitlich schwankende Energiebeiträge liefern und in Verbundsysteme einspeisen. Als autarke Kleinkraftwerke erfordern auch sie Speicher für eine kontinuierliche Versorgung.

Das weltweite Gesamtpotential der Wellenenergie läßt sich kaum abschätzen, da hierfür statistisches Faktenmaterial nicht in hinreichender territorialer und zeitlicher Dichte vorliegt. Für die Nordseeküste der BRD z. B. ergibt sich bei 1,52 m Wellenhöhe und 6,42 m Wellenperiode ein mittleres Leistungspotential von 14,4 kW/m Küstenstreifen und bei 250 km Küstenlänge ein solches von 3,6 GW. Besonders günstige Bedingungen für eine Nutzung bieten sich in Japan. Wissenschaftler errechneten, daß die rund 5 000 km lange Küste prinzipiell die Voraussetzungen bietet, rund die Hälfte der heute im Land benötigten Elektroenergie durch Wellenenergiekonversion zu decken. Norwegens rund 2 500 km lange Küste könnte ein Jahrespotential von nahezu 600 TWh ergeben, errichtete man Wellenkraftwerke 20 Meilen vor der Küste, wo sich 23,7 kW/m errechnen lassen. Im Pazifik könnten die größten Wellen etwa 1 MW erzeugen.

Für die Nutzung der Wellenenergie gibt es ebenfalls zahlreiche Varianten. Da besteht zunächst die Möglichkeit, die Meereswellen in gleicher Weise zu nutzen wie die Flutwelle der Gezeiten, also zur Füllung von Staubecken. Allerdings ist die gewöhnliche Wellenhöhe hierfür nicht ausreichend. Norwegische Techniker schlugen vor, die Wellenenergie deshalb zu konzentrieren. Vor der Küste sollen auf mehrere hundert Meter Länge in konstantem Abstand Betonblocks im Meer verankert werden. Wie optische Beugungsgitter für Lichtwellen wirken diese Blocks für Wasserwellen: Es kommt zu Interferenzen, bei denen sich Wellen auslöschen, andere verstärken. Letztere erreichen Amplituden bis zu 30 m Höhe und können über einen Trichter in das Staubecken einlaufen.

Von dem Erfinder des Luftkissenfahrzeugs, dem Engländer Sir Cockerell, stammt die Idee der Wellenenergieflöße, auch Cockerellflöße genannt. Es sind große, gekoppelte Pontons, die durch die Wellenberge und -täler rhythmisch bewegt werden. Diese Bewegungen können an den Kopplungsstellen über Gestänge und Getriebe

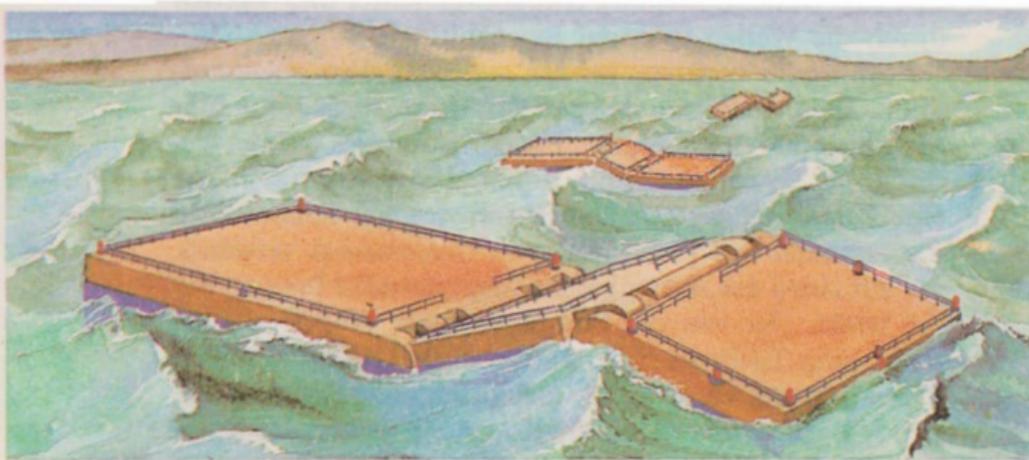


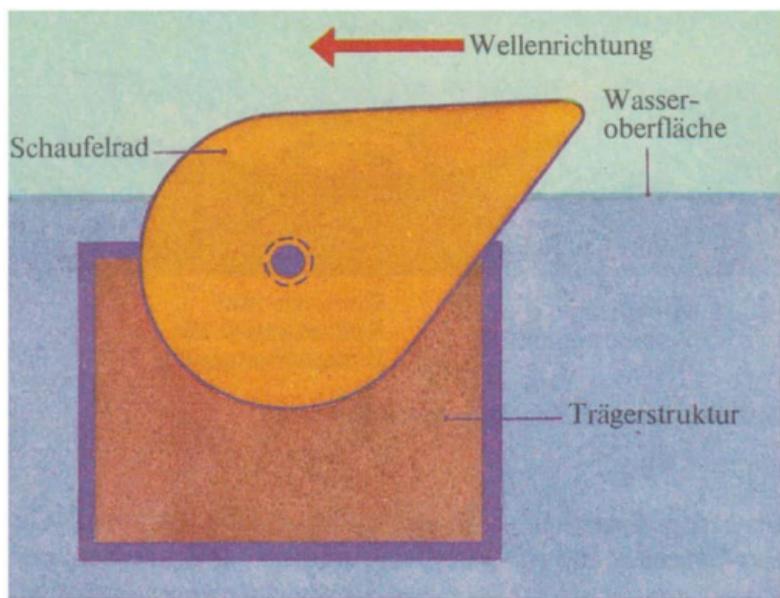
*Schema eines Wellenfloßes nach Cockerell*

übertragen werden, z. B. auf hydraulische Kolben-Zylinder-Systeme, die wie Pumpen einen Motor antreiben, und dieser wiederum treibt einen Wechselstromgenerator an. Solche Flöße, etwa 15 km vor der englischen Küste verankert und zu einer langen Reihe von mehreren hundert Kilometern verbunden, könnten wesentliche Beiträge zur Energieversorgung Englands leisten – so ist wenigstens die Meinung des Erfinders. Versuchsanlagen mit  $3\text{ m} \times 1,5\text{ m}$  Fläche ergaben bereits in relativ ruhigen Gewässern gute Ergebnisse.

Vorerst aber sind weniger unkonventionell anmutende

*Cockerellsche Wellenflöße vor der Küste*

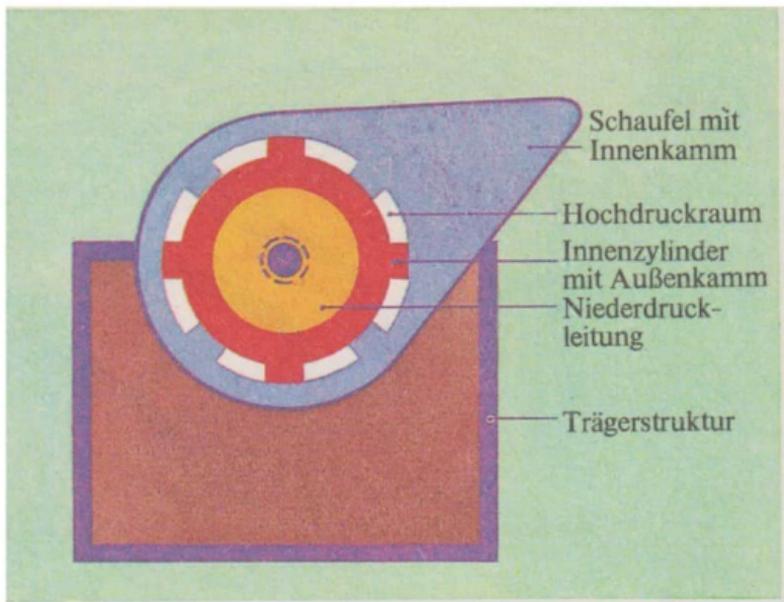




*Schaufelrad zur Umwandlung von Wellenenergie in mechanische Energie*

Lösungen in den Kreis ernsthafter diskutierter Projekte einbezogen, die auf zwei Prinzipien rückführbar sind: auf mechanische Systeme und Druckluftsysteme.

Zu ersteren gehören z. B. Schaufelräder. Das sind asymmetrische, nockenartige Halbtäucher, die die kinetische Energie der Horizontalbewegung der Wellen ausnutzen. In Ausgangsposition sind sie mit ihrem Zapfenansatz der Wellenbewegung entgegengerichtet und werden durch die Wellen in deren Bewegungsrichtung gedreht. Ist die Welle vorüber, kehren sie nach dem »Stehaufmännchenprinzip« in Ausgangsposition zurück. Sie führen also eine Taumel- oder Pendelbewegung mit der Periode der Wellenbewegung durch. Diese kann z. B. auf eine Hochdruckpumpe übertragen werden. Hierzu wird die Schaufel mit Hohlraum und Innenkamm versehen, der auf einen mit Außenkamm ausgestatteten Innenzylinder wirkt. Der von der Pumpe erzeugte Wasserfluß betreibt eine Turbine. Eine weitgehende Gleichmäßigkeit dieses Flusses kann durch gleichrichtende Spezialpumpen erfolgen sowie durch die Kopplung mehrerer solcher



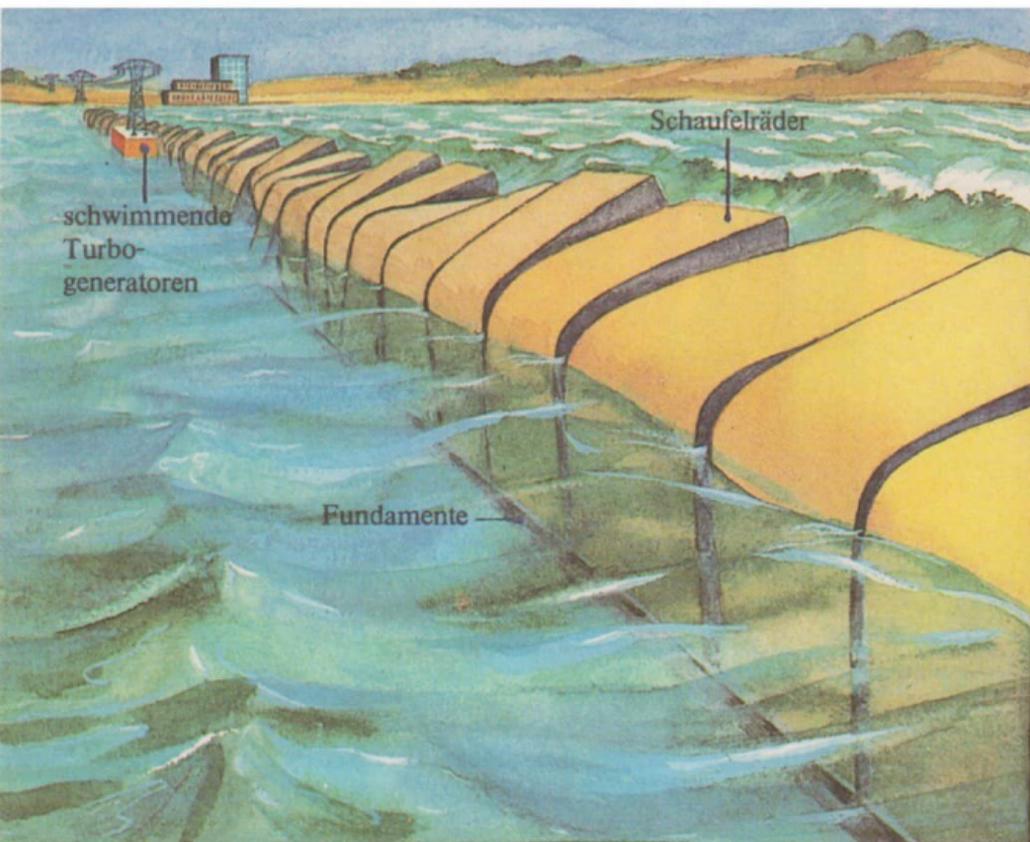
*Schaufelrad mit Hochdruckpumpe*

Schaufelradssysteme. Derartige Einrichtungen sind für Leistungen bis in den Megawattbereich geeignet. Umwandlungswirkungsgrade liegen bei 70%.

Eine andere, rein mechanisch wirkende Version benutzt schwimmfähige, stabilisierte Zylinder, die mit dem Wellengang eine vertikale Pendelbewegung ausführen. Diese wird auf hydraulische Pumpen übertragen, durch die Turbinen betrieben werden.

Pneumatisch arbeitende Systeme schließlich nutzen die unter der Wasseroberfläche entstehenden Druckschwankungen aus, also die potentielle Energie. Die Druckschwankungen arbeiten auf ein Arbeitsmedium in pneumatischen Druckkammern, das die langsamen Druckwechselfolgen des Seeganges auf hochoberflurige Luftturbinen überträgt. Um diese Version allerdings bestehen noch viele offene Probleme. So sind der optimale Einsatzbereich und der Wirkungsgrad noch nicht angebbbar.

Aussagen sowohl zu den Investitions- als auch zu den Betriebskosten der Wellenkraftwerke sind heute generell noch nicht fundiert möglich, da praktische Erfahrungen



*Noch Zukunftsvision: ein Meereswellenkraftwerk*

fehlen, jedoch dürften beide relativ hoch liegen. Umweltbelastungen treten kaum auf, da die Verringerung der Brandungswellen nicht als solche wirkt bzw. ohne Folgen ist. Mögliche Behinderungen für die Schifffahrt müssen im Rahmen von Untersuchungen zur überhaupt für flächenhafte Kraftwerksanlagen nutzbaren Meeresfläche beachtet werden.

Wellenenergiekraftwerke befinden sich als »Minikraftwerke« für Bojen u. ä. schon seit geraumer Zeit im Einsatz, allerdings nur für niedrige Leistungen. In einigen Ländern existieren Versuchsanlagen zum Studium von Grundsatzfragen, die meist jedoch mit künstlichen Aufbauten, also nicht im offenen Meer, arbeiten. Dabei ist zu bemerken, daß es zur Zeit überhaupt nur wenige Länder

gibt, die sich intensiv mit dieser Technik befassen, so Japan und Norwegen, wo günstige Bedingungen für die Nutzung bestehen. So betreiben norwegische Techniker in der Nähe von Oslo seit 1979 eine Versuchsanlage zur Untersuchung der Wellenfokussierung. Sie besteht aus einem 150 m langen Becken, in dem eine Wellenmaschine künstlich Wellen erzeugt. Dreieckige Aluminiumplatten unter der Wasseroberfläche wirken als Beugungsgitter. Die Wellen werden auf einen Punkt am Beckenrand fokussiert, wo sie das Wasser in eine Rinne drücken. Die Untersuchungen sollen zur Entscheidungsfindung für eine Errichtung von Wellenkraftwerken in späteren Jahren beitragen.

Das erste auf dem offenen Meer betriebene experimentelle Wellenkraftwerk errichteten japanische Techniker im Jahre 1978. Es arbeitet nach dem Druckkammerprinzip und besteht aus einer 80 m langen, 12 m breiten und 8 m hohen Mammutboje von 500 t Masse. Dieser Koloß enthält 22 pneumatische Kammern, von denen jeweils zwei eine Turbine mit Generator betreiben. Die elf Turbinensätze liefern 1 250 kW Dauerleistung bei 3 m hohem Wellengang.

Alles in allem: Auf diesem Gebiet verbuchen wir ein frühes Entwicklungsstadium, das heute noch keine fundierten Aussagen zur Nutzbarkeit und perspektivischen Nutzung zuläßt, es sei denn die, daß Wellenkraftwerke in dem genannten Rahmen prinzipiell möglich sind.

## Meereswärmekraftwerke

Möglichkeiten, die Weltmeere energetisch anzuzapfen, bietet schließlich ihr thermischer Energiegehalt, genauer, die Nutzung des vertikalen Temperaturgradienten. Diese Variante folgt theoretisch aus dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, nach dem es möglich ist, zwischen zwei Temperaturniveaus Prozesse ablaufen zu lassen, bei denen ein Teil der thermischen Energie Arbeit leistet.

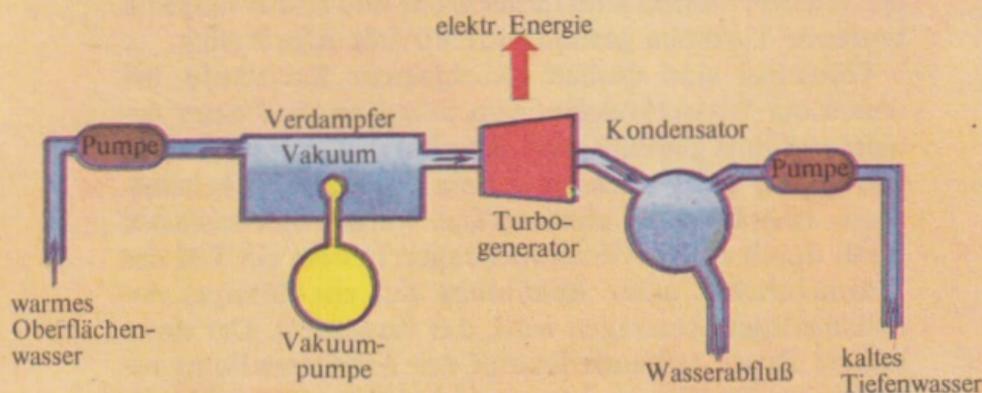
Thermische Wärmeenergie ist ebenfalls gespeicherte Sonnenenergie. Sie ist im Meer nicht gleichmäßig verteilt, sondern vorwiegend in den oberflächennahen Schichten

tropischer, wärmerer Regionen konzentriert. Hierdurch werden – wie schon erwähnt – die großen, warmen Oberflächenströmungen und die kühleren Tiefenströmungen verursacht. Die Sonneneinstrahlung in tropischen Gebieten entspricht im Mittel einem zeitlichen Wärmefluß von etwa  $250 \text{ W/m}^2$ , von denen allerdings vier Fünftel für die Wasserverdunstung verbraucht werden. Etwa  $50 \text{ W/m}^2$  sind theoretisch für eine energetische Nutzung zugänglich. Die aus der Sonneneinstrahlung resultierende Oberflächentemperatur liegt in äquatornahen Gebieten bei etwa  $25$  bis  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ , in  $1000 \text{ m}$  Tiefe aber nur noch bei  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  und teils darunter. Dieses latente Energiereservoir liegt mit etwa  $30$  bis  $40 \cdot 10^{15} \text{ W}$  weltweit um Potenzen höher als der Energiebedarf der Menschheit heute.

Dem Vorteil der Unerschöpflichkeit und Umweltfreundlichkeit stehen als wesentliche Nachteile die relativ niedrige Temperaturdifferenz und die damit geringe Energiedichte gegenüber. Thermodynamische Kreisprozesse ergeben deshalb nur geringe Wirkungsgrade. Obwohl Meereswärmekraftwerke prinzipiell überall im Meer errichtet werden könnten, ist ihr Einsatz auf die Regionen mit den höchsten Temperaturgradienten beschränkt, da nur hier wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit zu erwarten ist. Dort allerdings bestünden günstige Möglichkeiten, die erzeugte Energie zur Produktion von Wasserstoff zu nutzen und diesen als sekundären Energieträger auch nördlicheren Verbrauchern verfügbar zu machen – ein ähnliches Projekt wurde schon bei Solarfarmen erwähnt.

Die Idee eines Meereswärmekraftwerkes wurde 1901 erstmals von d'Arsonval geäußert. Aber erst ein Vierteljahrhundert später unternahm G. Claude, ein französischer Ingenieur, im Mittelmeer erste praktische Versuche, als deren Ergebnis an der kubanischen Küste ein erstes Versuchskraftwerk entstand. Es blieb ein halbes Jahrhundert, bis zum Jahre 1979, das einzige, da sich die Claude'sche Anlage als unwirtschaftlich und technisch zu aufwendig erwies und damit wenig Hoffnung für die Nutzung der Temperaturgradienten des Meerwassers nährte.

Claude verdampfte  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  warmes Wasser im Vakuum



*Schema eines Meereswärmekraftwerkes mit offenem Kreislauf*

und ließ einen Turbogenerator durch den Wasserdampf antreiben. Bei  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  wurde der Dampf durch kaltes Wasser wieder kondensiert und floß ab. Das Kraftwerk erreichte eine elektrische Leistung von  $22\text{ kW}$ . Dem Prinzip nach war es ein sogenannter offener Kreislauf, da das kondensierte Wasser nicht in den Arbeitsprozeß zurückfloß.

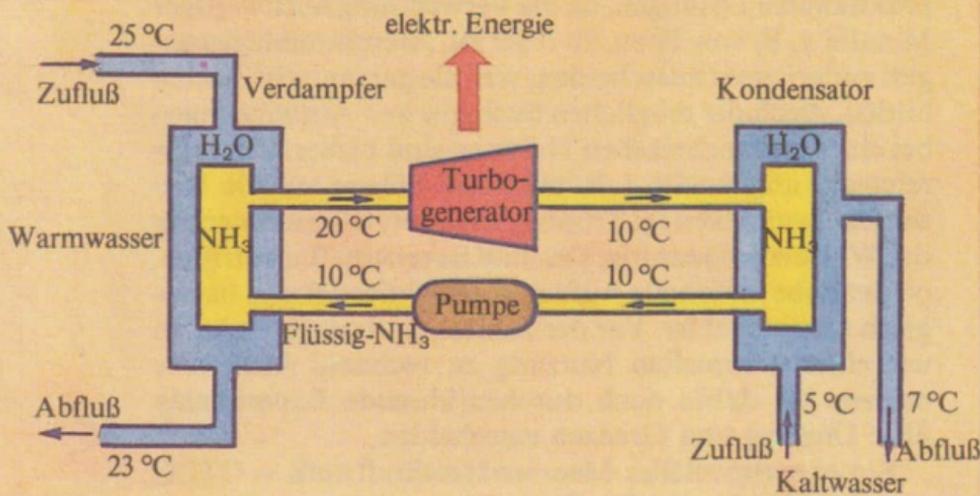
Doch da sind wir schon beim Stichwort Technik: Es gibt zwei prinzipielle Möglichkeiten für die Ausführung von Meereswärmekraftwerken, den offenen und den geschlossenen Kreislauf. Beim offenen Prozeß gelangt das warme Meeresoberflächenwasser zunächst in einen Verdampfer, in dem ein Vakuum herrscht, so daß ein Teil der Flüssigkeit trotz der niedrigen Temperatur verdampft. Die Energie hierzu liefert das warme Meereswasser selbst, das sich dabei abkühlt. Der Dampf betreibt eine Turbine, durch die ihm ein Teil seiner kinetischen Energie entzogen und über einen angeschlossenen Generator in elektrische Energie umgewandelt wird. In einem Kondensator wird der Dampf durch Mischen mit kaltem Wasser kondensiert und fließt ab.

Dem Prinzip haften einige prinzipielle Nachteile an: Um Wasser mit den verfügbaren Temperaturen zu verdampfen, ist ein relativ hohes Vakuum erforderlich. Das Wasser muß außerdem vorher entgast werden. Wegen des bei niedrigen Temperaturen relativ großen Molvolumens

des Wasserdampfes sind ferner große und relativ langsam laufende Turbinen geringer Effektivität erforderlich.

Günstiger sind deshalb geschlossene Kreisläufe, bei denen der Wasserkreislauf von dem Kreislauf eines Arbeitsmediums getrennt wird. Das hat den Vorteil, für das verfügbare Temperaturniveau ein optimales Arbeitsmedium auswählen zu können. Das warme Meereswasser fließt durch einen Wärmeübertrager, in dem ein Teil des Wärmeinhaltes unter Abkühlung auf ein flüssiges Arbeitsmedium übertragen wird, das verdampft. Der unter hohem Druck stehende Dampf des Arbeitsmediums betreibt eine Turbine und erzeugt über einen angeschlossenen Generator Strom. Nach Austritt aus der Turbine gelangt der Dampf in einen Kondensator, wo er mit Tiefenwasser gekühlt und kondensiert wird. Das nun wieder flüssige Arbeitsmedium wird in den Verdampfer zurückgepumpt. Es strömt also kontinuierlich in einem geschlossenen Kreislauf. Energiequell ist das warme Oberflächenwasser. Der thermodynamische Kreislauf wird durch das kühle Tiefenwasser geschlossen. Bei diesem Prozeß können z. B. unkompliziertere, kleinere und auch kostengünstigere Turbinen eingesetzt werden. Einfacher als Kraftwerke mit offenen Prozessen sind Kraftwerke mit geschlossenen Kreisläufen auf schwimmenden Plattformen installierbar, deren Standorte variabel in Verbrauchernähe wählbar sind. Eine Plattform ermöglicht es auch, Warm- und Kaltwasser auf kürzestem und damit energiesparendem Wege zuzuführen. Hingegen erfordern Kraftwerke an Land meist lange Zuleitungen, die Wärmeverluste bedingen. Von Nachteil beim geschlossenen Prozeß ist die dem Kreisprozeß verlustig gehende Wärme bei der Übertragung von Warmwasser auf das Arbeitsmedium. Probleme technologischer Natur ergeben ferner die notwendigen Kondensatoren und Verdampfer, die man zwar in die Tiefe verlegen und damit als Leichtbaukonstruktionen ausführen kann, die jedoch etwa 30 bis 50 % der Gesamtkosten eines solchen Kraftwerkes überhaupt ausmachen. Von der Kostenseite her beeinflussen sie Nutzung und Zukunft von Wärmekraftwerken entscheidend.

Einige generelle Probleme: Der Wirkungsgrad von Meereswärmekraftwerken ist relativ gering und wird



*Schema eines Meereswärmekraftwerkes mit geschlossenem Kreislauf und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) als Arbeitsmedium*

praktisch einen Wert von 3 % nicht wesentlich überschreiten können. Die erzielbaren Leistungswerte liegen bei 0,2 bis 0,8 kW je kg/s Wasserdurchfluß. Nutzt man nur 10 % der Wasserfläche aus, ergibt sich damit ein technisch nutzbares Potential von  $6 \cdot 10^8$  GWh pro Jahr. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen kommen für die Nutzung allerdings nur Gebiete in Betracht, bei denen die erforderliche Temperaturdifferenz bis zu höchstens 10 km vor der Küste erreicht wird. Das ergäbe, so wurde ermittelt, eine maximal mögliche jährliche Energieausbeute aus der Meereswärme von etwa  $3 \cdot 10^6$  GWh. Als optimale Größe solcher Kraftwerke wird heute der Bereich von 100 bis 400 MW eingeschätzt. Die erforderlichen Dimensionen derartiger Anlagen wären allerdings enorm, wie wir an Beispielen noch sehen werden. Ein Problem ist die Korrosion der technischen Ausrüstungen durch Meereswasser und der Mikробenbewuchs, besonders auf den Austauscherflächen. Schon nach zehn bis zwölf Wochen, so zeigten Experimente, erreicht der Mikробenbewuchs unakzeptable Werte und erfordert eine Reinigung der Austauscherflächen, z. B. durch rotierende Bürsten. Dieser Prozeß muß etwa alle vier Wochen wiederholt werden. Für die Beherrschung der Korrosion gibt es bisher noch keine

praktikablen Lösungen, da die Verwendung hochwertiger Metalle, z. B. von Titan, zu teuer ist, Aluminiumlegierungen andererseits ausscheiden, weil sie galvanische Ketten bilden. Auch die möglichen ökologischen Auswirkungen bei einer großtechnischen Nutzung sind bisher nicht ausreichend untersucht, z. B. mögliche Folgen auf die Niederschlagstätigkeit im Tropengürtel durch Verminderung der Wasserverdunstung. Deshalb ist ernsthaft umstritten, ob der hohe materielle Aufwand gerechtfertigt und ökologisch akzeptabel ist. Vor der Jahrtausendwende ist kaum mit einer eventuellen Nutzung zu rechnen. Auch hier müssen bis dahin noch durchzuführende Experimente über Umfang und Grenzen entscheiden.

Ein experimentelles Meereswärmekraftwerk – OTEC genannt (Abkürzung für Ocean Thermal Energy Conversion) – wurde 1979 vor der Westküste der Hawaii-Inseln in Betrieb genommen. Es ist an Bord eines veränderten Marine-Tenders installiert. An seinem Versuchsbetrieb sind mehrere Staaten, Institutionen und Unternehmen beteiligt. Zur Ausrüstung gehören Titan-Wärmeübertrager, 50-kW-Turbogeneratoren, Pumpen und Polyäthylenrohre von 600 m Länge. Hauptziel des Betriebes ist die Untersuchung der technischen Grundlagen und Betriebsbedingungen sowie der Wirtschaftlichkeit. Das Kraftwerk ist Pilotanlage einer projektierten 100-MW-Anlage.

Eine Reihe weiterer Projekte für elektrische Leistungen zwischen 100 und 400 MW ist über die Studienphase nicht hinausgekommen, weil der Kreis der Grundlagenprobleme und offenen Fragen noch zu groß ist. Einige Zahlenangaben zu einem 100-MW-Projekt (elektrische Leistung) sollen die gigantischen Dimensionen solcher Anlagen demonstrieren: 400 000 t Masse, 35 m dicke Kaltwasserrohre mit dem Wasserdurchfluß eines mittleren Flusses, 4 Wärmeübertrager mit 120 000 Titanrohren von je 16 m Länge und 5 cm Durchmesser. Diese Dimensionen übersteigen heutige Vorstellungen von Kraftwerken bedeutend. Bis zum Jahre 2000 dürfen wir deshalb aus dieser Energiequelle keine wesentlichen Energiebeiträge erwarten.

---

# Energie aus Erdwärme

---

Es vergeht fast kein Jahr, da nicht verheerende Naturkatastrophen Tausende von Menschenleben und Millionen von Sachwerten vernichten. Die meisten dieser Naturkatastrophen sind die unmittelbare Folge der mehr oder weniger spontanen Entfaltung innerer Kräfte, Spannungen und Energien unseres Erdkörpers in Form von Erdbeben oder Vulkanausbrüchen. Sind diese Naturgewalten – heute noch gefürchtete Schrecken – nicht im Dienst der Menschheit nutzbar?

Tatsächlich birgt der Erdkörper ein hohes Energiepotential. Dieses Potential ist vorwiegend thermischer Natur. Der latente und sich regenerierende Temperaturgradient des Erdkörpers entstand und entsteht durch Isotopenzerfall. Das vorhandene und nutzbare Potential an geothermischer Energie in den oberflächennahen Schichten bis in etwa 10 km Tiefe, jener Wert also, den 1980 erstmals eine Rekordtiefenbohrung auf der Halbinsel Kola erreichte, ist bis heute noch weitgehend unbekannt. Das liegt darin begründet, daß es vorläufig keine Methode gibt, diese Ressourcen zu bestimmen, und sie tatsächlich noch weitgehend unerforscht sind. Angaben zum nutzbaren Potential sind deshalb – wie bei anderen Energiequellen auch – stark different und unsicher, da sie Einschätzungen, z. B. auf der Grundlage analoger Betrachtungen, darstellen. Mit entsprechenden Vorbehalten sind quantitative Angaben zu betrachten. Zur Zeit wird ein Potential geothermischer Energien von etwa  $30 \cdot 10^{12}$  W angenommen. Das ist im Vergleich beispielsweise zur Sonnenenergie relativ wenig. Dafür hat die geothermale Energie aber unter anderem den Vorteil, daß sie



eine weitaus größere Energiedichte aufweist. Könnte man jährlich etwa  $2 \text{ bis } 5 \cdot 10^9 \text{ KWh}$  aus dem geothermalen Potential gewinnen – ein Wert, der vorsichtigen Schätzungen entspricht –, wäre das zwar nur ein Bruchteil des heutigen Weltenergieverbrauchs, aber immerhin ein Äquivalent für einige hundert Millionen Tonnen Steinkohle.

Geothermische Energie tritt in verschiedenen Erscheinungsformen auf. Etwa 99 % sind in dem heißen Krustengestein gespeichert, dessen Wassergehalt weniger als 2 % beträgt. Dringt man in den Erdkörper ein, steigt die Temperatur je 100 m Tiefe um durchschnittlich  $3^\circ\text{C}$ . In 3 km Tiefe ergeben sich etwa  $100^\circ\text{C}$ , in 4 km etwa  $130^\circ\text{C}$  und in 6 km  $200^\circ\text{C}$ . Das Vorhandensein heißer Gesteine, vor allem in tiefen Schichten, ist in allen Erdregionen zu erwarten.

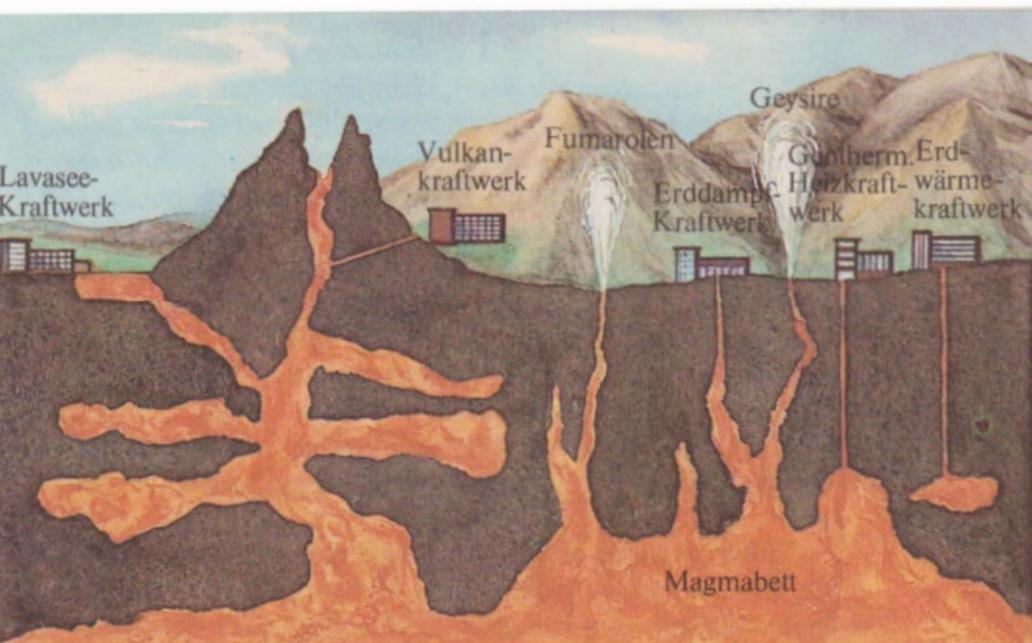
Anders ist es bei Heißdampf- und Heißwasserlagerstätten, die eher einer technischen Nutzung zugänglich sind. Heißwasserreservoirs entstehen durch magmatische Massen. Der hydrostatische Druck verhindert dabei die Ausbildung der Dampfphase. Er nimmt mit wachsender Tiefe zu; in 500 m Tiefe erreicht das Wasser Temperaturen von  $250^\circ\text{C}$ , in 1 000 m Tiefe von rund  $300^\circ\text{C}$ . Beim Erschließen einer solchen Quelle und Fördern des Heißwassers wird der Druck in der Lagerstätte gesenkt, und der Wasserdampf entspannt sich, so daß er als überhitzter Wasserdampf zutage tritt.

Außer solchen Heißwasserlagerstätten finden wir vor allem in Sedimentbecken Warmwasserreservoirs mit Temperaturen bis zu  $100^\circ\text{C}$  vor, die hauptsächlich für Warmwasserbereitstellung genutzt werden können. Von Vorteil ist hier, daß sie meist artesisch austreten, besondere Förderanlagen also entfallen können.

Schließlich gibt es noch Heißdampflagerstätten, in denen sich Heißdampf bei dem Druck, dem das Grundwasser ausgesetzt ist, durch magmatische Massen gebildet hat. Abdichtende Schichten über dem Reservoir verhindern das Austreten des Dampfes.

Zu den potentiellen geothermischen Energiequellen

*Vulkanausbrüche – Schrecken der Menschheit, Entfaltung der inneren Energien unseres Erdkörpers*



### *Erscheinungsformen geothermischer Energien*

sind schließlich die Lavaströme und Lavaflüsse einschließlich ihrer vulkanischen Ausbrüche zu zählen.

Bleiben wir zunächst bei den Heißdampf- und Heißwasservorkommen. Ihnen gemeinsam ist, daß sie eng an vulkanische Prozesse gebunden und ihre Vorkommen deshalb in den tektonisch und vulkanisch aktiven Regionen und Gürteln der Erde konzentriert sind. Geothermische Kraftwerke auf ihrer Grundlage sind daher an diese Regionen gebunden, unabhängig davon, ob hier auch Verbraucher vorhanden sind. Die wichtigsten dieser Reservoirs befinden sich z. B. an der durch Norditalien gehenden Grenzlinie der Afrikanisch-Eurasischen Platte, rund um den Pazifik oder vom Roten Meer südlich bis zum Ostafrikanischen Graben. In Europa befinden sich Heißwasservorkommen vor allem auf der Linie Italien, Griechenland, Türkei, die sich über den Kaukasus bis nach China fortsetzt. Ausläufer zeigt diese Zone bis nach Sibirien, wo man in 3 000 bis 4 000 m Tiefe die größten unterirdischen Warmwasserbecken der Welt mit Tempera-

turen von 100 °C und mehr annimmt. Diese Vorkommen sind eng an die Nahtstelle der Europäischen und Asiatischen Platte im Ural gebunden.

Die hier vorgestellten Quellen sind nicht generell unerschöpflich und regenerierend. Ihre Nutzungsdauer muß von Fall zu Fall untersucht werden, da sie von Typ und Ort und vielerlei geologisch-geophysikalischen Fakten abhängig ist. Die Lebensdauer geothermischer Heißwasserfelder z. B. kann einige zehntausend bis einige hunderttausend Jahre betragen, und der heute aus Geysiren ausströmende Dampf kann noch vom Schmelzwasser der letzten Eiszeit stammen.

Durch die Ausnutzung von Dampf- und Heißwasserlagerstätten können eventuell Land- und Grundwasserabsenkungen eintreten, was allerdings noch langzeitiger Beobachtungen und Untersuchungen bedarf. Die unterirdisch entstehenden Hohlräume können durch die eintretende Druckabsenkung einstürzen, das führt zu Landabsenkungen und Erdbewegungen. Bei dem neuseeländischen Wairakei-Kraftwerk wurde z. B. eine jährliche Landabsenkung von 4 cm und ein Absinken des Grundwasserspiegels von 30 cm/Jahr festgestellt. Außerdem versiegten in diesem Gebiet zahlreiche natürliche Quellen und Geysire. Begegnet werden kann den Absenkungen, indem Wasser wieder in die Tiefe gepumpt wird.

Auch mögliche seismische Auswirkungen sind zu beachten. Die Bohrungen und möglichen kleinen Einbrüche können größere Einbrüche der Gesteinsschichten sowie Änderungen der Druck- und Spannungsverhältnisse im Erdinneren verursachen, die wiederum lokale Erdbeben hervorrufen.

Außer diesen Umweltauswirkungen entstehen bei der Nutzung von Heißwasser- und Dampfquellen noch andere Umwelteffekte, die im folgenden genannt werden sollen:

Bei der Nutzung Elektrizitätserzeugung entsteht wegen des niedrigen Wirkungsgrades eine etwa 5- bis 10mal größere Abwärmemenge als in konventionellen Kraftwerken. Ihre Abfuhr erfolgt mit bekannten Technologien.

Kritischer sind die in geothermischen Tiefenwässern enthaltenen chemischen Einlagerungen in der Größen-

ordnung von 1 bis 20 g Feststoff je kg Wasser, vor allem an Alkali- und Erdalkalisalzen. Im Extremfall können diese Stoffe den Betrieb einer solchen Heißwasseranlage stark behindern oder sogar unmöglich machen, da sie die Förderrohre zusetzen. Problematisch ist vielfach die Abfuhr dieser Stoffe, da sie z. T. stark giftig sind. Bei geothermischen Wässern mit schwermetallhaltigen Fremdstoffen, wie Antimon- und Arsensulfid mit hohem Quecksilbergehalt, kann sich Methylquecksilber bilden, das zu den stärksten und gefährlichsten Giften gehört.

Zu den unangenehmen Begleiterscheinungen von Thermalwasser gehört schließlich Schwefelwasserstoff, der auch als Bestandteil geothermischer Dämpfe auftritt. Er verursacht nicht nur technische Probleme in den Kondensatoren, sondern ist auch sehr giftig und zudem durch seinen üblen Geruch noch recht unangenehm.

Wir wollen es bei diesen Beispielen bewenden lassen, da wir die Vielzahl auftretender Bestandteile in geothermischen Wässern und Dämpfen nicht umfassend darlegen können. Die grundlegende Erkenntnis, die wir festhalten wollen, ist die, daß Förderung und Nutzung geothermischer Dämpfe und Wässer nicht ohne Umweltfolgen und -einflüsse sind, denen begegnet werden muß.

Als der amerikanische Jäger William Bell Elliot im Jahre 1847 die Heißdampffelder in den Bergen von San Francisco entdeckte, nannte er sie das »Tor zur Hölle«. 1920 erst begannen Versuche zur energetischen Nutzung. Heute steht hier das größte geothermische Kraftwerk der Erde, »The Geysers«, mit etwa 600 MW installierter elektrischer Leistung. Schon elf Jahre früher, im Jahre 1909, wurde das erste geothermische Kraftwerk der Erde in Larderello (Italien) in Betrieb genommen. 1980 waren auf der Erde etwa 1 500 MW elektrischer Leistung in geothermischen Kraftwerken installiert, die sich auf mehr als 20 Anlagen verteilten. Nur die Anlage in Larderello und das Kraftwerk »The Geysers« arbeiten davon mit Heißdampf, alle anderen mit mehr oder weniger nassem Dampf. Daneben gibt es viele kleinere und mittlere Anlagen zur Heizwärmeversorgung sowohl von Wohngebieten als auch von Wirtschafts- und Industrieobjekten. So wird beispielsweise ein ganzer Wohnbezirk Tbilissis durch

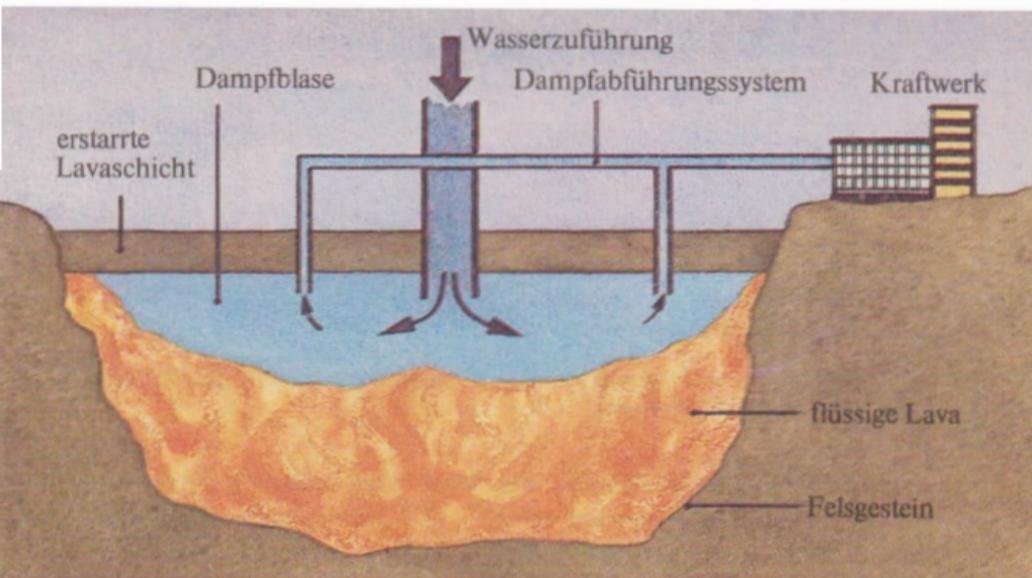
Element	Gehalt in ppm	Element	Gehalt in ppm
As	4,8	K	225,0
B	29,0	Li	14,0
Br	6,3	Mg	0,03
Ca	16,0	Na	1320,0
Cl	22260,0	NH <sub>3</sub>	0,15
CO <sub>2</sub>	19,0	SO <sub>4</sub>	36,0
F	8,3	SiO <sub>2</sub>	
H <sub>2</sub> S	1,0		

*Zusammensetzung des geothermischen Wassers der Quellen von Wairakei (Neuseeland)*

eine Warmwasserquelle am Stadtrand beliefert. In Reykjavik (Island) werden etwa 75 000 Einwohner mit Heizwärme aus geothermischen Quellen versorgt. Ähnliche Projekte finden wir in vielen Teilen der Erde.

Erddampf oder Wasser können dabei direkt oder über Wärmeüberträger in Heizungssysteme eingespeist werden. Maßgebend dafür, welches Verfahren angewandt wird, sind vor allem der Feststoffgehalt und die Korrosivität der Dämpfe und Wässer. Die technisch günstigsten Voraussetzungen für die Stromerzeugung bieten natürlich Heißdampfquellen, da der Dampf ebenfalls direkt zur Beaufschlagung von Kondensationsdampfturbinen verwendet werden kann. Ein Beispiel ist das schon mehrfach genannte Kraftwerk »The Geysers« in den USA. Die Nutzung dieses Feldes begann 1920 mit acht bis zu 200 m tiefen Bohrungen, die jedoch nur eine 20-PS-Kolbendampfmaschine zur Stromversorgung einer kleinen Siedlung betrieben. 1955 wurden die Bohrungen fortgesetzt, und 1960 wurde die erste Turbinengruppe mit 11 MW in Betrieb genommen. Die obersten Dampfquellen dieses Feldes liegen bei 150 bis 500 m Tiefe, die tiefste Bohrung erreichte bisher 2800 m. Insgesamt wurden hier inzwischen elf Kraftwerksblöcke zwischen 11 und 106 MW errichtet, ein weiterer Ausbau ist vorgesehen. Der Dampf enthält nur 1 % nichtkondensierbarer Gase. Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage beträgt 15 %.

Bei der Nutzung von Heißwasserquellen (»nasser Dampf«) muß das austretende Wasserdampfgemisch zu-



### *Lavasee als Energielieferant*

nächst in seine Bestandteile Wasser und Dampf zerlegt werden. Solche Quellen weisen Wassertemperaturen zwischen 180 und 370 °C auf. Der gewonnene Dampf wird einem Kraftwerk direkt zugeführt, das entstehende Wasser entspannt und der dabei entstehende Dampf ebenfalls zum Kraftwerk geleitet. Natürlich ist auch die direkte Nutzung für Heizzwecke möglich. Ein Beispiel hierfür ist das bereits genannte Kraftwerk Wairakei auf Neuseeland, das 1964 nach nur achtjähriger Ausbauphase seine volle Leistung von 250 MW erreichte. Die Bohrungen liefern hier Wasserdampfgemische mit 60 bis 80 % Wasser und 20 bis 40 % Dampf. Die Temperatur des unterirdischen Reservoirs liegt bei 245 °C. Der Wirkungsgrad dieser Anlage beträgt rund 8 %, ihr zeitlicher Auslastungsfaktor 85 %. Der erfolgreiche Betrieb dieses Kraftwerkes hat Pläne entstehen lassen, die vorsehen, durch Kapazitätserweiterungen künftig bis zu 70 % des Elektroenergiebedarfs des Landes mittels geothermischer Energiequellen zu decken.

Zu den führenden Ländern, die geothermische Energie nutzen, gehört wegen der hier günstigen Bedingungen auch die Sowjetunion. Das erste geothermische Kraft-

werk entstand in den sechziger Jahren bei Panshetka auf der Halbinsel Kamtschatka mit 5 MW installierter elektrischer Leistung. Weitere Anlagen sind inzwischen gefolgt, und besonders auf Kamtschatka liefern geothermische Kraftwerke wesentliche Anteile des Energiebedarfs. Besonders in Ostsibirien, Usbekistan und Aserbaidshan lagern noch riesige Vorkommen, die erschlossen und genutzt werden sollen.

Einen weniger fortgeschrittenen Stand der Nutzung haben bisher die trockenen Energiereserven des Erdkörpers zu verzeichnen, also die Gesteinswärme und die unterirdischen Lavareservoire. Was Vorkommen und Verteilung betrifft, sind auch Lavalagerstätten an die tektonisch-vulkanisch aktiven Erdregionen gebunden. Der latente Gesteinstemperaturgradient hingegen ist überall vorhanden. Die Nutzung beider steckt im Projektierungs- und Versuchsstadium. Ihnen gemeinsam ist, daß sie als trockene Lagerstätten kein natürliches Wärmetransportmedium aufweisen und für ihre Nutzung ein künstliches Wärmezirkulationssystem geschaffen werden muß. Alle vorgeschlagenen Verfahren hierfür laufen im Prinzip darauf hinaus, die heißen Schichten durch Tiefenbohrungen zu erschließen, durch diese Kaltwasser in die Tiefe zu führen, das sich an den heißen Gesteins- oder Magmaschichten erwärmt, und über eine zweite Bohrung, die mit der ersten ein kommunizierendes System bildet, als Heißwasser oder Dampf wieder zur Erdoberfläche zu bringen. Je nach Spezifik der unterirdischen heißen Schicht variieren dabei natürlich die technologischen Details. Günstige Bedingungen ergeben sich z. B., wenn bei Vulkanausbrüchen in Nebenkratern Lavaseen entstehen, die sich nach kurzer Zeit mit einer verfestigten, starren Oberflächenschicht überziehen. Dadurch werden die darunterliegenden Lavamassen vor weiterer Abkühlung geschützt. Wird durch diese Decke in der Mitte des Lavasees in einem Zuleitungsrohr Wasser geführt, bildet sich Wasserdampf, der am Rand aufgefangen und für die Energiegewinnung genutzt werden kann.

Beim Ausbruch des Kilanea-Vulkans auf Hawaii im Jahre 1959 bildete sich im Nebenkrater Iki ein Lavasee mit einem Volumen von 30 Mio m<sup>3</sup> Lava, der sich mit

einer 6 m dicken Kruste überzog. Die darin gespeicherte Energie wurde zu etwa 20 Mrd. kWh ermittelt. Zukunftsprojekte zielen darauf ab, Vulkane durch ihre Flanken anzubohren, um die Ausbildung künstlicher Lavaseen zu stimulieren oder unterirdische Lavareservoirs »anzuzapfen«, um sie auf gleiche Weise zu nutzen. Damit könnten solche Naturkräfte gleichzeitig – zumindest in bestimmtem Umfang – gesteuert werden. In der Sowjetunion werden zur Zeit mehrere Projekte untersucht, Vulkane auf Kamtschatka auf diese Weise zu nutzen.

Zur Nutzung der Wärmeenergie des heißen Tiefengesteins hat das sogenannte Hot-Dry-Rock-Verfahren größte Aussichten. Hierbei wird zunächst eine Bohrung in Tiefen genügend hoher Temperatur niedergebracht. Durch diese Bohrung wird unter Druck Wasser niedergeführt, das das unterirdische Gestein hydraulisch aufbricht. In die oberen Schichten dieses aufgebrochenen Gesteins wird sodann eine zweite Bohrung abgeteuft. In das tiefer führende Loch wird kaltes Wasser abgelassen, das sich am heißen Gesteinsgeröll erhitzt und durch die zweite, obere Bohrung wieder an die Oberfläche gelangt. Hier ist es dann für Heizungszwecke oder die Elektroenergiegewinnung verfügbar. Auch dieses Verfahren ist bisher noch Projekt. Ein erstes Kleinkraftwerk dieser Art wurde zu Versuchszwecken im Jahre 1980 in Feuton Hill (Bundesstaat Neumexiko, USA) durch die Forschungslaboratorien Los Alamos errichtet. Pro Minute werden hier 400 l Wasser in ein 3000 m tiefes Loch gepumpt. Die elektrische Leistung der Anlage beträgt 60 kW. Allein die Bohrkosten betragen 3 bis 4 Mio Dollar!

Erwähnt sei noch, daß sich natürlich auch für diese Technik besonders dort günstige Voraussetzungen ergeben, wo heiße Gesteine in möglichst oberflächennahen Schichten auftreten, d. h. ein stärkerer Temperaturgradient vorhanden ist. Das ist in Regionen mit geothermischen Anomalien der Fall. Solche befinden sich vor allem in der Umgebung großer Vulkane.

Es gibt heute verschiedentlich Meinungen, daß um die Jahrtausendwende bis zu einem Sechstel des Weltenergieverbrauchs aus geothermischen Quellen gedeckt werden könnte. Diese Einschätzungen sind allerdings sehr opti-

mistisch und, da sie von weitgehend idealisierten geologischen Bedingungen ausgehen, unreal. Für die Nutzung von Heiß- und Naßdampf- sowie Heißwasserlagerstätten steht heute das technologische Know-how zur Verfügung. Auch Bohrungen bis zu einigen tausend Metern sind kein technologisch unlösbares Problem, aber sie sind ungeheuer kostspielig. Geothermische Kraftwerke haben deshalb generell hohe Erschließungskosten, die diejenigen von Erdölquellen um das Zwanzigfache übertreffen. Die Betriebskosten hingegen sind sehr niedrig und liegen bei einem Siebentel gegenüber denen eines ölbeheizten Kraftwerkes. Senkungen der Erschließungskosten werden deshalb den künftigen Einsatz wesentlich mitbestimmen.

Für die Zukunft werden wir besonders dort eine zunehmende Nutzung von Heißdampf- und Heißwasserquellen primär für die Bereitstellung von Heizwärme zu verzeichnen haben, wo entsprechende Lagerstätten vorhanden und erschließbar sind. Für Elektroenergieanlagen ist vorerst wohl keine progressive Erweiterung zu erwarten, mit Ausnahme bereits vorhandener Kraftwerksanlagen, für die ein Ausbau vorgesehen ist. Die zukünftige energie-wirtschaftliche Bedeutung von Lava- und Hot-Dry-Rock-Kraftwerken ist heute noch nicht fundiert zu bewerten. Sollte sich das Hot-Dry-Rock-Verfahren als technisch und ökonomisch durchführbar und konkurrenzfähig erweisen, könnten auch solche Anlagen ergänzende Energiebeiträge in Verbundsystemen zum Spitzenlastausgleich leisten. Die Realisierung wird aber immer an Regionen geothermischer Anomalien gebunden und auf diese beschränkt bleiben. Die weitere Erforschung des Inneren unserer Erde wird den erforderlichen Kenntnisstand über Größe und Verteilung des Potentials zu erbringen haben.

---

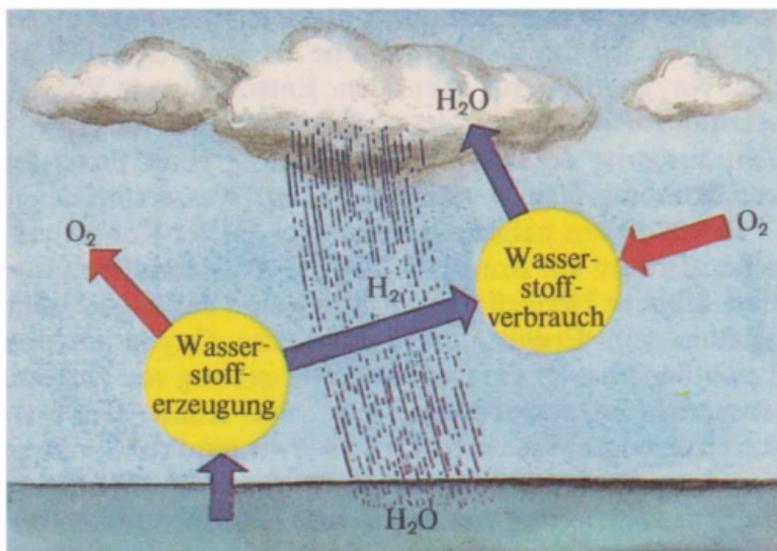
# Kommt eine Wasserstoff-Ära?

---

In jüngster Zeit macht in Diskussionen zum Problemkreis regenerativer Energiequellen ein Mitbewerber verstärkt auf sich aufmerksam, der bisher kaum ernstlich in Betracht gezogen wurde – der Wasserstoff. Er stellt allerdings einen Sekundärenergieträger dar. Als solcher hat er imponierende, ja in vielerlei Hinsicht vielleicht sogar ideale Eigenschaften. Und hier setzt seine Verbindung zu den Primärenergieträgern ein, die wir bereits vorstellten. Wasserstoff könnte die Rolle eines universellen Zweck-Sekundärenergieträgers für viele dieser Energiequellen und -projekte übernehmen und damit zahlreiche Probleme lösen, die heute für eine großtechnische Nutzung noch Hemmschuh sind. Wasserstoff ist Energiespeicher und Energietransportmedium zugleich. Optimistische Prognosen sprechen von der Möglichkeit einer künftigen Weltenergiewirtschaft vorwiegend auf Wasserstoffbasis. Bis dahin allerdings sind noch zahlreiche Probleme zu lösen. Gesicherte Prognosen sind auch hier noch nicht möglich, denn auch Wasserstoff ist nicht ohne Wenn und Aber!

Wasserstoff bildete vor 13 Mrd. Jahren das »Urelement« des Weltalls. Er ist noch heute die häufigste, unerschöpfliche Substanz nicht nur unseres Planeten, sondern des gesamten Weltalls. Energetisch macht ihn gleich eine ganze Palette von Eigenschaften interessant:

– Wasserstoff hat unter allen bekannten Brennstoffen den höchsten Heizwert je Masseinheit, der den von Benzin und Erdgas um rund das Dreifache übertrifft: Benzin hat rund  $470 \cdot 10^6$  J, Wasserstoff rund  $12480 \cdot 10^6$  derselben Einheit!



*Ökologischer Kreislauf einer »Wasserstoffenergetik«*

- Wasserstoff ist als einziger Energieträger 100prozentig umweltfreundlich. Produkt seiner Verbrennung ist nur Wasser, das in einem offenen Kreislauf ohne besondere Rückleitung in die Biosphäre rückführbar ist. Weder Wasser noch Wasserstoff sind giftig.
- Wasserstoff ist vorzüglich sowohl als Energiespeicher als auch als Energietransportmedium geeignet, die Entwicklung entsprechender ökonomischer Technologien vorausgesetzt. Seine hohe Viskosität und Flußgeschwindigkeit bilden hierzu eine günstige Basis.
- Wasserstoff ist nicht nur für energetische Prozesse, sondern auch für zahlreiche Belange der Grundstoffindustrie Ausgangsbasis und damit ein material- und energieökonomisch weitgehend variabler Grundstoff.
- Wasserstoff ist ein vergleichsweise sicherer Brennstoff. Seine Flammtemperatur beträgt in Luft rund  $2160^\circ\text{C}$ , seine minimale Entzündungstemperatur etwa  $550^\circ\text{C}$ . Da sein Molekulargewicht relativ niedrig ist (14,4mal leichter als Luft), verflüchtigt er sich rascher als z. B. Benzindampf und birgt eine geringere Explosionsgefahr in sich.

Allerdings gibt es zum Thema Wasserstoff ein großes

»Aber«: Er kommt praktisch nicht in rein molekularer Form, wie wir ihn für energetische Anwendungen benötigen, vor, sondern nur gebunden. Entscheidende Voraussetzung für seinen Einsatz als Energieträger für längere Zeiträume ist deshalb die Entwicklung eines Prozesses zur ökonomischen Herstellung reinen Wasserstoffs.

Heute dienen nahezu ausnahmslos fossile Kohlenwasserstoffträger als Rohstoffe für die Wasserstoffproduktion. Übliche Herstellungsverfahren sind das katalytische Spalten von Erdgas, die katalytische Oxydation von Leichtbenzin oder die partielle Verbrennung von Kohlenwasserstoffen, speziell von Heizöl und Kohle. Der hierdurch erzeugte Wasserstoff wird vorwiegend zur Synthese von Ammoniak und Methanol, für chemische Synthesen und zur Hydrierung von Erdöl- und Kohleprodukten verwendet. Energetische Anwendung findet Wasserstoff vor allem im Gemisch als Stadtgas sowie in geringem Umfang als Antriebsstoff in der Raketentechnik.

Für eine künftige Energetik auf Wasserstoffbasis scheidet jedoch eine Produktion aus fossilen Energieträgern naturgemäß aus, denn gerade hierfür wollen wir alternative Energiequellen suchen. Zudem wäre eine Wasserstoffgewinnung aus Öl oder Kohle energetisch, technisch und ökonomisch nicht sinnvoll. Bereits in der ersten Vergasungsstufe entsteht ein aus Kohlenmonoxid, Wasserstoff und Methan bestehendes Gas, das konventionellem Stadtgas weitgehend gleichwertig und in vorhandenen Gasanlagen einsetzbar ist. Um aus diesem Rohgas reinen Wasserstoff zu gewinnen, wären weitere Umwandlungsprozesse notwendig, die, von der Energiebilanz her gesehen, nicht vertretbar wären.

Aus diesem Grunde liegt der Schlüssel zu einer künftigen Wasserstoffenergetik nur in einem Verfahren, mit dem ohne Einsatz fossiler Energieträger Wasserstoff aus Wasser gewonnen werden kann. Für diesen Prozeß mögliche Primärenergien sind aus heutiger Sicht vor allem die Kern- und Sonnenenergie, eventuell weitere der bereits vorgestellten regenerativen Energiequellen. Der einzige technische Prozeß zur Wasserstoffgewinnung aus Wasser scheint beim jetzigen Stand der Technik die Elektrolyse zu sein, die auch heute schon das am meisten verwendete

Verfahren für die Herstellung extrem reinen Wasserstoffs mit 99,99 % Reinheitsgrad ist. Dabei wird Wasser, z. B. mit verdünnter Kalilauge als Elektrolyt angereichert, mit Hilfe von Gleichstrom auf elektrolytischem Weg in seine Grundbestandteile gemäß der chemischen Reaktionsgleichung



zerlegt. Elektrolysesysteme bestehen aus einer Vielzahl elektrolytischer Zellen, die in Serie betrieben werden. Wasserstoff und Sauerstoff werden an den Elektroden getrennt abgeführt. Elektrolyt ist 20- bis 25prozentige Natron- oder 20- bis 30prozentige Kalilauge. Die Zersetzungsspannung liegt bei 1,5 bis 2 V. Einen Teil der erforderlichen Energie kann man dabei durch Wärme aufbringen. Auch Elektrolysen unter Druck ergeben bessere Wirkungsgrade. Am günstigsten sind Hochtemperatur-Dampfphasenelektrolysen, die allerdings erst labormäßig erprobt werden. Das elektrolytische Verfahren ist sehr kostenaufwendig. Es wird deshalb vielfach auch bezweifelt, daß es überhaupt jemals geeignet sein wird, Wasserstoff in der für Energieversorgungssysteme erforderlichen Menge damit ökonomisch zu erzeugen.

Ein anderer Weg, heute Gegenstand der Forschung, ist die endotherme, direkte Zersetzung von Wasserdampf bei sehr hohen Temperaturen, auch Wasserdampfpyrolyse genannt. Hierbei spielen sich teilweise sehr komplizierte Vorgänge ab, merkliche Wasserstoffausbeuten ergeben sich erst bei Temperaturen ab 3000 K. Allein wegen dieses Wertes erscheint eine großtechnische Nutzung zunächst fraglich.

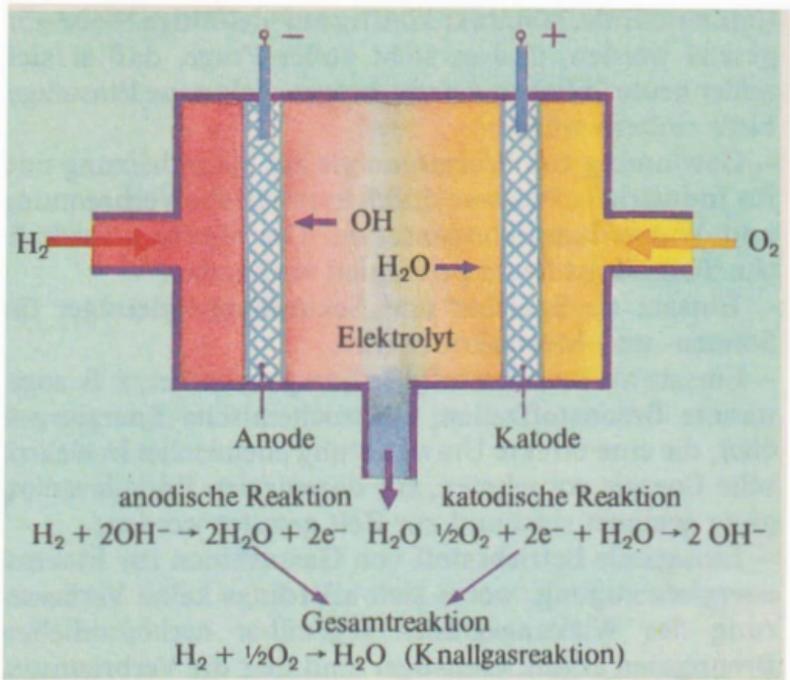
In neuerer Zeit werden zahlreiche chemische Kreisprozesse, so das Eisen-Chlor- und Quecksilber-Brom-Kalzium-System, auf ihre Eignung zur Wasserstoffgewinnung untersucht. Inzwischen sind etwa zwanzig solcher Prozesse bekannt, die realisierbar erscheinen und teilweise labormäßig oder in Pilotanlagen untersucht werden. Der derzeitige Entwicklungsstand gestattet allerdings keine Einschätzung, inwieweit und unter welchen Bedingungen sie für Energiesysteme geeignet sein könnten.

Wir müssen deshalb konstatieren, daß es bis heute kein

Verfahren gibt, das eine Wasserstoffproduktion in dem für Energieversorgungsanlagen erforderlichen Umfang gewährleistet. Nur wenn ein Prozeß zu hinreichender technologischer Reife geführt werden kann, hat Wasserstoff als ein Energieträger der Zukunft reale Chancen.

Wie steht es um Transport und Speicherung? Beim Transport gasförmigen Wasserstoffs treten ähnliche Probleme auf wie bei dem von Erdgas. Technisch erscheint er am ehesten beherrschbar und wird bereits in Einzelfällen praktiziert. So arbeitet beispielsweise im Ruhrgebiet seit Jahren ein Wasserstoffverbundnetz. Auch mit Stadtgas werden ja bekanntlich erhebliche Mengen Wasserstoffs transportiert. Unterschiede zu Erdgasleitungen ergeben sich bei Fernleitungssystemen in der Auslegung der Verdichterstufen und in den Druckverhältnissen. Wasserstoffleitungen lassen sich sogar billiger erstellen als Erdgasleitungen, da der schwach diffundierende Wasserstoff die Leitung vor Rost und Korrosion schützt. Der Transport des Gases ist technologisch günstiger als der von Flüssigwasserstoff, der besonders für mobile Verbraucher (bisher nur in der Raketentechnik) erforderlich ist und aufwendige Kühlsysteme benötigt. Auch die Speicherung gasförmigen Wasserstoffs wird heute technisch beherrscht, da sie wie die anderer Gase in Gasbehältern oder Untergrundspeichern erfolgen kann. Als natürliche Untergrundspeicher eignen sich hinreichend dicke, poröse Gesteinsschichten, die von Tonschichten überdeckt sind. Sehr aufwendig ist die Speicherung von Flüssigwasserstoff, die nur mit einem sehr ungünstigen Verhältnis Energieinhalt zu Behältergewicht möglich ist. Für die Speicherung größerer Mengen werden Beton- oder Nickelstahl-Kugelspeicher eingesetzt, die innen dicke Wärmeisolationsschichten aus Schaumkunststoffen enthalten. Außenisolationen sind nicht ungefährlich, da aus in ihnen enthaltener Restluft Sauerstoff ausfrieren kann. Dessen Beseitigung ist sehr aufwendig und kann z. B. durch Ausspülen mit Wasserstoff erfolgen.

Dritte Möglichkeit ist die Speicherung in fester Form mittels Metallhydriden. Man verwendet dazu Verbindungen auf Lanthan-Nickel-Kobalt- oder Palladium-Fluor-Basis. Die Speicherung erfolgt durch Druck- und Tempe-



*Schema einer Sauerstoff-Wasserstoff-Brennstoffzelle. Durch kalte Verbrennung von Wasserstoff wird Elektroenergie erzeugt.*

raturänderungen. Wegen seiner kleinen Molekülgröße und damit hohen Wendigkeit und Beweglichkeit vermag das Wasserstoffmolekül leicht in die Gitter der Metallierungen einzudringen. Für die Energiespeicherung wird hoher Druck angewendet, wobei Wärme frei wird. Wärmezufuhr setzt dann andererseits den gebundenen Wasserstoff wieder frei. Dieses heute noch labormäßig untersuchte Verfahren hat allerdings zwei gravierende Nachteile: Einerseits ist die Gesamtmasse von Speichermedium und -inhalt sehr hoch, was besonders für mobile Verbraucher von Bedeutung ist. Andererseits sind die Speicher sehr teuer, da die in Frage kommenden Elemente durchweg selten sind. Ökonomisch ist das Verfahren deshalb vorerst nicht konkurrenzfähig, was nichts daran ändert, daß es ein ernsthaftes Problem der Grundlagenforschung darstellt.

Würden insbesondere die Herstellungsprobleme des Wasserstoffs gelöst, so daß er in großem Maßstab zur Ver-

fügung stünde, könnte er künftig auf vielfältige Weise eingesetzt werden, und es steht außer Frage, daß er sich außer heute üblichen Anwendungen viele neue Einsatzgebiete erobern würde:

– Gewinnung von Wärmeenergie zur Raumheizung und für industrielle Prozesse durch katalytische Verbrennung und Wasserdampfkondensation. Die hierfür erforderliche Technik ist heute prinzipiell vorhanden.

– Einsatz als Speicher und Sekundärenergieträger für Sonnen- und Meereskraftwerke;

– Einsatz als Betriebsstoff für Energiewandler, z. B. sogenannte Brennstoffzellen, elektrochemische Energiespeicher, die eine direkte Umwandlung chemischer in elektrische Energie vornehmen, zur dezentralen Energieversorgung geeignet sind und zur Zeit getestet werden;

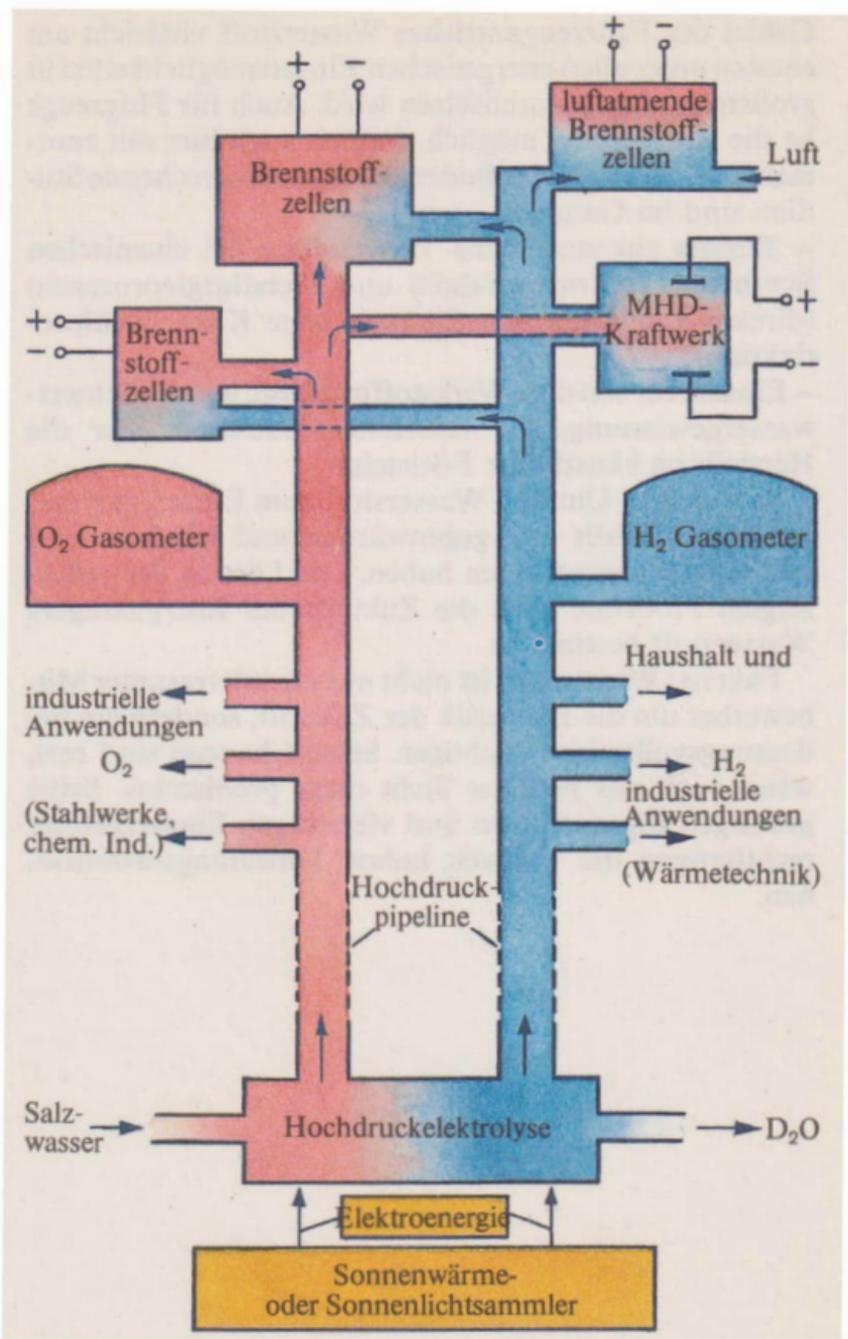
– Einsatz als Betriebsstoff von Gasturbinen zur Elektroenergieerzeugung, wobei sich allerdings keine Verbesserung des Wirkungsgrades gegenüber herkömmlichen Brenngasen ergibt. Günstiger sind hier die Verbrennung mit Sauerstoff in Dampfkesseln und der Betrieb einer Dampfturbine.

– Einsatz als Energiequelle für technologische und metallurgische Prozesse, z. B. Schweißprozesse oder die Metallbearbeitung;

– Einsatz als Antriebsstoff für Motoren von Verkehrsmitteln.

Ein wasserstoffgetriebener Kfz-Motor ist umweltfreundlicher, ruhiger und verschleißärmer als ein Benzin- oder Dieselmotor. Drehmoment, Leistung und Wirkungsgrad sind vielversprechend, der Start ist leichter. Die Motoren erfordern nur geringe Änderungen, das gesamte System der Bereitstellung (Transport, Lagerung, Tankstellen) hingegen fordert gravierende Umwandlungen.

Zu beachten ist, daß über Jahrzehnte hinweg beide Antriebsstoffe, Benzin und Wasserstoff, parallel bereitgestellt werden müssen. Optimistische Prognosen müssen wir deshalb mit Nüchternheit betrachten, denn der Prozeß einer eventuellen generellen Umstellung ist ein Prozeß von Generationen. An der Entwicklung von Wasserstoffmotoren wird intensiv gearbeitet, Prototypen werden einzeln erprobt. Man kann annehmen, daß sich auf dem



**Projekt eines Sonnenenergie-Wasserstoff-Kraftwerkes nach Prof. Justi**

Gebiet des Fahrzeugantriebes Wasserstoff vielleicht am ehesten unter allen energetischen Einsatzmöglichkeiten in großem Maßstab durchsetzen wird. Auch für Flugzeuge ist die Anwendung möglich, freilich auch hier mit enormen Umstellungen der Bodentechnik; entsprechende Studien sind im Gange.

– Einsatz zur stofflichen Verwendung bei chemischen Synthesen, Hydrierverfahren und Metallurgieprozessen (direkte Reduktion von Eisenerz ohne Koks, Stahlproduktion);

– Einsatz für sonstige Werkstoffprozesse, wie die Schwere-wassergewinnung, die Halbleiterproduktion oder die Herstellung künstlicher Edelsteine.

In welchem Umfang Wasserstoff zum Einsatz kommt, werden ebenfalls erst gegenwärtige und künftige Forschungen zu entscheiden haben. Die Lösung der aufgezeigten Probleme wird die Zukunft des Energieträgers Wasserstoff bestimmen.

Fakt ist: Wasserstoff ist nicht nur ein interessanter Mitbewerber um die Energetik der Zukunft, sondern ein bedeutungsvoller und wichtiger. Seine Chancen sind real, wenn auch aus heutiger Sicht nicht problemlos. Seine günstigen Eigenschaften und vielseitigen Einsatzgebiete rechtfertigen die weltweit hohen Forschungsinvestitionen.

---

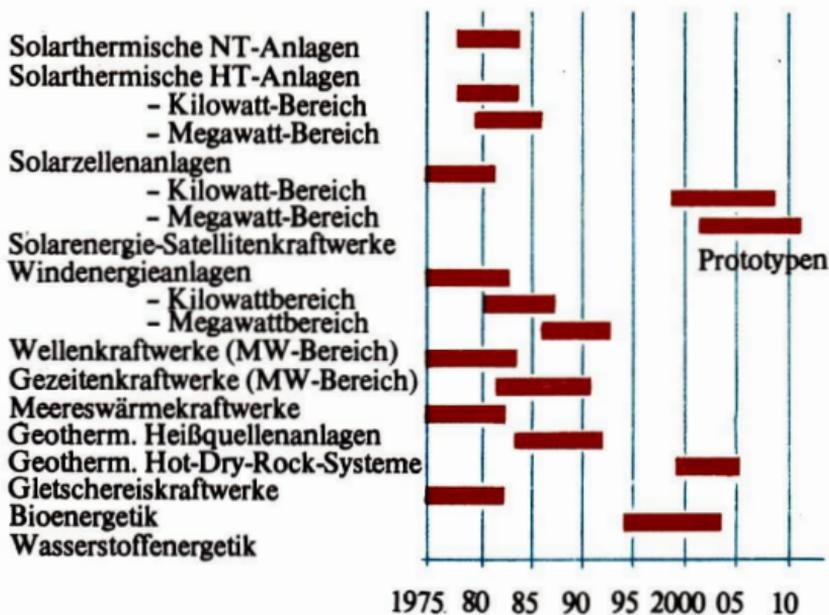
# Bilanz und Ausblick

---

Wo also steckt noch Energie? Zusammenfassend und rückblickend können wir zu den hier vorgestellten Energiequellen und -trägern aus heutiger Sicht generell sagen: Vom theoretisch nutzbaren Potential her – soweit dieses einschätzbar ist – wären einige der untersuchten Quellen in der Lage, den derzeitigen und künftigen Weltenergiebedarf allein zu decken. Praktisch ist jedoch von keiner Energiequelle eine dominierende Rolle in der künftigen Weltenergiewirtschaft zu erwarten! Es gilt als sicher, daß wir bei ihnen in den kommenden Jahren einen ansteigenden Anteil an der Deckung des Weltenergiebedarfs zu erwarten haben. Wir nannten die Zahlen schon: Für das Jahr 2000 werden etwa 5% erwartet. Ein bescheidener Anteil, aber immerhin groß genug, um sich den betreffenden Energieträgern zu widmen, um sie zu erschließen.

Der heute allgemein verbreitete Slogan von alternativen Energieträgern ist nicht gerechtfertigt. Richtig ist, von ergänzenden Energieträgern zu sprechen, denn hier liegt ihre Zukunft. Sonne, Wind, Weltmeer und Erdwärme sind keine Alternativen zur Kernenergie, sie sind »nur« eine Ergänzung. Ihr Hauptanwendungs- und Nutzungsgebiet wird zunächst der Bereich kleiner und mittlerer Leistungen sein – vor allem die autarke, regionale Energieversorgung. Über eine künftig mögliche großtechnische Nutzung sind aus heutiger Sicht abschließende Urteile vielfach nicht möglich, aber auch sie würde ergänzenden Charakter tragen, z. B. in Verbundsystemen.

Die Mehrzahl der Energiequellen ist aus technischen und meist auch wirtschaftlichen Gründen nur in bestimmten Regionen nutzbar. Eine Nutzung darüber hin-



*Geschätzte Einsatzzeitpunkte für regenerative Energiequellen*

aus verlangt wirtschaftliche Transporttechnologien, eventuell auf der Basis eines sekundären Energieträgers. Das würde eine weltweite Koordinierung erfordern. Entsprechend der unterschiedlichen physikalischen Natur der Energieträger sind die Nutzungstechnologien stark unterschiedlich und weisen einen teilweise gravierend differenzierten Entwicklungsstand auf. Dieser aber bestimmt letztlich den frühestmöglichen Einsatzzeitpunkt überhaupt.

In puncto Kosten ist heute die Mehrzahl der vorgestellten Energiequellen nicht konkurrenzfähig mit konventionellen Quellen. Vielfach wird nur dort, wo die Energieversorgung autarker Verbraucher in schwer zugänglichen Gebieten höheren Kostenaufwand erfordert, Kostengleichheit erreicht. Dieser Tatbestand aber ist nicht ohne Einschränkungen auf die Zukunft übertragbar. Die Erschließung und Nutzung fossiler Energieträger sind objektiv mit steigenden Kosten verbunden. Die Bewertung künftiger Nutzungsmöglichkeiten ergänzender Energiequellen muß deshalb auch von künftigen Kostenrelationen ausgehen – die Zukunft kann hier nicht mit den Au-

gen von heute gesehen werden. Neuverteilungen finanzieller Fonds müssen vorgenommen werden, wenn das durch objektive Entwicklungsbedingungen erforderlich wird.

Schließlich sind Umweltaspekte zu beachten. Die im Buch genannten Energiequellen erweisen sich als durchweg recht umweltfreundlich. Im Normalbetrieb werden keinerlei Schadstoffe freigesetzt. Spürbarste Umweltauswirkung ist der überwiegend große Flächenbedarf, der abhängig vom Standort und natürlich vom Stand der Technik ist. Ästhetische und z. B. akustische Einflüsse müssen wie viele andere Faktoren noch näher untersucht werden.

»akzent« – die Taschenbuchreihe mit vielseitiger Thematik: Mensch und Gesellschaft, Leben und Umwelt, Naturwissenschaft und Technik. – Lebendiges Wissen für jedermann, anregend und aktuell, konkret und bildhaft.

---

In den nächsten drei Jahrzehnten wird die Menschheit mehr Energie verbrauchen als in ihrer gesamten bisherigen Geschichte! Woher und wie den enorm gewachsenen Bedarf decken? – Im Spektrum der Energiequellen stellen die »unerschöpflichen« Energien aus Sonne, Wind und Meer, aus der Biomasse der Erde und aus dem Erdkörper zu fossilen und nuklearen Brennstoffen keine Konkurrenz, wohl aber – wenn technisch ausgereift und rentabel eingesetzt – eine wertvolle Ergänzung dar.

---