

Regenerative Energien

Sonnenenergie

Von William Hoagland

Neue Techniken ermöglichen, solare Energie direkt oder indirekt zur Stromerzeugung sowie zur Produktion von umweltfreundlichen und preiswerten Brennstoffen zu nutzen.

Das Sonnenlicht, das pro Jahr die Erdoberfläche erreicht, enthält mehr als zehnmal so viel Energie wie alle bekannten Vorräte an Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran zusammen; das entspricht dem 15 000fachen des Weltjahresverbrauchs. Seit Jahrtausenden verbrennen die Menschen Holz und andere Arten von Biomasse - und nutzen damit indirekt Solarenergie. Das gleiche gilt für fossile Brennstoffe, den Wind und - betrachtet man den Kreislauf von Verdunstung und Niederschlägen - jegliche Form strömenden Wassers.

Bild 1: Sonnenenergie lässt sich auf unterschiedliche Weise nutzen. Windkraftanlagen (a) setzen Luftströmungen, die von der unterschiedlichen Erwärmung der Erdoberfläche und der Atmosphäre herrühren, in Elektrizität um. In einem Sonnenofen (b) wird das auf einen zentralen Turm gebündelte Sonnenlicht zum Antrieb einer Turbine oder eines Heißgasmotors eingesetzt. Solarzellen (c) wandeln Licht über den Photoeffekt direkt in Elektrizität um. Feldfrüchte wie Zuckerrohr (d) nutzen das Sonnenlicht durch Photosynthese; aus dem Zucker lässt sich Alkohol gewinnen, der schadstoffarm verbrannt werden kann.

Lediglich Kernenergie, Erdwärme und die Gezeitenenergie stammen nicht von unserem Zentralgestirn.

Versuche, das Sonnenlicht direkt zu nutzen, sind nicht neu. Bereits im Jahre 1861 erhielt der Pionier der Solartechnik, Augustin-Bernard Mouchot, Mathematiklehrer am Gymnasium in Tours (Frankreich), das erste Patent für einen solarbetriebenen Motor; später entwickelte er eine Dampfmaschine, einen Kocher und eine Eismaschine, die alle samt die Sonne als Energiequelle nutzten, und propagierte die solarbetriebene Wasserspaltung zur Gewinnung von Wasserstoff. Auch andere Erfinder bauten solche Maschinen; doch weil Kohle und Erdöl bequemer und leichter zu nutzen waren, gerieten ihre Arbeiten weitgehend in Vergessenheit - bis zur Ölkrise, die in den siebziger Jahren das westliche Wirtschaftssystem erschütterte.

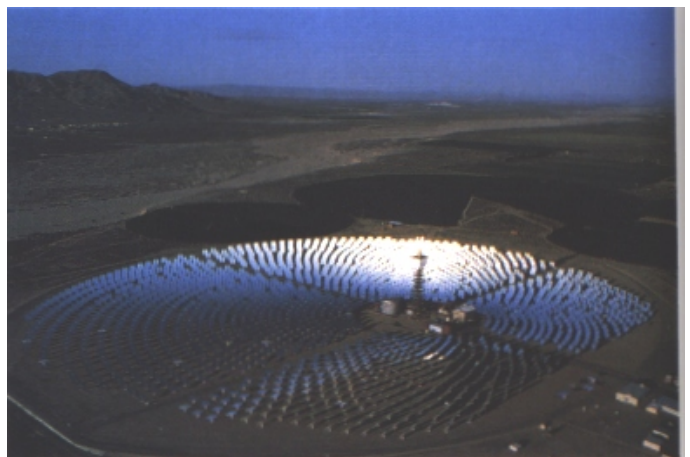
Wirtschaftliches Wachstum erfordert eine entsprechende Energieversorgung. Prognosen zufolge wird bis zum Jahre 2025 der globale Bedarf an Treibstoffen um 30, der an Elektrizität um 265 Prozent steigen. Selbst unter Berücksichtigung aller möglichen Einsparpotentiale müssen deshalb neue Energiequellen erschlossen werden; die Sonne könnte etwa sechzig Prozent des Elektrizitäts- und vierzig Prozent des Treibstoffbedarfs decken.

Ein konsequenter Einsatz moderner Solartechnik könnte die Umweltverschmutzung und die Gefahr eines globalen Klimawandels mindern. In Dürregebieten, wo ein Großteil der sowieso schon nur noch spärlichen Vegetation zum Kochen und Heizen benutzt wird, ließe sich so weitere Erosion verhindern. Der Landverbrauch wäre sogar geringer als beim Anbau von Biomasse: Während die Photosynthese in den Pflanzen in der Regel weniger als ein Prozent des verfügbaren Sonnenlichtes umsetzt, erreicht die bis heute entwickelte Solartechnik - zumindest unter Laborbedingungen - einen Wirkungsgrad von zwanzig bis dreißig Prozent. Damit könnten beispielsweise die USA als weltweit größter Energieverbraucher ihren derzeitigen Bedarf decken, wenn sie nur auf zwei Prozent ihrer Landfläche Sonnenfarmen errichteten. Sonnenenergie erlaubt eine vielfältige Nutzung (Bild 1): Durch das Verbrennen von Biomasse, mit Wind- oder Sonnenkraftwerken, mit photovoltaischen Zellen oder mit Wasserkraftwerken lässt sich Elektrizität erzeugen. Solarbetriebene Elektrolyseanlagen oder biologische Prozesse, an denen Mikroorganismen oder Enzyme beteiligt sind, können zur Gewinnung von Wasserstoff eingesetzt werden. Aus Biomasse oder mittels anderer Solartechniken lassen sich Treibstoffe wie Ethanol und Methanol gewinnen. Jedes dieser unterschiedlichen Verfahren könnte in einem gewissen Maße zur großtechnischen Nutzung der Sonnenenergie beitragen (Bild 2);

a



b



freilich hängt es von regionalen ökonomischen Besonderheiten sowie der ebenfalls ortsabhängigen Sonneneinstrahlung ab, welches von ihnen sich für ein bestimmtes Gebiet am besten eignet.

Auch in den Weltmeeren ist Sonnenenergie gespeichert: in Form von Wellen, als Temperaturunterschiede oder in Form unterschiedlicher Salzgehalte. Auch dieser enorme Energievorrat läßt sich möglicherweise anzapfen, wenn er auch räumlich weit verteilt und somit teuer in der Ausbeutung ist.

Nachwachsende Energieträger

Biologische Abfallprodukte aus Landwirtschaft und Industrie wie beispielsweise Holzspäne lassen sich als Brennstoff für den Antrieb von Dampfturbinen einsetzen. In Gebieten, in denen Biomasse reichlich anfällt und deshalb preiswert ist, kann dieses Verfahren durchaus wirtschaftlich konkurrenzfähig zu herkömmlichen sein. Viele Biomasse-Verbrennungskraftwerke sind bereits in Betrieb, und weitere stehen kurz vor ihrer Vollendung. Kürzlich wurde in Vämamo (Schweden) ein modernes Kraftwerk fertiggestellt, in dem Holzgas als Brennstoff für eine Turbine verwendet wird. Diese Anlage weist einen Wirkungsgrad von achtzig Prozent auf und liefert sechs Megawatt elektrische und neun Megawatt thermische Energie in Form von Strom und Fernwärme. Im Gegensatz zur bekannten einfachen Verbrennung setzt die Holzvergasung extrem wenig Schadstoffe frei.

Insgesamt erlauben Fortschritte in der Verbrennungs- und der Biotechnik heutzutage, Pflanzenrohstoffe wirtschaftlich

in flüssige oder gasförmige Brennstoffe umzuwandeln. Forstprodukte, speziell angebaute Kulturpflanzen sowie Abfälle aus landwirtschaftlichen oder anderen Betrieben können vergast und zur Synthese von Methanol eingesetzt werden; Ethanol entsteht bei der Vergärung von Zucker, den man aus Zuckerrohr, verschiedenen Getreidesorten oder Holz (durch Umwandeln von Cellulose) gewinnen kann.

Durch Zugabe dieser Alkohole zu Benzin wird der Wirkungsgrad von Automotoren verbessert und der Schadstoffausstoß verringert. Ethanol läßt sich jedoch auch direkt als effektiver Brennstoff einsetzen, wie Versuche in Brasilien gezeigt haben; möglicherweise wird er schon im Jahre 2000 zu gleichen Preisen erhältlich sein wie herkömmliches Benzin. Der großflächige Anbau derartiger Biokraftstoffe wäre vielleicht auf von Erosion bedrohten Böden in Entwicklungsländern möglich, wodurch sich auch die Landnutzung verbessern und die Gewinne erhöhen ließen. Um eine dauerhaft hohe Ausbeute unter den verschiedensten klimatischen Bedingungen erzielen zu können, sind jedoch noch weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

Noch ist fraglich, welchen Beitrag zur Energieversorgung pflanzliche Kraftstoffe selbst nach Einführen innovativer Techniken wirklich leisten können, denn Photosynthese ist - wie erwähnt - von Natur aus wenig effizient und verbraucht viel Wasser. Eine 1992 von den Vereinten Nationen in Auftrag gegebene Studie ergab, daß bis zum Jahre 2050 Biomasse immerhin 55 Prozent des weltweiten Energiebedarfs decken könnte. Ob sich diese Prognose erfüllt, wird freilich wesentlich davon

abhängen, welche anderen Energieträger dann zur Verfügung stehen werden.

Ungefähr 0,25 Prozent der in die untere Atmosphäre gelangenden Sonnenstrahlung wird in Luftströmungen umgewandelt - zwar nur ein winziger Teil der Gesamtmenge, aber dennoch eine bedeutsame Energiequelle.

Windkraft

Einer Abschätzung zufolge könnten 80 Prozent des Stromverbrauchs in den USA allein aus der Windenergie von Nord- und Süddakota gedeckt werden. (In Deutschland wurde das technisch nutzbare Potential der Windenergie auf 250 Milliarden Kilowattstunden pro Jahr geschätzt; dies entspricht knapp der Hälfte des gegenwärtigen Bruttostromverbrauchs. Zwischenzeitlich sind etwa 3000 Windkraftanlagen mit einer Nennleistung von mehr als einem Kilowatt installiert, die zusammen pro Jahr 1,9 Milliarden Kilowattstunden elektrische Energie erzeugen.) Das anfängliche Problem der mangelhaften Zuverlässigkeit von Windkraftanlagen ist inzwischen weitgehend gelöst, und mancherorts sind die erreichten Stromproduktionskosten denen konventioneller Kraftwerke vergleichbar.

In den Gebieten der USA, in denen die mittlere Windgeschwindigkeit mehr als 7,5 Meter pro Sekunde beträgt, kostet die in Windparks erzeugte Elektrizität zum Teil nicht mehr als vier Cent (etwa sechs Pfennig) pro Kilowattstunde (im norddeutschen Küstengebiet, wo an ausgesetzten guten Standorten vergleichbare

c



d



Windgeschwindigkeiten herrschen, liegt der Preis zwischen 15 und 18 Pfennigen pro Kilowattstunde). Bis zum Jahre 2000 sollten die Kosten auf weniger als drei Cent sinken. In Kalifornien - wo 85 Prozent der weltweiten Windkraftwerksleistung installiert sind - und in Dänemark wurden bereits mehr als 17.000 Windkraftanlagen in das öffentliche Stromnetz integriert. Dort decken sie ein beziehungsweise zwei Prozent des landesweiten Stromverbrauchs.

Geringere Kosten sollten sich unter anderem deswegen ergeben, weil widerstandsfähigere und leichtere Materialien wesentlich größere Rotoren und damit bis zu 0,5 Megawatt Leistung pro Anlage erlauben. Neue Entwicklungen bei drehzahlveränderlichen Turbinen haben Belastung und Ermüdungserscheinungen der beweglichen Teile verringert und mithin die Zuverlässigkeit erhöht. Innerhalb der nächsten 20 Jahre werden bessere Werkstoffe für Flügel und Kraftübertragung sowie geeignetere mechanische und elektronische Bauteile zum problemlosen Anschluß an das Hochspannungsnetz zur Verfügung stehen.

Windenergie wird wohl zunächst auf Inseln oder in anderen Gegenden fernab vom Stromversorgungsnetz eingesetzt werden, wo gegenwärtig meist Dieselgeneratoren in Betrieb sind. Bis Mitte des nächsten Jahrhunderts schließlich könnte die Windenergie 10 bis 20 Prozent des weltweiten Bedarfs an elektrischer Energie decken.

Das größte Hindernis für ihre Nutzbarmachung liegt darin, daß sie den natürlichen Gegebenheiten entsprechend nicht immer und nur in unterschiedlichem Maße verfügbar ist. Falls sie eines Tages etwa ein Drittel des gesamten Energiebedarfs decken sollte, hätte jede Flaute schwerwiegende wirtschaftliche Einbußen zur Folge. Doch durch bessere Energiespeicherverfahren ließe sich der prozentuale Anteil der Windkraft am Gesamtenergieverbrauch noch erheblich vergrößern.

Thermische Solarkraftwerke

Ein anderer Ansatz zur Stromerzeugung wäre der Antrieb von Generatoren mittels Strahlungswärme. Solche solarthermischen Einrichtungen bestehen aus vier Basiskomponenten: einem Kollektor zum Einfangen der Sonnenstrahlung, einem Absorber, einem Wärmespeicher und einem Konverter, der die Wärme in Elektrizität umwandelt. Es gibt drei verschiedene Kollektortypen: parabolförmige Reflektoren, die das einfallende Sonnenlicht auf

einen Punkt bündeln, wannenförmige Spiegel, sogenannte Parabolrinnen, die es auf eine Linie fokussieren, sowie mehrere Hektar große Spiegelfelder, die es auf einen zentral stehenden Turm reflektieren.

Der Wirkungsgrad derartiger Anlagen beträgt 10 bis 30 Prozent; über ihre Lebenserwartung und Zuverlässigkeit liegen freilich erst wenig Erfahrungen vor. Gegenwärtig bemüht man sich, als Konverter einen preiswerten Stirling-Motor hoher Effizienz zu entwickeln. (Dieser Heißgasmotor, den der britische Bergwerkspfeiler und Hobbyerfinder Robert Stirling 1816 zum Patent anmeldete, wird durch Wärmezufuhr von außen angetrieben, indem eine im Motorblock eingeschlossene Gasmenge einen Kolben in Bewegung setzt.)

Auch Teiche oder Becken, die in Grundnähe hochkonzentriertes Salzwasser enthalten, lassen sich als Solarenergiequelle nutzen (siehe die Abbildungen). Normalerweise steigt erhitztes Wasser an die Oberfläche und kühlt dort ab; infolge der hohen Salzkonzentration ist seine Dichte jedoch so hoch, daß es am Grund bleibt. Das eingefangene Sonnenlicht ruft einen starken Temperaturgradienten hervor. Will man dieses Phänomen zur Energieerzeugung nutzen, so pumpt man die erhitzte Sole vom Boden des Teiches ab und läßt sie verdampfen:

mit dem Dampf wird eine Kraftmaschine angetrieben. Die kühle Flüssigkeit an der Teichoberfläche hingegen kann zum Beispiel für Klimaanlagen verwendet werden.

Als Nebenprodukt dieses Verfahrens fällt, nachdem der Dampf kondensiert ist, Süßwasser an. Der Nutzen von solchen Sonnenwärmespeicherteichen ist insbesondere durch den hohen Wasserverbrauch begrenzt; sie eignen sich eher für entlegene Gebiete, in denen neben Energie auch Trinkwasser benötigt wird. Umfangreiche Untersuchungen dieses Prinzips wurden in Israel und in anderen Ländern mit heißem, trockenem Klima vorgenommen.

Solarzellen

Die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in Elektrizität durch den Photoeffekt hatte erstmals der französische Physiker Alexandre Edmond Becquerel (dessen Sohn Antoine Henri 1896 die Radioaktivität entdeckte) im Jahre 1839 beobachtet: Lichtquanten - Photonen - vermögen in einem Halbleiter wie etwa Silicium Elektronen aus den Hüllen der Atome herauszulösen, so daß sie sich als freie Ladungsträger im Material bewegen. Mittels eines

sogenannten *p-n*-Übergangs zwischen zwei unterschiedlich dotierten Halbleiterzonen kann damit eine Spannung erzeugt werden. Nachdem es vor etwa 50 Jahren gelungen war, extrem reine Siliciumkristalle für Photozellen mit hoher Spannung und hohem Wirkungsgrad herzustellen, erfuhr die Photovoltaik (nach dem italienischen Physiker Alessandro Volta, einem der Pioniere der Elektrizitätsforschung, so genannt) einen außerordentlichen Auftrieb. So wurden ab dem Jahr 1958 photovoltaische Zellen zur Energieversorgung von Satelliten eingesetzt.

Wenngleich in den vergangenen zwanzig Jahren deutliche Fortschritte erzielt wurden - der derzeit maximal erreichbare Wirkungsgrad beträgt mehr als 30 Prozent -, sind die hohen Kosten noch das Haupthindernis für einen umfassenden Einsatz der Photovoltaik. Die Preise derartiger Anlagen lassen sich senken, indem man entweder billigere Materialien für die üblichen flachen Solarmodule einsetzt oder das Sonnenlicht mittels Linsen oder Reflektoren auf die Zellen konzentriert. Solche fokussierende Systeme (Konzentratoren) müssen allerdings der scheinbaren Sonnenbewegung nachgeführt werden, und sie nutzen das diffuse Licht eines bewölkten Himmels schlechter aus; frühmorgens und am späten Nachmittag erzielen sie jedoch höhere Wirkungsgrade als die flachen Solarmodule.

Nahezu alle gegenwärtig im Einsatz befindlichen Solarzellen arbeiten ohne Konzentratoren. Meistens sind sie fest montiert, nur wenige von ihnen werden der Sonne nachgeführt. Das künftige Potential solcher Anlagen ist positiv zu bewerten, weil die kommerziell erreichten Wirkungsgrade noch längst nicht an die theoretischen Grenzen gestoßen sind und sich moderne Herstellungsverfahren erst langsam und allmählich durchsetzen. Solarstrom sollte bereits zu Beginn des kommenden Jahrhunderts weniger als 16 Pfennig pro Kilowattstunde kosten, so daß er dann wirtschaftlich konkurrenzfähig wäre.

Die Speicherung von Energie

Sonnenlicht, Wind und Wasserkraft sind unbeständige Energiequellen, deren Verfügbarkeit sowohl mit der Jahres- als auch mit der Tageszeit variiert. Der Energiebedarf schwankt ebenfalls, so daß zur Anpassung von Angebot und Nachfrage Speicher erforderlich sind. Einer von dem amerikanischen Energieministerium durchgeführten

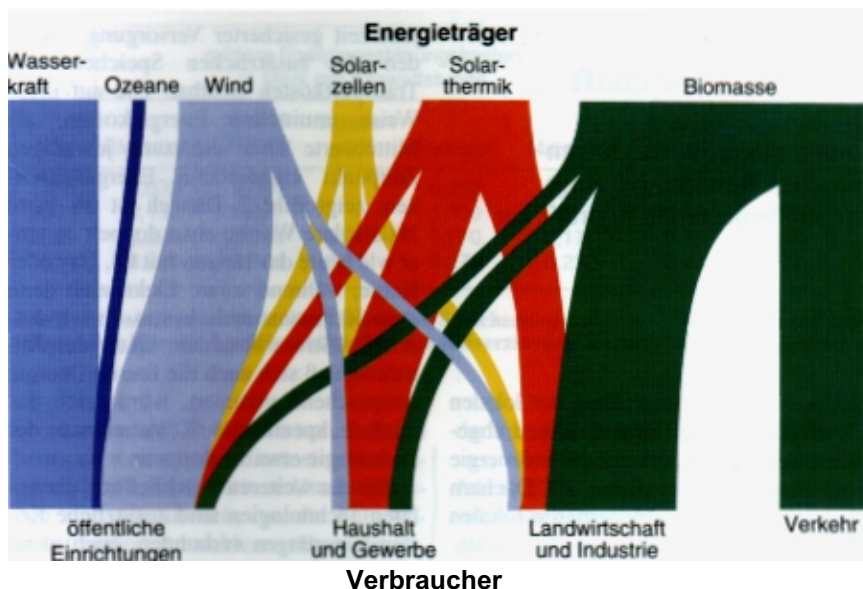


Bild 2: Diese für das Jahr 2000 aufgestellte Prognose zeigt, welche Formen von Solar energie (oben) sich für verschiedene Anwendungen (unten) einsetzen ließen. Der Anteil am gesamten Energieverbrauch könnte etwa zwei bis vier Prozent betragen.

Studie zufolge könnte — eine entsprechende Speicher-technik vorausgesetzt — der Anteil regenerativer Energien in den Vereinigten Staaten bis zum Jahr 2030 um etwa fünf Milliarden Kilowattstunden pro Jahr ansteigen.

Mit Ausnahme der Biomassenutzung dienen alle aussichtsreichen Langzeit-Solarsysteme nur der Stromerzeugung. Elektrizität ist eine hochwertige Energieform, für die es insbesondere für fest installierte Anwendungen wie Heizung, Kühlung, Beleuchtung und Maschinen kaum eine Alternative gibt, doch läßt sie sich nicht einfach in der benötigten Menge speichern. Für den Einsatz im Transportwesen wären zudem leichte Speichereinheiten mit hoher Kapazität erforderlich.

Durch Sonnenenergie gewonnener Wasserstoff könnte als solcher transportabler Energiespeicher dienen. Die für eine direkte Gewinnung erforderlichen Verfahren (also ohne den Umweg über die Elektrizitätserzeugung) befinden sich zwar gerade erst in der Entwicklung, könnten sich jedoch langfristig als erfolgreich erweisen. Auf eine Elektrode auftreffendes Licht vermag einen elektrischen Strom zu erzeugen, mit dem sich Wasser elektrolytisch in Wasserstoff und Sauerstoff aufspalten läßt. Auch biologische Systeme könnten zur Wasserstoffgewinnung eingesetzt werden. Noch längerfristig gesehen läßt sich die Entwicklung von Photokatalysatoren vorstellen, die das Wasser direkt in seine Bestandteile zerlegen.

Wird der gewonnene Wasserstoff verbrannt oder in einer Brennstoffzelle zur Stromgewinnung einge-

setzt, entsteht als einziges Nebenprodukt Wasser. Wasserstoff ist jedoch nicht nur umweltverträglich, sondern auch unbegrenzt lagerfähig. Ab einer Entfernung von 1000 Kilometern ist sein Transport zudem ökonomischer als der von Elektrizität selbst. Des Weiteren hatten Fortschritte in der Brennstoffzellentechnik die Entwicklung einer Vielzahl umweltfreundlicher und hocheffektiver Anwendungen des Wasserstoffs zur Folge wie beispielsweise wasserstoffgetriebene Elektroautos.

Eine grundlegende Wende in unserer Energiewirtschaft wird auch Veränderungen in der Infrastruktur erfordern. Der Zeitpunkt eines derartigen Wandels hängt unter anderem von der Bedeutung ab, die der Umwelt und der sicheren Versorgung mit Energie beigemessen wird.

Derzeit verbrauchen davon die Industrienationen pro Kopf mindestens zehnmals so viel wie die Dritte Welt. Doch überall steigt der Bedarf rapide. Die Solartechnik könnte den Entwicklungsländern helfen, einen kompletten Zyklus der Infrastruktur-entwicklung zu überspringen und direkt eine Energiequelle zu nutzen, die weder zur globalen Erwärmung beiträgt noch in anderer Weise die Umwelt schädigt. Die Industrieländer könnten durch den Export dieser Techniken ebenfalls profitieren — falls solche Anreize für Investitionen in die Zukunft der Sonnenenergie überhaupt erforderlich sein sollten.

(Erstveröffentlichung in Spektrum der Wissenschaft, Spezial 4: Schlüsseltechnologien)

William **Hoagland** studierte Chemotechnik am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge. Nach einer Forschungstätigkeit in der Industrie wechselte er an das National Renewable Energy Laboratory (vormals Solar Energy Research Institute) in Golden (Colorado), wo er mehrere Projekte zur Werkstoffforschung und zu erneuerbaren Energiequellen leitete. Anschließend gründete er die Firma W. Hoagland & Associates, Inc., mit Sitz in Boulder (Colorado).

Literaturhinweise

Progress in Solar Energy Technologies and Applications. Von Harold M. Hubbard, Paul Notari, Satyen Deb und Shimon Awerbach. American Solar Energy Society, Januar 1994.

Sonnenenergie: Photovoltaik. Physik und Technologie der Solarzelle. Von Adolf Goetzberger, Bernhard Voss und Joachim Knobloch. Teubner, 1994.

Die Energie der Zukunft heißt Sonnenenergie. Von Carl-Jochen Winter. Droemer Knaur, 1993.

Solarthermische Anlagentechnologien im Vergleich. Turm-, Parabolrinnen-, Paraboloidanlagen und Aufwindkraftwerke. Herausgegeben von Manfred Becker und Wolfgang Meinecke. Springer, 1993.

Renewable Energy. Sources for Fuels and Electricity. Herausgegeben von Thomas B. Johansson, Henry Kelly, Amulya K. N. Reddy, Robert Williams und Lau-ne Burnham. Island Press, 1993.

Alternative Energietechnik. Von Jochem Unger. Teubner, 1993.

Erneuerbare Energieträger in Deutschland. Potentiale und Kosten. Herausgegeben von Martin Kaltschmitt und Andreas Wiese. Springer, 1993.

Solar Power Plants. Fundamentals, Technology, Systems, Economics. Herausgegeben von Carl-Jochen Winter, Rudolf L. Sizmann und Lorin L. Vant-Hull. Springer, 1991.

Energie aus Sonne, Meer und Wind. Möglichkeiten und Grenzen der erneuerbaren Energiequellen. Von Volker Hoffmann. Harri Deutsch, 1990.

Basic Photovoltaic Principles and Methods. Von Kenneth Zweibel und Paul Hersch sowie dem Solar Energy Research Institute. Van Nostrand Reinhold, 1984.