

Anhang A – Nutzung der Energien des Meeres

A.1 Wellennutzung

Eine hauptsächlich von der Windenergie induzierte Energieform ist die Wellenenergie. Wellen enthalten damit sowohl potenzielle als auch kinetische Energie. Dabei ist für idealisierte Tiefwasserwellen ohne Bodenreibung die Gesamtleistung einer auf 1 m Breite normierten Welle direkt proportional dem Produkt aus Wellenhöhe zum Quadrat und der Wellenperiode.

Wird für diese Verknüpfung von Wellenhöhe und -periode ein sogenanntes Standardspektrum zugrunde gelegt, kann die Leistung bzw. die Energie der Wellen in Abhängigkeit von Höhe bzw. Frequenz ermittelt werden. Beispielsweise sind an der deutschen Nordseeküste Wellenhöhen von 1,5 m bei einer mittleren Wellenperiode von 6,2 s typisch. Daraus ergibt sich eine signifikante Wellenhöhe von 2,11 m und eine Gesamtleistung der Welle von etwa 14 kW/m Wellenfront. Gelänge es also im theoretischen Maximalfall, die gesamte Energie einer Wellenfront von der Länge der deutschen Nordseeküste (ca. 250 km) zu nutzen, könnten diesen modellhaften theoretischen Überlegungen zufolge ca. 3,6 GW Leistung bereitgestellt werden /A-1/.

Aufgrund dieses doch erheblichen Energiepotenzials wird die Nutzung der Wellenenergie zur Stromerzeugung seit vielen Jahrzehnten erforscht. Dabei wurden eine Vielzahl unterschiedlicher Vorschläge erarbeitet, die diese Möglichkeit zur Nutzung regenerativer Energien in der öffentlichen Wahrnehmung teilweise in den Bereich des Unseriösen hat abdriften lassen. Konsequenter und langjähriger Einsatz einiger Forscherteams und erste technische Erfolge führen hier jedoch allmählich zu einem Umdenken.

Bei Systemen zur Nutzung der Wellenenergie ist grundsätzlich zu beachten, dass sie sich auch zum Schutz der Küste einsetzen lassen. Da die Energie bei solchen Systemen nicht nur reflektiert bzw. dissipiert, sondern dem Meer entnommen und in Strom umgewandelt wird, ließe sich so auch der Küstenschutz verbessern. Eine derartige Kopplung von Energiegewinnung und Küstenschutz könnte eine Möglichkeit darstellen, die Wellenenergienutzung auch ökonomisch attraktiv zu machen.

Prinzipiell ist die Umsetzung der Bewegung der Meereswellen in eine mechanisch nutzbare Bewegung trivial. Wird das Prinzip des Kolbenmotors „umgedreht“, kann die Bewegung eines Schwimmkörpers auf den Wellen (der den Kol-

ben ersetzt) über einen Pleuelantrieb eine Welle in Drehung versetzen, die dann einen Generator antreibt.

Die grundsätzliche Umsetzbarkeit dieses Grundprinzips wurde bereits demonstriert /A-3/, /A-4/. Ziel von Anlagen zur Wellenenergienutzung ist damit nicht zu zeigen, dass man Wellenenergie in Strom umwandeln kann. Vielmehr muss elektrische Energie zu moderaten Kosten technisch zuverlässig bereitgestellt werden. In der Realität scheitert das bisher meist an einer Vielzahl von Anforderungen, die sich wie folgt zusammenfassen lassen.

- Die hydraulische Optimierung im Hinblick auf einen optimalen Wirkungsgrad ist unumgänglich. Wird z. B. nur die Auf- und Abbewegung genutzt, werden 50 % der in der Welle enthaltenen Energie verschenkt. Hier gibt es bereits Konstruktionsprinzipien, die grundsätzlich die Gesamtenergie nutzen könnten.
- Auch eine Optimierung auf Überlebensfähigkeit ist für eine derartige Anlagen notwendig, um auch die „Jahrhundertwelle“ zu überleben. Ein Wellenenergie-wandler ist z. B. auf die Nutzung von Wellen mit 1 m Höhe ausgelegt und erzeugt hiermit vermarktbarer Strom. Gleichzeitig muss er aber darauf ausgelegt werden, Wellen zu überstehen, die etwa zehn Mal so groß sind wie die genutzten Wellen. Das wäre in diesem Fall eine 10 m hohe Welle, die das 100-fache an Wellenenergie enthält. Dies bedingt entsprechende Konstruktionskosten.
- Die Konstruktion muss betriebssicher sein. In der Zeit, in der Wellenenergie-wandler ihren größten Nutzen haben („Herbststürme“), ist eine Wartung oder Reparatur oft über Wochen hinweg unmöglich. Fällt ein System hier aus, verschlechtert sich der Nutzen gravierend, da sich lange Stillstandzeiten ergeben.

Bei den folgenden Ausführungen wird eine Auswahl unterschiedlicher Systeme zur Nutzung der Wellenenergie diskutiert /A-5/, /A-6/. Dabei wird kein Unterschied zur Nutzung der Brandungsenergie gemacht, da sie letztlich auch aus der Wellenenergie resultiert.

A.1.1 TAPCHAN-System

Bei dem TAPCHAN (tapered channel wave energy conversion device) wird das durch die Brandung auf den Strand auflaufende Wasser über einen ansteigenden, spitz zulaufenden Kanal (TAPered CHANnel; spitz zulaufender Kanal), eine sogenannte Keilrinne, in ein erhöht liegendes Sammelbecken geleitet (Abb. A.1). Durch diese Keilrinne wird eine Konzentration der Wellen und zusätzlich eine Optimierung des Sammelwirkungsgrads für Wellen verschiedener Frequenz und aus verschiedenen Richtungen erreicht. Gleichzeitig wird in der Keilrinne die kinetische Energie der Wellen in potenzielle Energie umgewandelt; die Wellenhöhe nimmt dabei wegen der abnehmenden Breite zu und das Wasser strömt schließlich über den Keilrinnenrand in das Sammelbecken, dessen Wasserspiegel einige Meter über dem mittleren Meeresspiegel liegt. Aus diesem Speicherbecken kann das – im Vergleich zum mittleren Meeresniveau – auf einem höheren potenziellen Energieniveau gesammelte Meereswasser anschließend durch eine Turbine wieder in das Meer zurücklaufen.

Das System benötigt aufgrund des Speicherbeckens mehr Platz als die meisten anderen Wellenenergiewandlersysteme. Es kann auch aufgrund der Einlaufverluste (einschließlich der Flachwassereffekte) nur einen begrenzten Teil der anfänglich (d. h. im tiefen Wasser) zur Verfügung stehenden Energie der Welle nutzen. Durch die Abflussvergleichmäßigung des Speicherbeckens und die einsetzbare Niederdruckwasserturbine, die eine verfügbare Technologie darstellt, ist dieses System jedoch wesentlich problemloser zu betreiben als andere Systeme zur Brandungs- bzw. Wellenenergienutzung. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Systemkomponenten, die zur Energieproduktion letztlich eingesetzt werden, nicht den Bedingungen des offenen Meeres ausgesetzt sind; dies bedingt für eine solche Anlage u. a. eine längere Haltbarkeit und bessere Wartungsmöglichkeiten. Außerdem kommen keine beweglichen Teile mit den Wellen in Kontakt und die Umwandlung von kinetischer in potenzielle Energie findet durch Stahlbetonelemente statt; dadurch hält die Anlage auch schwerem Wetter stand. Vorteilhaft ist auch, dass die gesamte Anlage von Land aus zugänglich ist. Wegen der ständigen Zufuhr frischen Meerwassers besteht zusätzlich die Möglichkeit, in dem Becken eine Fischfarm zu betreiben. Ein wesentlicher Vorteil eines derartigen Wellen- oder Brandungsenergiekraftwerks mit einem spitz zulaufenden Einlaufkanal anstelle einer zu den Wellenkämmen parallelen, geraden Überlaufkante ist, dass praktisch alle Wellen irgendwann die notwendige Höhe erreichen, um über die Wände hinweg das erhöht liegende Becken zu füllen.

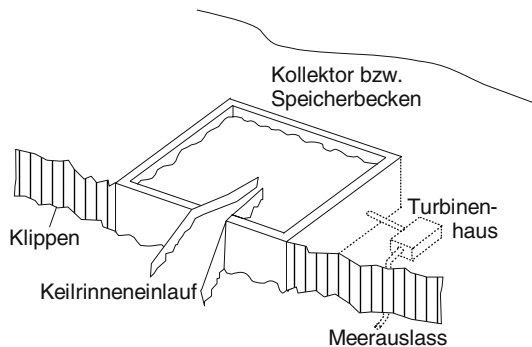


Abb. A.1 Prinzipskizze des TAPCHAN (nach /A-1/)

Die grundsätzliche Funktionsweise einer derartigen Anlage wurde bei der bereits 1986 auf Toftestallen in der Nähe von Bergen realisierten norwegischen TAPCHAN-Anlage demonstriert.

A.1.2 OWC-System

Ein weiteres System zur Nutzung der Wellen- oder Brandungsenergie wird i. Allg. als oszillierende Wassersäule bezeichnet und mit OWC (Oscillating Water Co-

lumn) abgekürzt. Es ist der aus gegenwärtiger Sicht (zumindest kurzfristig) vielversprechendste Wellenenergiewandler. Das OWC-System fand bereits 1910 Anwendung und dürfte damit vermutlich das erste genutzte Wellenenergiekraftwerk überhaupt sein. Damals wurde die Luftkompression in der Höhle einer Felsküste genutzt. Heute wird demgegenüber versucht, die Wellenbewegung in künstlich erzeugten Kammern zu nutzen. Auch wird die Technik der oszillierenden Wassersäule zur Stromerzeugung aus Meereswellen seit Jahrzehnten bei geringem Leistungsbedarf für die Energieversorgung von Leuchtböjen eingesetzt. Nachfolgend werden zunächst diese Böjen und anschließend eine auf diesem Prinzip arbeitende großtechnische Stromerzeugung diskutiert.

OWC-Böje. Die OWC-Böje basiert auf einem vertikalen Rohr, das so weit unter Wasser reicht, dass es in die nicht mehr von den Wellen bewegten Wasserschichten einmündet. Die darin eingeschlossene Wassersäule kann deshalb der Böjen- und Wellenbewegung nicht folgen; dadurch oszilliert sie gegenüber dieser. Eine im oberen über dem Wasserspiegel liegenden Bereich des Rohres eingebaute Wasser- oder Luftturbine wird durch diese Auf- und Abbewegung in Drehung versetzt und kann einen Generator zur Stromerzeugung antreiben (Abb. A.2).

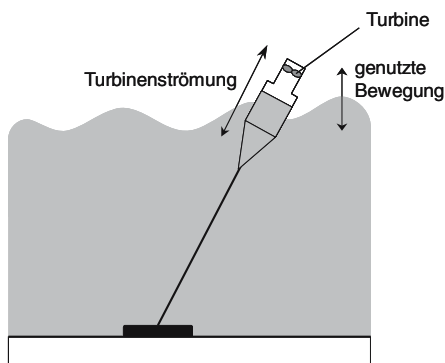


Abb. A.2 Prinzipskizze der OWC-Böje (nach /A-2/)

Ein grundsätzliches Problem von OWC-System ist die Übersetzung der langsamen Wellenbewegung in eine schnellere Bewegung, die zur Stromerzeugung genutzt werden kann. Dies ist mit entsprechenden mechanischen und hydraulischen Konstruktionen sehr aufwändig und deshalb zumindest für kleine Leistungen unwirtschaftlich. Die Übersetzung der Wellenbewegung beim OWC-System erfolgt daher über die Luft; es werden i. Allg. Wells-Turbinen verwendet.

Derartige nach dem OWC-System arbeitende Leuchtböjen haben bereits mehr als 20 Jahre Einsatz auf See überstanden. Die in den Böjen eingesetzten kleinen Luftturbinen haben sich als sehr langlebig und sehr kostengünstig herausgestellt. Das Wesentliche dabei ist, dass sich infolge der hohen Drehzahl der Turbine kein Wasser an den Kugellagern der Turbine anlagern kann und somit keine Korrosion auftritt.

OWC-Brandungsenergiekraftwerke. Bei der Suche nach Lösungen zur großmaßstäblichen Nutzung der Wellenenergie werden derzeit OWC-Wellen- bzw. OWC-Brandungsenergiekraftwerke am intensivsten erforscht. Dazu wird ein derartiges OWC-System üblicherweise als eine auf dem Meeresboden z. B. an einer Steilküste stehende Konstruktion ausgeführt. Die Energie fortschreitender Wasserwellen dringt durch eine unter dem Wasserspiegel liegende Öffnung in eine große Kammer ein und versetzt die eingeschlossene Wassersäule mit der Frequenz der Wellen in Bewegung. Die Luftmasse über dem Wasser wird durch dieses Auf und Ab des Wasserspiegels „ein- und ausgeatmet“. Die Strömungsenergie der angesaugten bzw. ausgeblasenen Umgebungsluft wird in einer geeigneten Turbine dann teilweise in elektrische Energie umgewandelt. Die Stromerzeugung ist optimal, wenn die natürliche Eigenfrequenz des Schwingungssystems, das durch Einlass, Wassersäule, Luftmasse, Turbine und Auslass gebildet wird, mit der Frequenz der ankommenden Wellen übereinstimmt.

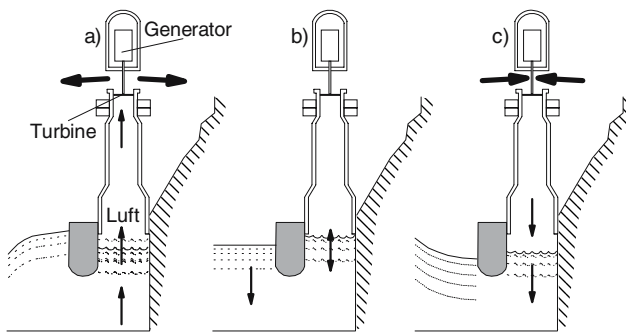


Abb. A.3 Prinzipskizze eines OWC-Brandungsenergiekraftwerks (a) ankommende Welle; b) Wellenkamm; c) ablaufende Welle; nach /A-1/)

Abb. A.3 zeigt exemplarisch eine derartige Anlage, wie sie in Nordschottland errichtet wurde. Oberhalb und unterhalb des Wasserspiegels wurde an einem geeigneten Steilküstenabschnitt der Fels teilweise weggesprengt. In die so entstandene Höhlung wurde die Luftkammer mit einem Querschnitt von 50 m^2 einbetoniert. Zwischen 3,5 und 7 m unter der normalen Seehöhe liegt die Öffnung, durch die das Wasser in die Luftkammer eindringen kann. Der Oszillationsspielraum der Wellen in der Kammer, d. h. die Differenz des Wasserstandes zwischen Wellenberg und Wellental, beträgt rund 3,5 m. Der Betonkörper der Luftkammer wurde nach oben durch einen geschlossenen Stahlzylinder verlängert. In seiner Spitze ist die mit einem Generator gekoppelte Wells-Turbine installiert. Zur Erhöhung der Energieausbeute sind dieser Anlage zwei Molen vorgelagert. Sie führen zu einer Verstärkung des Wellengangs durch Resonanz.

Für die Turbinen, die in OWC-Brandungsenergiekraftwerken Verwendung finden können, gibt es zwei konkurrierende Lösungsansätze.

- Die Turbine wird nur in einer Richtung durchströmt: Die OWC-Konstruktion muss also in der Lage sein, eine zyklisch oszillierende in eine zyklisch pulsierende Strömung umzuwandeln. Praktisch alle früh entwickelten Systeme basierten auf einer derartigen Strömungsgleichrichtung, sie wurden dann durch die Entwicklung der Turbinen, die bei wechselnder Strömungsrichtung den gleichen Drehsinn behalten, verdrängt.
- Die Turbine wird mit wechselnder Richtung durchströmt: Es muss also eine Konstruktion gefunden werden, die trotzdem gleichbleibend in eine Richtung angetrieben wird. Der schlechte Wirkungsgrad der wechselnd durchströmbaren Turbinen – bei denen heute praktisch nur noch die nach ihrem Erfinder benannte Wells-Turbine verwendet wird – war bisher trotz hohen Aufwands nur begrenzt zu steigern. Dennoch sind heute alle derartigen Kraftwerke mit einer solchen Wells-Turbine ausgestattet, da die dauerhafte Funktion von Ventilen, die unter Meeresbedingungen mit einer Periode von rund 10 s öffnen und schließen müssen, für problematisch erachtet wird.

A.1.3 Weitere Ansätze

In der Vergangenheit wurden eine Reihe weiterer Systeme konzipiert, mit denen die Wellenenergie grundsätzlich nutzbar sein sollte. Sie konnten sich aber bisher nicht am Markt durchsetzen. Trotzdem werden einige dieser Überlegungen nachfolgend kurz diskutiert.

Das Cockerell-Floß besteht aus gelenkig gekoppelten, pontonähnlichen Schwimmkörpern. Dazu sind zwischen jeweils zwei dieser miteinander verbundenen Körper, gewissermaßen die Gelenkverbindung überbrückend, Kolbenpumpen angeordnet, mit denen ein Arbeitsmedium – Wasser oder Luft – verdichtet wird. Dieses treibt dann einen Turbinengenerator zur Erzeugung von elektrischer Energie an (Abb. A.4). Anlagen dieses Typs sind bisher nur in der Entwurfsphase bzw. als Minimodell bekannt geworden /A-6/. Aus gegenwärtiger Sicht ist nicht zu erwarten, dass derartige Überlegungen jemals eine großtechnische Bedeutung erlangen könnten.

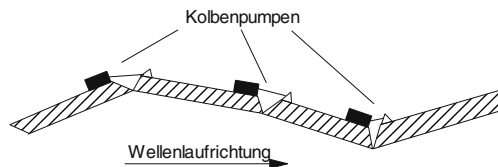


Abb. A.4 Prinzipskizze eines Cockerell-Floßes (nach /A-5/, /A-6/)

Beim Salter-Wellenenergiewandler sollen zahlreiche, um eine horizontale Achse drehbar gelagerte, schwimmfähige Körper mit Schaufelform nebeneinander aufgereiht werden (Abb. A.5). Das gesamte System wird mittels Trägerstrukturen so auf dem Meeresboden verankert, dass die Schaufeln im halbgetauchten Zustand

arbeiten. Sie werden von den anlaufenden Wellen in deren Fortpflanzungsrichtung bewegt, wobei sie sich aufrichten. Ist die Welle unter ihnen hindurchgelaufen, kehren sie in ihre Ausgangsposition zurück. Die Schaufeln führen also im Rhythmus der Wellenperiode eine ständige Nickbewegung aus. Über die in ihrem Inneren angeordneten gratartigen Erhebungen, die sich abwechselnd auf der Außenfläche eines Zylinders und auf der Innenfläche eines diesen Zylinder umhüllenden Hohlkörpers befinden, wird diese Bewegung auf ein Arbeitsmedium übertragen. Dieses wird verdichtet und treibt eine Turbine und damit einen Generator an /A-6/. Auch hier ist aus gegenwärtiger Sicht nicht absehbar, dass dieses System jemals eine weitergehende Bedeutung erlangen oder gar großtechnisch eingesetzt werden könnte, zumal das TAPCHAN- und das OWC-System deutlich vielversprechender sind.

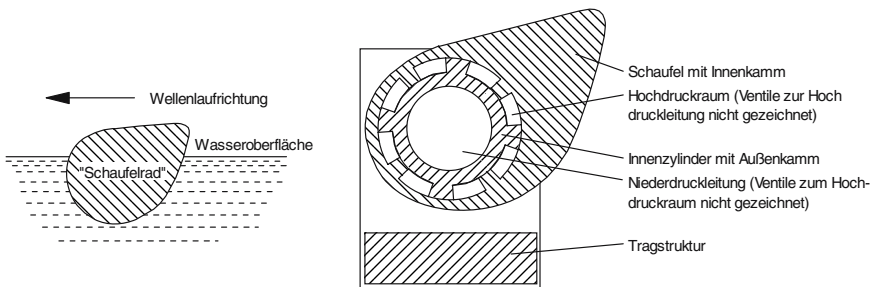


Abb. A.5 Prinzipskizze eines Salter-Wellenenergiewandlers (links: Prinzip; rechts: grundsätzlicher Aufbau; nach /A-5/, /A-6/)

A.2 Gezeitennutzung

Die auf die Erde einwirkenden Massenanziehungskräfte des Mondes und der Sonne führen, verbunden mit der Erdrotation (d. h. Planetenbewegung und –gravitation; vgl. Kapitel 2), zu periodischen Wasserstandsänderungen der Weltmeere. Die Gezeitenwelle macht im offenen Meer aber nur wenig mehr als 1 m Höhenunterschied aus. Die Festlandmassen hingegen wirken bremsend auf die Gezeitenwelle und erzeugen an den Ufergebieten einen Aufstau, sodass in Extremfällen Wasserstandsänderungen von 10 m und mehr zustande kommen können. An bestimmten Küstenregionen wie Meeresbuchten oder Flussmündungen kann es deshalb zu einem Tidenhub – u. a. infolge von Resonanzerscheinungen und Trichterwirkungen – von z. T. bis zu 20 m kommen.

Grundsätzlich sind damit zwei Arten der Energiegewinnung aus dem Meer denkbar: die Nutzung der potenziellen Energie eines Aufstaus durch Gezeitenkraftwerke und die Nutzung der Strömungsenergie. Beide Varianten werden nachfolgend kurz diskutiert.

A.2.1 Gezeitenkraftwerke

Die Nutzung der potenziellen Gezeitenenergie, also des Tidenhubs, kann auf verschiedene Weise erfolgen.

Die einfachste Methode ist das Ein-Becken-System mit Einwegnutzung (Abb. A.6, oben). Hierzu wird eine Bucht durch einen Damm vom Meer abgetrennt; sie ist sowohl durch eine Schleuse als auch durch eine Turbine mit dem Meer verbunden. Die Regelung von Turbine und Schleuse ist derart, dass das Wasser nur durch die Schleuse in die Bucht einströmt und nur durch die Turbine des Krafthauses wieder aus der Bucht herausströmen kann; in einem derartigen Krafthaus wird die Energie des Wassers mit Hilfe der Turbine in mechanische Energie und dann mit einem Generator in elektrische Energie umgewandelt. Nachteil dieser Konstruktion ist die nur im Verlauf vergleichsweise kurzer Zeiträume mögliche Energieproduktion (Abb. A.6, oben). Vorteil ist demgegenüber die einfache Turbinenkonstruktion.

Alternativ dazu kann aber auch eine Turbine verwendet werden, die in beiden Richtungen durchströmt werden kann und hierbei Strom produziert (Abb. A.6, Mitte). Die ebenfalls vorhandene Schleuse dient hier dazu, das Ein- und Ausströmen des Wassers in den Zeiten, in denen nahezu kein Höhenunterschied zwischen Becken und Meer besteht, zu beschleunigen. Dadurch kann über wesentlich längere Zeiträume Strom erzeugt werden. Die insgesamt erzeugte Energie wird jedoch durch den bei Ein- und Ausströmung durch die Turbine vergrößerten Widerstand verringert.

Als weitere mögliche Konstruktion eines Gezeitenkraftwerkes ist auch eine Zwei-Becken-Lösung denkbar (Abb. A.6, unten). Hierbei befindet sich die Turbine in einem Damm oder in einem Verbindungskanal zwischen zwei Becken, die mit dem Meer in Verbindung stehen. Das Ein- und Ausströmen des Wassers in die beiden Becken wird so geregelt, dass das Wasser durch die Tide in ein Becken einströmt und bei Ebbe aus dem anderen Becken ausströmt, nachdem es zwischenzeitlich die entsprechenden Turbinen passiert hat. Hierdurch kann die Energieproduktion noch weiter gleichmäßig gemacht werden. Dem steht jedoch ein erhöhter Platzbedarf für die Erstellung der beiden Becken gegenüber.

Die Errichtung derartiger Anlagen mit Speicherbecken, in denen die Wassermassen zwischengespeichert werden, bis sich außerhalb des Beckens wieder ein niedrigerer Wasserstand eingestellt hat, scheitert meist an den Kosten und den zu großen Umweltauswirkungen dieser sehr flächenintensiven Konstruktionen. Derzeit werden deshalb weltweit nur wenige Gezeitenkraftwerke betrieben; u. a. sind ein Kraftwerk an der Rance-Mündung bei St. Malo in Frankreich seit 1966, ein russisches Kraftwerk in Koslogubsk, eine kanadische Prototypanlage von 20 MW an der Fundy-Bay seit Ende 1984 sowie zwei Anlagen in China in Betrieb. Nur das erstgenannte kann als Prototyp eines größeren Gezeitenkraftwerks angesehen werden. Bei einem mittleren Tidenhub von rund 8,5 m sind hier 240 MW installiert.

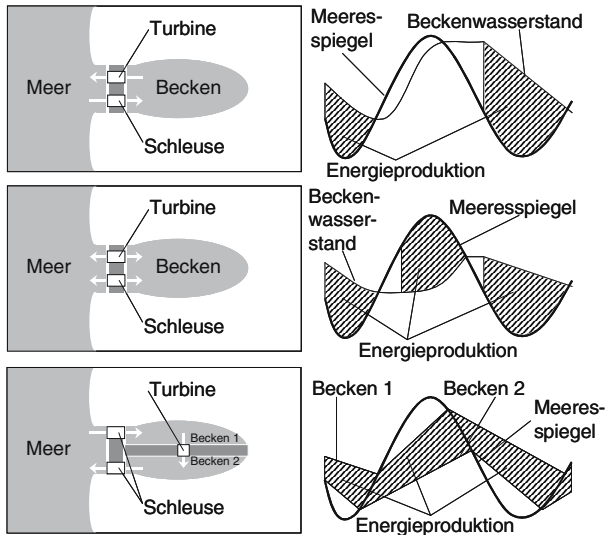


Abb. A.6 Prinzipien von Gezeitenkraftwerken (oben: Ein-Becken-Gezeitenkraftwerk mit Nutzung einer Strömungsrichtung; Mitte: Ein-Becken-Gezeitenkraftwerk mit Nutzung gegenläufiger Strömungsrichtungen; unten: Zwei-Becken-Gezeitenkraftwerk; nach /A-2/)

Insgesamt erscheint das technische Potenzial von Gezeitenkraftwerken weltweit gesehen zu gering, als dass sie jemals wesentlich zur globalen Energieversorgung beitragen könnten; lokal könnte dies unter günstigen Bedingungen jedoch anders sein. In Deutschland ist die Errichtung derartiger Anlagen aus technischen Gründen nicht möglich (zu geringer mittlerer Tidenhub an der Nordseeküste).

A.2.2 Nutzung von Ebb- und Flutstrom

Da die Nutzung der Gezeitenenergie unter Abschluss z. B. eines Meeresteils oder einer Bucht durch ein Dammbauwerk einen großen Eingriff in die natürliche Umwelt darstellt, werden jüngst Varianten verfolgt, die auf der Nutzung von Meeresströmungen – und damit der Wasserbewegungen, die mit Ebbe und Flut einhergehen – basieren. Solchen Systemen steht jedoch die vergleichsweise geringe Energiedichte derartiger Strömungen entgegen.

Da nur geringe Druckunterschiede, relativ geringe Strömungsgeschwindigkeiten, aber große Strömungsquerschnitte zu nutzen wären, müssen zur Nutzung von Ebb- und Flutstrom Turbinen entwickelt werden, wie z. B. in der Art von großen Savonius- oder Darrieus-Rotoren, die unter diesen Bedingungen zufriedenstellend arbeiten. Abb. A.7 zeigt exemplarisch einer entsprechende Projektstudie im Vergleich zu einer Offshore-Windkraftanlage (vgl. Kapitel 6.2).

Für die Gezeitenströmung, wie für jede andere Strömung, kann die Leistung P_{wa} des durch einen bekannten Querschnitt (hier den Rotorquerschnitt) strömen-

den Meerwassers nach Gleichung (A.1) analog wie bei einer Windkraftanlage aus der Dichte des Wassers ρ_{Wa} , dem Strömungsquerschnitt S_{Rot} und der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers v_{Wa} in der dritten Potenz berechnet werden.

$$P_{Wa} = \frac{1}{2} \rho_{Wa} S_{Rot} v_{Wa}^3 \quad (\text{A.1})$$

Demnach ist es immer dann sinnvoll, die Leistung eines Ebb- und Flutstroms auszunutzen, wenn ausreichende Strömungsgeschwindigkeiten zur Verfügung stehen. Danach steigt beispielsweise die Leistung der Wasserströmung von $0,5 \text{ W/m}^2$ bei einer Geschwindigkeit von $0,1 \text{ m/s}$ auf $4\,000 \text{ W/m}^2$ bei 2 m/s .

Die Nutzung der reinen durch die Tide erzeugten Gezeitenströmungen scheiterten bis jetzt an der Unausführbarkeit der geplanten riesigen Turbinen.

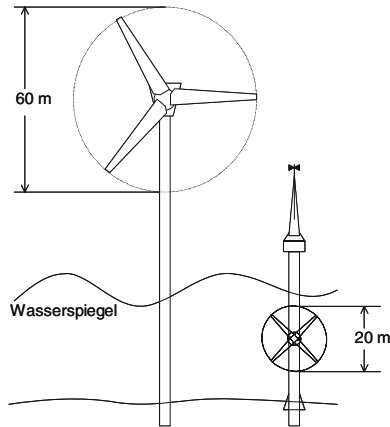


Abb. A.7 Prinzip eines Meeresströmungsrotors im Vergleich zu einer Offshore-Windkraftanlage (nach /A-7/)

A.3 Weitere Nutzungsmöglichkeiten

Neben den bisher diskutierten Optionen sind grundsätzlich weitere Möglichkeiten vorhanden, die in den Meeren gespeicherte Energie zur Stromerzeugung nutzbar zu machen. Diese werden nachfolgend kurz diskutiert.

A.3.1 Unterschiedliche Wassertemperaturen

Der größte Teil solarer Strahlungsenergie wird in der Atmosphäre und in den festen und flüssigen Bestandteilen der Erdoberfläche in Form von Wärme gespeichert. Etwa 20 % der gesamten eingestrahnten Solarenergie wird allein in den tro-

pischen Weltmeeren in Wärme umgewandelt. Diese Wärme ist grundsätzlich technisch nutzbar zu machen. Infolge der erheblichen Wasserflächen, die im Äquatorialgürtel der Erde liegen, ist das theoretische Potenzial dieser Option jedoch vergleichsweise hoch.

Abb. A.8 zeigt den typischen Verlauf der Wassertemperaturen in den äquatorialen Ozeanen über die Wassertiefe. Demnach schwankt die Temperatur (im Jahresverlauf) nur in oberflächennahen Bereichen. In den tieferen Wasserschichten ist die Temperatur über das Jahr konstant und gegenüber der Oberfläche relativ niedrig.

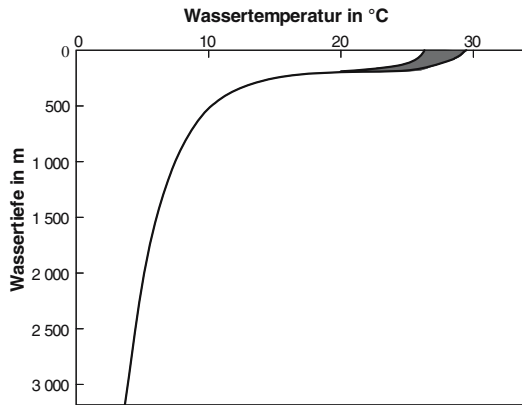


Abb. A.8 Temperaturverlauf über die Meerestiefe, vereinfachte Darstellung (nach /A-2/)

Diese Wärmeenergie könnte dabei grundsätzlich über offene oder geschlossene Rankine-Prozesse (ORC-Prozesse) zur Stromerzeugung genutzt werden. Damit ist die Temperaturdifferenz zwischen dem warmen Oberflächenwasser von maximal 22 bis rund 28 °C und dem kalten Tiefenwasser von rund 4 bis 7 °C nutzbar (Abb. A.9). Dabei ist der Wirkungsgrad von Kreisprozessen abhängig von der nutzbaren Temperaturdifferenz. Deshalb sind mit derartigen Anlagen – wegen der geringen verfügbaren Temperaturdifferenzen von etwa 20 K – nur sehr kleine Wirkungsgrade von 1 bis maximal 3 % technisch möglich. Dazu sind aber sehr große Volumenströme umzuwälzen. Zudem muss das Wasser aus großen Tiefen an die Meeresoberfläche transportiert werden bzw. umgekehrt; dies bedingt aufwändige Konstruktionen.

Der Einsatz von Meereswärmekraftwerken ist aus Energietransportgründen zudem meist auf küstennahe Gebiete eingeschränkt; dabei muss jedoch auch ein nahegelegener Zugang zum kalten Tiefenwasser gegeben sein, das für den Kreisprozess benötigt wird.

Die relativ geringe Energieausbeute bei den großen zu bewegenden Energieströmen ist mit der wesentliche Grund, weswegen diese Technik, die i. Allg. als OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) bezeichnet wird, bis heute nicht wirtschaftlich einzusetzen ist. Auch gibt es für den erfolgreichen Betrieb derartiger

Meereswärmekraftwerke noch eine Fülle technischer Probleme zu lösen, die ihren Einsatz in den sonnenbegünstigten Zonen der Erde in absehbarer Zeit nicht erwarten lassen.

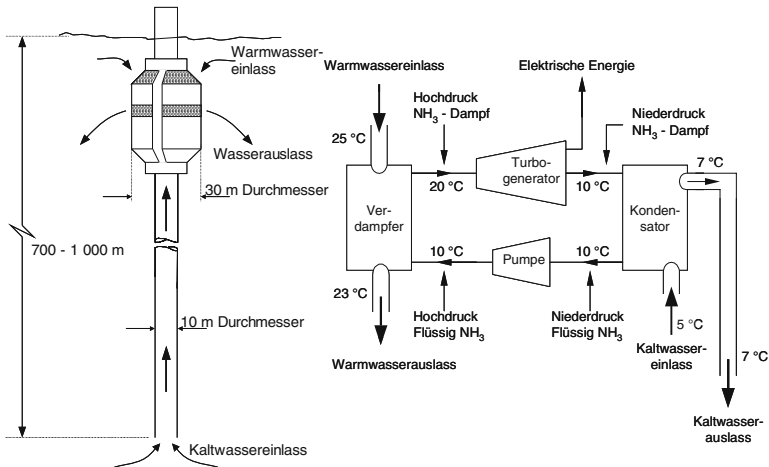


Abb. A.9 Beispiel für eine OTEC-Anlage (nach /A-1/)

Eine Abwandlung dieser Techniken für Landschaften, in denen sowohl kalte Meeresströme als auch geothermale Energie zur Verfügung stehen, wurde in jüngerer Zeit vorgestellt; hier wird die warme Umgebung vulkanischer Strukturen gegenüber dem kalten Meerwasser ausgenutzt. Aber auch hier ist eine schnelle Umsetzung vor dem Hintergrund der doch erheblichen technischen Probleme eher unwahrscheinlich.

A.3.2 Meeresströmungen

Die Nutzung der durch die unterschiedliche Wärmebilanz der Ozeane erzeugten Meeresströmungen ist ebenfalls möglich; dies erscheint insbesondere an entsprechenden Meeresengen sinnvoll, wo entsprechende Strömungsgeschwindigkeiten gegeben sind.

Beispielsweise weist der Floridastrom an seiner schmalsten Stelle eine Breite von 80 km auf. Hier beträgt der Wasserdurchsatz zwischen 20 und 30 Mio. m^3/s bei einer mittleren Geschwindigkeit von 0,9 m/s. Aus einem derartigen Meeresstrom von 50 km mittlerer Breite und einer mittleren Tiefe von 120 m bei einer Geschwindigkeit im Kern der Strömung von etwa 2 m/s könnte durch entsprechende Umwandlungsanlagen eine elektrische Leistung von etwa 2 000 MW erschlossen werden /A-6/. Aus der geringen Geschwindigkeit der Meeresströmung ergibt sich jedoch auch eine geringe Energiedichte. Sie liegt selbst in dessen Kern nicht über $2,2 \text{ kW}/\text{m}^2$. Daraus folgt, dass entsprechende Konversionsanlagen be-

trächtliche Ausmaße aufweisen müssen. Grundsätzlich entspricht die Nutzung dieser regenerativen Energie damit der zur Nutzung von Tideströmungen.

Da nur geringe Druckunterschiede, aber relativ große Strömungsgeschwindigkeiten zu nutzen wären, müssen hierfür Turbinen entwickelt werden (z. B. in der Art von Rotoren von Windkraftanlagen; Abb. A.7), die unter diesen Bedingungen zufriedenstellend arbeiten. In der Funktionsweise ähneln deshalb die meisten der bisher für Meeresströmungskraftwerke konzipierten Turbinen riesigen Windkraftanlagen. Der Wind wird durch die Meeresströmung ersetzt, wobei die Turbinenflügel, bedingt durch die geringe Strömungsgeschwindigkeit, nur zwei bis drei Umläufe pro Minute ausführen. Infolge der geringen Energiedichte beinhalten fast alle bisherigen Vorschläge Turbinen von 150 m Durchmesser oder mehr, die aber technisch noch nicht realisiert wurden.

Abweichend von diesen Konzepten wurde vor längerer Zeit bereits ein „Energiewandler für langsame Wasserströmungen“ vorgelegt mit „Seefallschirmen“ aus hochfestem Material, die in großer Zahl an einer umlaufenden Seilschleife angeordnet sind /A-8/. Das Seil mit den Schirmen läuft am unteren Ende über eine auf dem Meeresboden verankerte Seilscheibe, die mit dem Generator gekoppelt ist. Die Fallschirme mit einem Kappendurchmesser bis zu 100 m sollen durch die Meeresströmung aufgebläht und dann mit dieser vorangetrieben werden. Ist der obere Scheitelpunkt der bei großen Anlagen z. B. etwa 18 km langen Seilschleife überschritten, klappen die Schirme wegen des nun fehlenden Staudrucks der Strömung zusammen und werden in dieser Lage, gegen die Strömung, zum unteren Ende der Seilschleife gezogen. Allerdings müssen sie dazu durch eine entsprechende Vorrichtung in ihrer zusammengeklappten Position gehalten werden, da sie sich sonst beim Zurückziehen, wegen des Strömungsstaus in der Schirmkappe, wieder öffnen und damit das gesamte System abbremsten würden. Nach Durchlaufen der Seilscheibe kommen die Schirme wieder in die Strömung, blähen sich auf, und der eben beschriebene Ablauf beginnt erneut. Eine Versuchsanlage existiert bisher noch nicht und es ist fraglich, ob sich dieses Konzept aufgrund grundsätzlicher technischer Probleme jemals durchsetzen wird.

Für die Nutzung der vergleichsweise hohen Meeresströmungsgeschwindigkeit in der Straße von Messina (Meerenge zwischen Süditalien und Sizilien) zwischen Ganzirri und Punta Pezzo wurde der in Abb. A.10 dargestellte Vorschlag erarbeitet. Insgesamt geht man hier von der Installation von 100 Turbinen des dargestellten Typs aus, die etwa 100 m unter der Wasseroberfläche installiert werden sollen; hier erreicht die Strömung die höchsten Geschwindigkeiten. Bisher ist aber auch hier noch nicht klar, ob die damit verbundenen technischen Probleme gelöst werden können.

Aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen muss jedoch generell bezweifelt werden, ob jemals ein Meeresströmungskraftwerk in Betrieb gehen wird. Zum Einen gehen die bisher vorliegenden Projektstudien von sehr hohen Investitionen aus. Zum Anderen sind die möglichen Umweltfolgen, die sich aus dem Betrieb eines großen Meeresströmungskraftwerks ergeben könnten, beachtlich; z. B. könnte dadurch der entsprechende Meeresstrom umgeleitet werden (z. B. könnte sich

durch eine Umleitung des Golfstroms das Klima in Europa grundlegend ändern). In Anbetracht der zusätzlich sehr großen technischen Schwierigkeiten, die mit einer Nutzung von Meeresströmungen verbunden sind, dürfte deshalb diese regenerative Energie aus gegenwärtiger Sicht kaum jemals zur Energiebedarfsdeckung herangezogen werden.

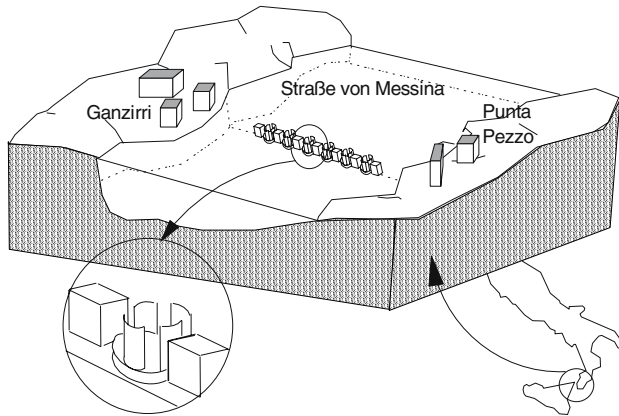


Abb. A.10 Konzeptstudie eines Meeresströmungskraftwerks für die Straße von Messina (nach /A-1/)

A.3.3 Salzgehaltsunterschiede

Der globale Wasserkreislauf führt zur Erzeugung von großen Mengen Süßwassers, die sich zuletzt, wenn sich bei der Mündung der Flüsse ins Meer der Wasserkreislauf schließt, wieder mit Salzwasser vermischen. Die Abtrennung des Süßwassers vom Salzwasser erfordert Energie, die in den entmischten Wassermengen gespeichert ist. Es gibt Vorschläge, diese an den Mündungen der Flüsse ins Meer durch die Vermischung von Salz- und Süßwasser wieder frei werdende Energie zu nutzen. Im Prinzip kann man (über den Effekt des osmotischen Drucks) diese chemische Energie in potenzielle Energie umsetzen und diese (durch Wasserkraftwerke) in elektrische Energie umwandeln. Trotz des an sich einfachen Prinzips ist das bisher technisch jedoch eine Utopie, da die dazu notwendigen semipermeablen Membranen nicht verfügbar sind.

A.3.4 Wasserverdunstung

Im Rahmen des globalen Wasserkreislaufs verdunstet Wasser auf Meeresniveau und steigt in große Höhen, wo es bei niedrigeren Temperaturen zu Tropfen kondensiert und wieder herabfällt. Bei diesem System zur Energiegewinnung wird

dieser Kreislauf in einem gigantischen, auf dem Meer installierten Turm realisiert (sogenannter Mega-Power-Tower /A-9/). Dabei wird das Wasser durch eine andere Flüssigkeit ersetzt; beispielsweise eignet sich dazu Ammoniak (NH_3), da dieser Stoff schon bei niedrigeren Temperaturen als Wasser verdunstet und außerdem weniger Wärmeenergie zum Aufrechterhalten des Kreislaufs benötigt wird. Durch die Verdunstung nimmt das Ammoniak Wärmeenergie aus dem Meer auf und verdunstet. Der Ammoniakdampf steigt im Turm hoch und kondensiert an der Turmspitze in der Kälte der oberen Atmosphäre. Das jetzt flüssige Ammoniak fällt wieder zu Boden, wobei es entsprechende Turbinen antreibt, die elektrischen Strom liefern.

In der einfachsten Version ist der Turm 5 km hoch, hat einen Basisdurchmesser von 200 m und eine aufsteigende Röhre von 50 m Durchmesser. Diese große Höhe ist notwendig, um einen ausreichenden Temperaturunterschied zwischen Basis und Spitze zu erhalten, damit der Flüssigkeitskreislauf in Gang kommt und erhalten werden kann. An der Basis und der Spitze des Turms fangen riesige Behälter die niedergefallene bzw. verdunstete Flüssigkeit auf.

Um das Gewicht des Turms zu minimieren, möchte man einen Baustoff verwenden, der aus einem Plastikkern mit beidseitigem Aluminiummantel besteht. Eine solche Konstruktion wäre zwar rund 400 000 t schwer, würde aber dennoch nur etwa 1,5 m in das Meer eintauchen. Denn riesige, mit Wasserstoff gefüllte Tanks, die in verschiedenen Höhen in den Turm integriert werden, sollen – ähnlich gasgefüllten Luftballons – dem Turm Auftrieb verleihen und ihn aufrecht halten. Mittels 30 cm dicken und bis zu 8 km langen Tauen ließe sich die Konstruktion dann an drei Stellen „sicher“ fixieren.

In einer zweiten Version wurde das Modell eines 7,5 km hohen Turms entworfen. Die Durchmesser der einzelnen Abschnitte wären bei einer solchen Dimensionierung an der Basis rund 2 500 m, an der Röhre etwa 750 m und am Kondensatorteller an der Spitze ca. 1 200 m.

Beide Konstruktionen können auch starken Winden standhalten. Modelluntersuchungen zeigen, dass bei der kleineren bzw. größeren Version Abweichungen von etwa 344 bzw. rund 57 m an der Turmspitze auftreten. Dies liegt in dem enormen Gewicht des Kondensatortellers begründet, der die darunter liegende Röhre stabilisiert (vgl. /A-9/).

Bisher ist diese Idee jedoch noch nicht über das Konzeptstadium hinausgekommen. Es ist auch nicht zu erwarten, dass diese Option in der übersehbaren Zukunft einen merklichen Beitrag zur Deckung der Stromnachfrage wird leisten können.

Anhang B – Solarthermische Stromerzeugung

Unter dem Begriff „solarthermische Kraftwerke“ werden hier Anlagen zusammengefasst, die Solarstrahlung in Wärme wandeln, diese dann in einem thermodynamischen Kreisprozess nutzen und damit elektrische Energie bereitstellen. Dabei wird unterschieden zwischen Anlagen, die das Sonnenlicht konzentrieren (Turm-Solkraftwerke, Dish/Stirling- bzw. Dish/Brayton-Anlagen, Parabolrinnen- bzw. Farmanlagen) und Anlagen, welche die Sonnenenergie nicht konzentrieren (Aufwindkraftwerke, Solarteiche) /B-3/, /B-61/.

Allen konzentrierenden solarthermischen Stromerzeugungstechnologien ist gemeinsam, dass der letzte Schritt der Energiewandlung weitgehend wie bei mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerken abläuft: Heißes Gas oder Dampf wird verwendet, um eine Turbine, einen Stirlingmotor, oder allgemein eine Wärme-Kraft-Maschine zu betreiben, welche wiederum einen Generator antreibt, der die letztlich gewollte elektrische Energie bereitstellt. Deshalb wird hier nur auf den solarspezifischen Teil solcher Kraftwerke detaillierter eingegangen. Eine Beschreibung der konventionellen Kraftwerkstechnik bleibt außerhalb der hier diskutierten Betrachtungen.

B.1 Grundlagen und Einteilung

Grundlagen der Energiewandlung. Die typischen Schritte der Energiewandlung in solarthermischen Anlagen können wie folgt zusammengefasst werden.

- Sammeln der solaren Strahlung mit Hilfe eines Kollektorsystems.
- Ggf. Konzentrieren der Strahlung auf einen Strahlungsempfänger (Receiver).
- Umwandeln der Strahlungsenergie in Wärme im Receiver.
- Transport der thermischen Energie zur Energiewandlereinheit.
- Umwandeln der thermischen Energie in mechanische Energie mit Hilfe einer Wärme-Kraft-Maschine (z. B. Dampfturbine, Stirlingmotor).
- Umwandeln der mechanischen Energie in elektrische Energie durch einen Generator.

In Abb. B.1 ist die beschriebene grundsätzliche Energiewandlungskette der solarthermischen Stromerzeugung dargestellt.

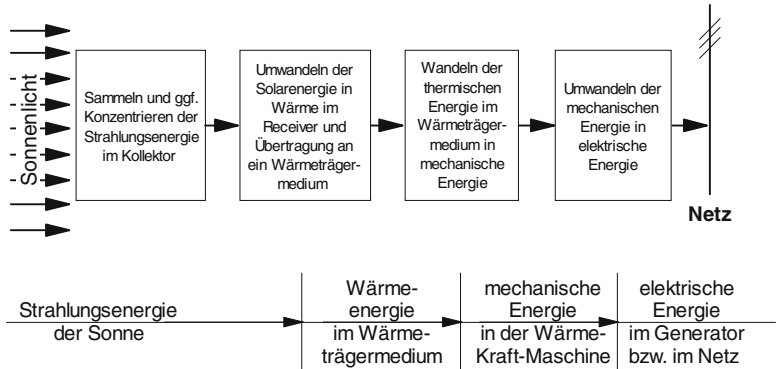


Abb. B.1 Energiewandlungskette bei der solarthermischen Stromerzeugung

Einteilung. Solarthermische Kraftwerke lassen sich nach der Art der Konzentration in konzentrierende und nicht konzentrierende Systeme unterteilen. Erstere werden weiter untergliedert in punkt- und linienkonzentrierende Anlagen. Zusätzlich ist eine weitere Unterteilung z. B. nach Art der verwendeten Strahlungsempfänger, den eingesetzten Wärmeübertragermedien, den ggf. verwendeten Speichern oder der Zusatzfeuerungen auf der Basis fossiler Energieträger möglich; aus Übersichtlichkeitsgründen wird darauf hier verzichtet.

Tabelle B.1 Kennzahlen ausgewählter solarthermischer Stromerzeugungstechniken

	Turm-Solar-KW	Dish/Stirling-KW Dish/Brayton-KW	Parabolrinnen-KW	Solarteich-KW	Aufwind-KW
Typ. elektr. Leistung in MW	30 – 200 ^a	0,01 – 1 ^b	30 – 100 ^c	0,2 – 5	30 – 200 ^d
Konzentrationsfaktor	600 – 1 000	1 500 – 3 000	50 – 90	1	1
Typ. Wirkungsgrad ^e in %	13 – 15	15 – 17	13 – 15	1	0,7 – 1,2
Typ. Betriebsart	netzgekoppelt	Inselbetrieb (oder netzgekoppelt)	netzgekoppelt	netzgekoppelt	netzgekoppelt
Flächenbindung in m ² /kW ^f	20	20	17	50 – 200	125 – 200
Entwicklungsstand ^g	+	+	++	+	+

^a größte bisher realisierte Anlage 10 MW; ^b durch Zusammenschalten vieler Einzelanlagen zu einer Farm; ^c größte bisher realisierte Anlage 80 MW; ^d bisher nur Versuchsanlage mit 50 kW; ^e Umwandlung von Strahlungsenergie in elektrische Energie, Jahresmittelwert vom Standort abhängig; ^f stark abhängig von Volllaststundenzahl bzw. solarem Vielfachen (hier 1 (Richtwert); solares Vielfaches: um diesen Faktor ist die Konzentratorfläche größer als bei maximaler Einstrahlung für das Erreichen der Nennleistung erforderlich; dadurch wird die Nennleistung bereits bei geringerer Einstrahlung erreicht); ^g + erfolgreicher Betrieb von Demonstrationsanlagen, ++ kommerzielle Anlagen in Betrieb; KW Kraftwerk.

Unter den konzentrierenden Systemen werden im Wesentlichen die folgenden Kraftwerkskonzepte zusammengefasst (Tabelle B.1):

- Turm-Solkraftwerk als punktkonzentrierende Anlage,
- Dish/Stirling- bzw. Dish/Brayton-Systeme als punktkonzentrierende Anlage und
- Parabolrinnen- oder Farmkraftwerk als linienkonzentrierende Anlage.

Zu den nicht konzentrierenden Anlagen werden das Aufwindkraftwerk und der Solarteich gezählt. Tabelle B.1 zeigt Kennzahlen dieser unterschiedlichen Stromerzeugungstechniken /B-2/, /B-3/, /B-21/, /B-42/, /B-52/, /B-61/. Demnach unterscheiden sich die einzelnen Systeme erheblich bezüglich u. a. der installierten Leistungen, der Konzentrationsfaktoren und des gegenwärtigen Standes der Technik.

B.2 Turm-Solarkraftwerke

Bei solarthermischen Turmkraftwerken (Abb. B.2) reflektieren zweiachsig dem Lauf der Sonne nachgeführte Spiegel, sogenannte Heliostaten, die direkte Solarstrahlung (d. h. nur den direkten Strahlungsanteil der Globalstrahlung) auf einen zentral auf einem Turm angebrachten Strahlungsempfänger. Dort wird die Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt und an ein Wärmetransportfluid (z. B. Luft, flüssiges Salz, Wasser/Dampf) übertragen. Diese Wärme wird verwendet, um eine Turbine und damit einen Generator über einen konventionellen Dampfprozess anzutreiben /B-35/. Um konstante Dampfparameter und einen konstanten Dampfmassenstrom auch bei schwankender solarer Einstrahlung zu gewährleisten, kann entweder ein Wärmespeicher in das System integriert oder eine Zufeuerung mit fossilen Energieträgern (z. B. Erdgas) realisiert werden.

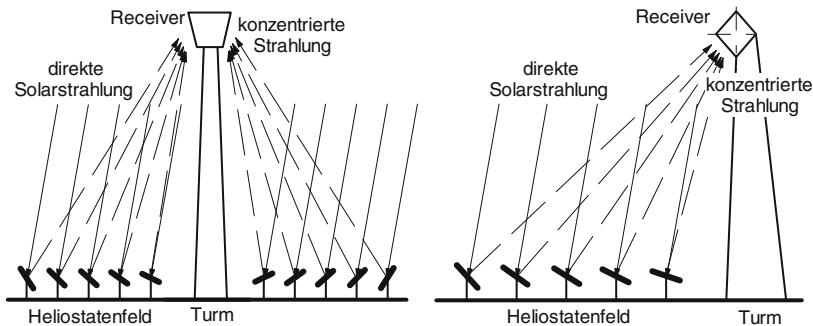


Abb. B.2 Funktionsprinzip eines Turm-Solarkraftwerkes (links: Zentralfeld, rechts: Nordfeld bzw. Südfeld auf der südlichen Erdhalbkugel; Darstellung nicht maßstäblich)

Ein Turm-Solarkraftwerk besteht grundsätzlich aus den folgenden Systemkomponenten:

- Heliostatenfeld mit vielen einzelnen Heliostaten,
- Strahlungsempfänger auf einem meist zentral innerhalb des Heliostatenfeldes angeordneten Turm,
- Wärmeträgerkreislauf mit Turbosatz (Dampferzeuger, Turbine und Generator) und Kondensator,
- Steuerung und Regelung, sowie ggf.

– Energiespeicher und/oder Zusatzfeuerung auf der Basis fossiler Energieträger. Diese verschiedenen Komponenten werden nachfolgend diskutiert. Ausgehend davon wird dann auf daraus resultierende Gesamtsysteme eingegangen.

B.2.1 Komponenten

Heliostatenfeld. Das Heliostatenfeld besteht aus einer Vielzahl (mehrere hundert bis einige tausend) von einzelnen Heliostaten. Heliostaten sind Spiegel, die durch ihre zweiachsige Nachführung immer so ausgerichtet werden, dass sie das Sonnenlicht auf einen definierten Punkt im Raum – normalerweise den Receiver – konzentrieren. Sie bestehen aus einer das Sonnenlicht reflektierenden (und üblicherweise konzentrierenden) Fläche, einer Nachführeinheit mit den Antriebsmotoren, dem Fundament und einer Steuerelektronik. Der jeweilige Sollwinkel für Azimut und Elevation wird üblicherweise von einem Rechner basierend auf dem aktuellen Sonnenstand, der räumlichen Position der Heliostaten und des Zielpunktes bestimmt. Dieser Sollwert wird dann über eine Kommunikationsleitung an die jeweiligen Stellmotoren übermittelt. Die Aktualisierung erfolgt im Abstand von jeweils einigen Sekunden. Übliche Heliostaten haben heute Konzentratorflächen zwischen 20 und 150 m² /B-1/, /B-9/, /B-23/, /B-58/, /B-59/, /B-61/; bisher wurden maximal 200 m² realisiert /B-50/.

Das Heliostatenfeld verursacht über die Hälfte der Kosten des solaren Anlagen teils. Deshalb wurden und werden große Anstrengungen unternommen, Heliostaten mit guter optischer Qualität, hoher Zuverlässigkeit, langer Lebensdauer und gleichzeitig niedrigen flächenspezifischen Kosten zu entwickeln. Aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen dabei geht der Trend zu großen Heliostaten mit Flächen zwischen 100 und 200 m² und ggf. darüber. Es gibt aber auch Ansätze, kleinere Heliostaten zu fertigen, um die Kosten durch die rationellere Fertigung großer Stückzahlen senken zu können.

Ausgehend von den Entwicklungen der letzten Jahre kann zwischen facettierten Glas-Metall- und Membran-Heliostaten als wesentliche Haupttypen unterschieden werden.

Facettierte Glas-Metall-Heliostaten. Ein derartiger Konzentrator besteht üblicherweise aus einer auf einem Trägerrohr montierten Fachwerkstruktur, an der sich eine Vielzahl von typischerweise etwa 2 bis 3 m² großen rechteckigen Einzelspiegeln, den sogenannten Facetten, befindet. Die Nachführeinheit besteht aus einem am Fundament angeschraubten Stahlrohr mit darauf montiertem Azimut-/Elevationsgetriebe, an welchem wiederum das Trägerrohr befestigt ist. Man spricht deshalb in diesem Fall auch von T-Typ Heliostaten (Abb. B.3, links, Torsionsrohr zur Sonnenhöhenachführung von Facetten verdeckt).

Bei dem exemplarisch in Abb. B.3 abgebildeten Heliostaten /B-38/ beträgt die Breite des Konzentrators 12,8 m und die Höhe 8,94 m. Die Größe der 32 einzelnen Facetten ist jeweils 3 auf 1,1 m. Das Gesamtgewicht ohne Fundament beträgt knapp 5,1 t.

Die Einzelfacetten sind entsprechend der Brennweite sphärisch gekrümmt. Dabei entspricht der Krümmungsradius dem zweifachen der Brennweite. Die Facetten sind so ausgerichtet, dass sich die Einzelbilder zu einem gemeinsamen Brennpunkt des Heliostaten überlagern. Dieser Vorgang des Facettenausrichtens wird als *Canting* bezeichnet.

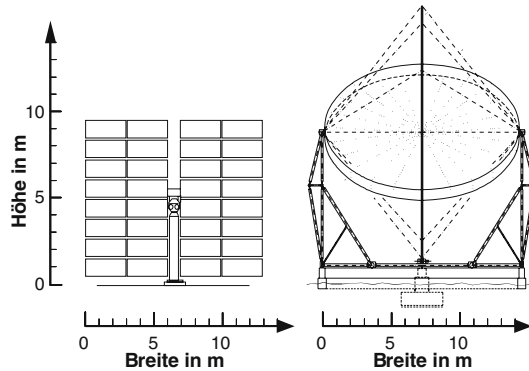


Abb. B.3 Facettierter Glas-Metall Prototyp-Heliostat (links; nach /B-38/) und Metallmembran (Advanced Stretched Membrane) Heliostat (rechts; nach /B-58/)

Membran-Heliostaten. Um den mit Einzelfacetten verbundenen Fertigungs- und Montageaufwand zu vermeiden und gleichzeitig eine hohe optische Qualität zu erreichen, wurden Heliostaten auf der Basis vorgespannter Membranen („Stretched Membrane“ Heliostaten) entwickelt. Ihr Konzentrator besteht aus einer oder mehreren „Trommeln“, welche wiederum aus einem metallischen Druckring und gespannten Membranen auf der Vorder- und Rückseite bestehen (Abb. B.3, rechts). Dafür werden Kunststofffolien und Metallmembranen eingesetzt. Bei Verwendung von Metallmembranen, die eine wesentlich höhere Dauerhaltbarkeit aufweisen, werden die Vorderseitenmembranen mit Dünnglasspiegeln beklebt, um die gewünschte hohe Reflektivität zu erzielen. Im Konzentratorinneren wird nun durch ein Gebläse oder eine Vakuumpumpe ein geringer Unterdruck (wenige mbar) eingestellt. Dadurch verformt sich die Membran, und aus dem ebenen Spiegel wird ein Konzentrator /B-1/, /B-9/. Bei anderen Konstruktionen dient ein mittig angebrachter mechanischer oder hydraulischer Stempel dazu, die Membran zu verformen.

Die mit großen Metallmembran-Heliostaten erzielte optische Güte ist deutlich höher als die, die bei Glas-Metall-Heliostaten vergleichbarer Größe mit vertretbarem Aufwand zu erreichen ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass mit dem Unterdruck im Konzentrator auch die Brennweite leicht variiert werden kann. Es müssen also nicht, wie bei konventionellen Glas-Metall-Heliostaten, verschiedene Facetten für unterschiedlich weit vom Receiver entfernte Heliostate gebaut werden. Bei den Metallmembran-Heliostaten reicht es aus, nur den Unterdrucksollwert bzw. die Sollkrümmung entsprechend einzustellen. Das *Canting* entfällt folglich bei Helio-

staten mit einem einzigen Membrankonzentrator völlig. Nachteilig ist der Energiebedarf für das Aufrechterhalten des Unterdrucks im Konzentrator.

Abb. B.3 zeigt exemplarisch einen Metallmembran-Heliostat mit Fachwerk-Drehstandnachführung /B-58/. Bei dieser Art der Nachführung werden die Kräfte weit entfernt von der Drehachse (beim gezeigten Heliostaten ca. 7 m) in den stabilen Druckring eingeleitet. Durch diese Untersetzung des Antriebsmoments können die Getriebeeinheiten klein und damit preiswert gehalten werden. Der Konzentratordurchmesser des abgebildeten Heliostaten (ASM 150) mit 150 m^2 Spiegelfläche beträgt 14 m, die Konzentratordicke 750 mm und das Gewicht ohne Fundament etwa 7,47 t.

Strahlungsempfänger (Receiver). Receiver von Turm-Solarkraftwerken dienen dazu, die vom Heliostatenfeld umgelenkte und konzentrierte Strahlungsenergie in Wärme umzuwandeln. Die heute üblichen Strahlungsflussdichten am Receiver liegen bei 600 bis $1\,000 \text{ kW/m}^2$. Derartige Receiver können nach dem verwendeten Wärmeträgerfluid (Luft, Salz, Wasser/Dampf, Flüssigmetall) und der Receivergeometrie (eben, Hohlraum (Cavity), zylindrische oder kegelförmige Rundum-Receiver) unterteilt werden, /B-4/, /B-61/. Heute favorisierte Wärmeträgermedien sind Luft /B-19/, /B-23/, /B-45/, /B-53/ und Salzschnmelzen /B-15/, /B-32/, /B-54/.

Wasser/Dampf-Receiver. Die ersten ausgeführten Turm-Solarkraftwerke (z. B. Solar One in Kalifornien, CESA-I in Spanien /B-22/) wurden mit Rohrrezeivern ausgeführt. Ihr Aufbau entspricht weitgehend dem in Abb. B.6 gezeigten Salz-Rohrrezeivern. In einem derartigen Wärmeübertrager (Rohrrezeivern) wird das Wasser eines konventionellen Dampfprozesses verdampft und ggf. überhitzt. Aufgrund der im Zusammenhang mit der Zweiphasenströmung Wasser-Dampf verbundenen Schwierigkeiten beim Wärmeübergang, wegen der Materialermüdung durch solare Transienten sowie aufgrund des ungünstigen Teillast- und Anfahrverhaltens solcher Systeme wird diese Technik heute nicht mehr verfolgt.

Offene volumetrische Luftrezeivern. Die konzentrierte Solarstrahlung trifft hier auf ein Absorbermaterial, das aus Stahldrahtgestrick oder poröser Keramik besteht. Es dringt in das Material ein und wird größtenteils erst in der Tiefe absorbiert und in Wärme umgewandelt. Ein Gebläse saugt Umgebungsluft von außen durch das bestrahlte Absorbermaterial (Abb. B.4). Der Luftstrom nimmt die Wärme auf, wobei die dem Heliostatenfeld zugewandten und damit am stärksten bestrahlten Absorberregionen durch die einströmende kalte Luft gekühlt werden. Da die Oberfläche des Absorbers durch diese durchströmende Luft gekühlt und dadurch kälter ist als die innenliegenden Bereiche des Absorbers – und damit auch kälter ist als die Luft, die das Gestrick wieder verlässt und zum Dampferzeuger strömt – hat diese Receiverbauart vergleichsweise geringe thermische Rückstrahlverluste. Dieser geschilderte Temperaturverlauf ist beispielhaft in Abb. B.4, links unten, dargestellt. Als offene Receiver arbeiten diese Anlagen bei Umgebungsdruck.

Die auf Temperaturen von 700°C und mehr erhitzte Luft wird nun in einen als Abhitzekeessel ausgeführten Dampferzeuger – wie beim Gas- und Dampfturbinen

(GuD)-Prozess – geleitet; mit dem dort erzeugten Dampf wird dann eine Turbine und damit letztendlich ein Generator angetrieben. Die Luft verlässt den Abhitze-kessel mit etwa 200 °C und wird über Luftkanäle dem Receiver wieder zugeführt. Da es sich um einen offenen Receiver handelt, ist die Lufrückführung nicht voll-ständig (u. a. wegen Wind); typischerweise werden jedoch rund 60 % der Luft im Kreislauf geführt.

Eine weitere Möglichkeit stellt der inverse Gasturbinenprozess dar, bei wel-chem ein offener volumetrischer Luftreceiver eingesetzt wird und die Luft direkt in eine Gasturbine geführt wird, welche in einen Unterdruck hinein entspannt /B-12/. Der Vorteil gegenüber dem Dampfprozess und dem unten beschriebenen geschlos-senen (druckbeaufschlagten) Luftreceiver liegt im einfacheren Aufbau. Solche An-lagen wurden jedoch bisher nur theoretisch untersucht, sind aber bisher sehr weit von der Realisierung entfernt.

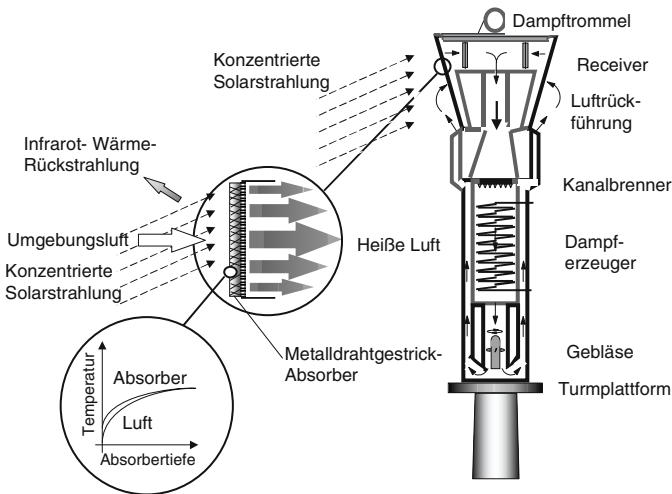


Abb. B.4 Funktionsprinzip eines offenen volumetrischen Luftreceivers nach dem Phoebus-Prinzip (nach /B-26/)

Ein derartiger Luftreceiver ist durch eine Vielzahl von Vorteilen gekennzeich-net; Luft als Wärmeträgermedium ist ungiftig, nicht korrosiv, unbrennbar, überall verfügbar sowie leicht zu handhaben. Sie hat aber eine vergleichsweise niedrige Wärmekapazität. Deshalb sind große Wärmeübertragerflächen erforderlich, wie sie bei volumetrischen Receivern jedoch vorhanden sind. Durch die geringen thermischen Massen sorgen diese auch für ein günstiges Anfahrverhalten der An-lage.

Bisher existieren derartige Anlagen nur als Prototypen. Der Aperturdurchmes-ser (d. h. der Durchmesser der dem Feld zugewandten, bestrahlten Öffnung des Receivers) des ab 1993 betriebenen TSA-Strahlungsempfängers mit einer thermi-schen Leistung von 3 MW beträgt beispielsweise 3,4 m /B-17/. Der näherungswei-se zylindrische Strahlungsempfänger der projektierten Phoebus-Anlage mit einer

elektrischen Leistung von 30 MW soll eine Höhe von etwa 10 m und einen mittleren Durchmesser von rund 7 m haben.

Geschlossene (druckbeaufschlagte) Luftreceiver. Die Apertur derartiger Receiver ist durch ein Quarzglasfenster geschlossen. Die Luft wird hier bei Überdruck (einigen bar) erhitzt. Damit kann die erhitzte Luft direkt in die Brennkammer einer Gasturbine eingespeist werden; dadurch entfällt im Vergleich zum Dampfturbinenprozess der Wärmeübertrager. Außerdem wird durch das höhere Temperaturniveau ein höherer Wirkungsgrad erreicht.

Bisher wurden geschlossene Luftreceiver mit einer thermischen Leistung bis etwa 450 kW bei 15 bar erprobt. Die erzielten Luftaustrittstemperaturen liegen bei über 800 °C und die Receiverwirkungsgrade bei 80 % /B-5/. Aufgrund der hohen Anforderungen an das temperatur- und druckbeaufschlagte Fenster werden voraussichtlich auch die Receiver möglicher zukünftiger kommerzieller Turmanlagen nach diesem Konzept aus Einzelmodulen mit thermischen Leistungen von rund 300 kW bis maximal etwa 1 MW bestehen. Dies entspricht bei der Verwendung von Sekundär-Konzentratoren (Abb. B.5) Durchmessern der Receiverapertur von bis rund einem Meter.

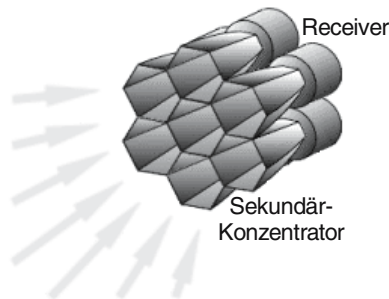


Abb. B.5 Receivercluster mit Sekundär-Konzentratoren (nach /B-60/)

Salzreceiver. Bei Salzreceivern können (eutektische) Salzschnmelzen aus Natrium- und Kaliumnitrat (NaNO_3 , KNO_3) eingesetzt werden. Bei beiden kann die Salzschnmelze infolge ihrer hohen Wärmekapazität – im Gegensatz zu Luft – zusätzlich direkt als Wärmespeichermedium verwendet werden (Abb. B.6). Damit entfallen die Wärmeübertrager zwischen Wärmeträgermedium und Wärmespeichermedium. Wie bei den Luftreceivern, und im Unterschied zu den Wasser-Dampf-Anlagen, liegt der Wärmeträger im gesamten während des regulären Betriebs vorkommenden Temperaturbereichs in der flüssigen Phase vor; es kommt keine problematisch technisch zu beherrschende Zwei-Phasen-Strömung vor. Über einen Salz-Wasser/Dampf-Wärmetauscher wird die solare Wärme dann in einen Dampfprozess eingekoppelt.

Ein alternatives Konzept zu den Salz-Rohrreceivern sind die Salz-Filmreceiver. Bei ihnen wird ein dünner Salzfilm entweder direkt (externer Filmreceiver, Direkt-

absorptionsreceiver (DAR)) oder durch eine Edelstahlplatte hindurch (interner Film) von der konzentrierten Solarstrahlung erhitzt /B-32/. Man verspricht sich davon einfache und damit kostengünstige Receiver.

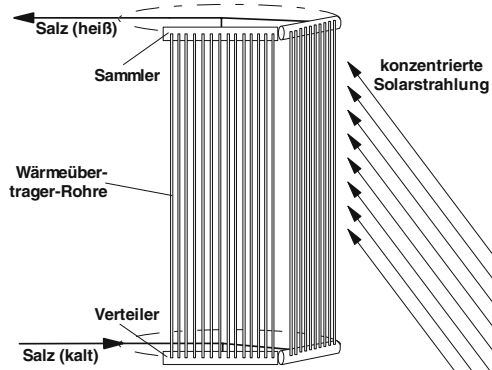


Abb. B.6 Darstellung des bei der Anlage Solar Two verwendeten Prinzips eines Salz-Rohrreceivers

Ein Nachteil aller Salzreceiver ist die Notwendigkeit, das Salz während der Betriebspausen (z. B. im Verlauf der Nachstunden) flüssig zu halten. Dafür ist die Beheizung des gesamten salzbefüllten Anlagenteils (u. a. Tanks, Rohre, Ventile) erforderlich. Dies geschieht mit Hilfe von elektrischen Widerstandsheizungen; sie stellen jedoch sehr hohe Anforderungen an Montage und Regelung. Zusätzlich erhöhen sie den Eigenenergieverbrauch der Anlage. Ein weiterer Nachteil ist die hohe Korrosivität der Gasphase der verwendeten Salze, da bei bestimmten Betriebszuständen das unerwünschte Verdampfen von kleinen Salzmenigen durch lokale Übertemperaturen nicht immer vollständig auszuschließen ist.

Weitere Receivertypen. Im Rahmen des Small Solar Power Systems (SSPS) Projektes wurden auch zwei Natrium-Rohrreceiver gebaut und erprobt /B-18/. Probleme mit diesem Medium wie u. a. ein Natriumbrand durch unsachgemäß durchgeführte Reparaturarbeiten führten aber dazu, dass diese Technologie im Turm-Solarkraftwerksbereich wegen der dort erforderlichen großen Natriummengen trotz der sehr guten thermodynamischen Eigenschaften dieses Stoffes heute nicht mehr verfolgt wird.

Konventioneller Kraftwerksteil. Beim konventionellen Kraftwerksteil handelt es sich weitgehend um eine Technik, wie sie bereits seit Jahren in konventionellen mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerken zum Einsatz kommt. Der für Turm-Solarkraftwerke relevante Leistungsbereich (10 bis 200 MW) kann demnach mit großtechnisch verfügbaren Turbinen und Generatoren – einschließlich sämtlicher benötigter Nebenaggregate – abgedeckt werden; derartige Systemkomponenten sind Stand der Technik (z. B. /B-51/).

Steuerung und Regelung. Die Heliostaten werden durch einen zentralen oder mehrere verteilte lokale Computer gesteuert. Die Heliostatfeld-Steuerungstechnik mit zentralem Rechner und über serielle Leitungen angebundenen Heliostaten stammt noch aus den achtziger Jahren, als die Rechenleistung teuer war. Heutige Entwicklungen verwenden Bussysteme bzw. intelligente, lokale Controller, die gleichzeitig die Aufgabe der Fehlerdiagnose übernehmen und das Kommunikationsaufkommen so weit reduzieren, dass sogar eine Funkfernsteuerung möglich ist.

Während des Betriebs zielen nicht alle Heliostaten auf dieselbe Stelle des Receivers. Um die gewünschte Strahlungsintensitätsverteilung auf der Absorberoberfläche des Receivers zu erzielen, ist es erforderlich, das Heliostatenfeld in Gruppen einzuteilen, welche jeweils auf eigene, relativ zueinander versetzte, Zielpunkte gerichtet sind. Während des Startvorgangs und auch im Betrieb müssen die Anzahl der Heliostaten pro Zielpunkt und die Koordinaten der Zielpunkte ständig nachge-regelt werden, um die gewünschte Verteilung aufrecht zu erhalten. Dies geschieht automatisch /B-55/, /B-56/.

Weitere Regelsysteme sind für das An- und Abfahren und den Betrieb des Dampferzeugers, des Energiespeichers bzw. der Zusatzfeuerung auf der Basis fossiler Energieträger und des gesamten konventionellen Kraftwerksteils erforderlich.

B.2.2 Anlagen

In der Vergangenheit wurden eine Reihe derartiger Anlagen im Rahmen von entsprechenden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben realisiert. Tabelle B.2 zeigt ausgewählte derartige Versuchs- und Pilotanlagen. Auf die wichtigsten wird im Folgenden näher eingegangen.

Solar One. Solar One, ein Turm-Solarkraftwerk mit 10 MW elektrischer Leistung in der kalifornischen Mojave-Wüste, wurde von 1982 bis 1988 betrieben. Mit dieser Anlage konnte die grundsätzliche Machbarkeit der solarthermischen Stromerzeugung mit Turmanlagen im Megawatt-Maßstab demonstriert werden. Als Wärmeträgermedium im Receiver wurde hier Wasser eingesetzt /B-61/. Bei der Anlage zeigten sich u. a. Probleme, den Betrieb bei Wolkendurchgängen aufrecht zu erhalten. Die hierdurch verursachten Verluste führten dazu, dass Solar One hinter den Erwartungen zurückblieb.

Abb. B.7 zeigt die Leistungskennlinie der Solar One Anlage als Beispiel für den Kennlinienverlauf von Solar-Turmkraftwerken. Demnach wird elektrische Leistung ab einer Tagessumme der Direktstrahlung von etwa 4 bis 5 kWh/(m² d) abgegeben. Mit steigender Direktstrahlung nimmt die abgegebene elektrische Leistung näherungsweise linear mit der eingestrahnten Solarenergie zu. Die Schwelle, ab der elektrische Leistung abgegeben wird, wird weitgehend durch die Wasser-Dampf-Rohrreceiver-Technologie bestimmt. Durch die Verwendung von Salzschnmelzen oder insbesondere von volumetrischen Receivern kann dieser Schwellenwert gesenkt werden.

Tabelle B.2 Solarthermische Versuchs- und Pilotanlagen

Anlage	Prinzip	Leistung	Standort	Status
CESA-I	Wasser/Dampf Rohrreceiver	1 MW _{el}	Almería (Spanien)	Betrieb 1983 – 84, seitdem Versuchsanlage für versch. Experimente (z. B. GAST, TSA)
Eurelios	Wasser/Dampf	1 MW _{el}	Adrano (Italien)	Betrieb 1981 – 84
GAST	Luft-Rohrreceiver		Almería (Spanien)	demontiert
PS10	Wasser/Dampf	10 MW _{el}	Spanien	Im Bau (Grundsteinlegung 2004)
Refos II / Solgate	drei geschlossene volumetrische Receiver als Cluster	1 MW _{th} / 250 kW _{el}	Almería (Spanien)	Versuchsanlage
Sandia	Teststand für diverse Receiver	5 MW _{th}	Albuquerque, NM (USA)	Versuchsanlage der Sandia National Solar Thermal Test Facility
Solar One	Wasser/Dampf-Rohrreceiver	10 MW _{el}	Barstow, CA (USA)	Betrieb 1982 – 88, umgebaut zu Solar Two
Solar Two	Salz-/Rohrreceiver	10 MW _{el}	Barstow, CA (USA)	Inbetriebnahme 1996, Betrieb bis 1999
Solar Tres	Salz-/Rohrreceiver	10 MW _{el}	Spanien (geplant)	Projektentwicklung vorangeschr.
SSPS	Natrium-Rohrreceiver, ab 1987 kleine volum. Luftreceiver	0,5 MW _{el}	Almería (Spanien)	seit September 1981 System- und Komponententests
Themis	Salzreceiver	2,4 MW _{el}	Targassone (Frankreich)	Betrieb 1983 – 86, jetzt Versuchsanlage für Gammastrahlen-Astronomie
TSA/Solair/ Kosmosol	offener volumetrischer Luftreceiver	3 MW _{th}	Almería (Spanien)	Versuchsanlage, 1993 – 97 regelmäßig in Betrieb, Receiver 2003 durch Solair-Receiver ersetzt (selbes Prinzip, aber keramische Absorber)
Weizmann Institut		3 MW _{th}	Rehovot (Israel)	Testanlage für Solarthermie sowie Solarchemie

Solar Two. Mit dem Ziel, die bei der Anlage Solar One aufgetretenen Probleme zu lösen, wurde das Kraftwerk zur Anlage Solar Two umgebaut. Als Wärmeträger- und Wärmespeichermedium wurde nun eine Salzschnmelze aus 40 % Kalium- und 60 % Natriumnitrat eingesetzt. Durch die Verwendung dieses thermischen Energiespeichers können Strahlungsangebot und Energienachfrage (weitgehend) entkoppelt werden.

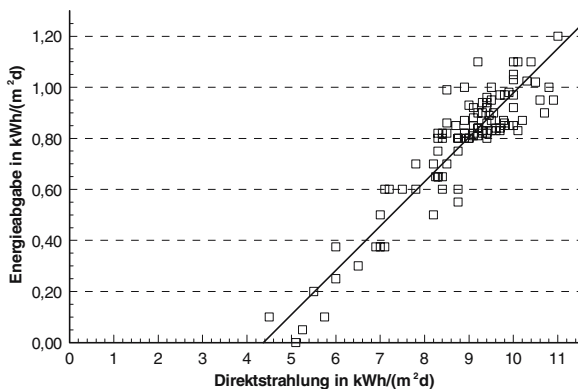


Abb. B.7 Leistungskennlinie von Solar One (nach /B-2/)

Das Prinzip des Kraftwerks Solar Two zeigt Abb. B.8. Salz wird aus einem „kalten“ Salzspeicher auf den Turm und dort durch den Receiver gepumpt, wo es sich erwärmt. Es gelangt dann in den „heißen“ Tank. Von dort aus wird bei Bedarf Salz – und damit Energie – entnommen und durch einen Dampferzeuger geleitet, der Frischdampf für einen konventionellen Dampfturbinen-Kreisprozess erzeugt. Das im Dampferzeuger abgekühlte Salz gelangt anschließend in den „kalten“ Salzspeicher.

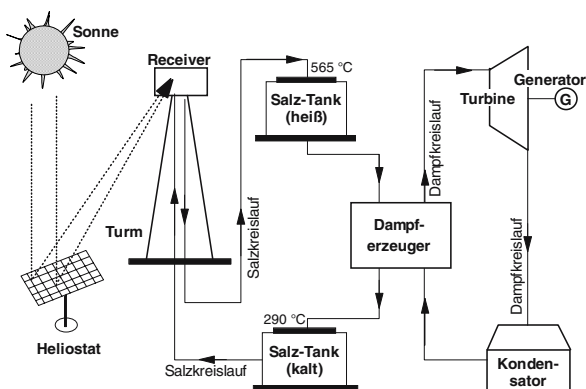


Abb. B.8 Prinzipskizze eines Turm-Solkraftwerkes mit einer Salzschnelze als Wärme-träger- und -speichermedium (Temperaturen beziehen sich auf die Anlage Solar Two) (nach /B-15/)

Grundsätzlich lässt sich mit diesem Konzept nicht nur tagsüber, sondern bei entsprechender Größe des Energiespeichers und des Solarfeldes auch 24 Stunden am Tag Strom bereitstellen. Solar Two produziert eine elektrische Leistung von 10 MW, die durch den in der Anlage vorhandenen Energiespeicher bis zu drei Stunden nach Sonnenuntergang aufrechterhalten werden kann.

Phoebus/TSA/Solair. Phoebus/TSA/Solair ist ein Kraftwerkskonzept mit einem offenen volumetrischen Luftreceiver, durch den heiße Luft bereitgestellt wird. Die Heißluft strömt anschließend durch einen Dampferzeuger, in dem überhitzter Dampf bereitgestellt wird, der dann zum Antrieb der Turbine – und damit des Generators – eingesetzt werden kann. Dies ist in Abb. B.9 schematisch dargestellt.

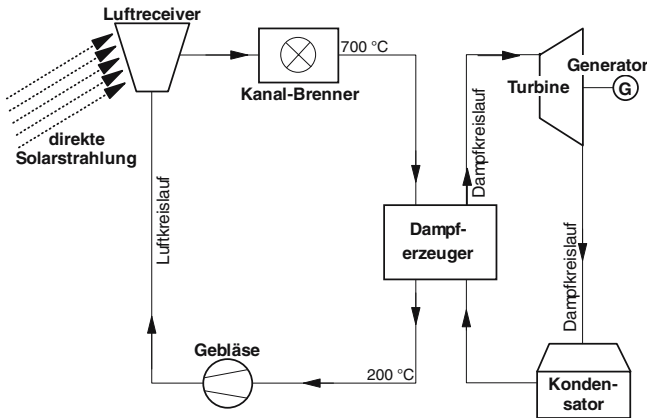


Abb. B.9 Schaltung eines offenen volumetrischen Receivers nach dem Phoebus-Prinzip mit Kanalbrenner zur Zufuehrung fossiler Brennstoffe (nach /B-45/)

Ein erdgasbefuehrter Kanalbrenner zwischen Receiver und Dampferzeuger fuehrt der Luft zusaezliche Waerme zu, wenn die Sonnenstrahlung zur Erzeugung der gewuenschten Dampfmenge nicht ausreicht. Die Phoebus-Anlage kann auf diese Weise nicht nur dann Strom erzeugen, wenn die Sonne scheint, sondern auch während Schlechtwetterperioden oder ggf. in der Nacht. Das Kraftwerk kann somit – bei einer entsprechenden Zufuehrung fossiler Energietraeger (z. B. Erdgas) – als Mittelast- oder sogar als Grundlastkraftwerk betrieben werden. Damit ist die Strombereitstellung nicht ausschließlich vom solaren Strahlungsangebot abhängig, und Stromlieferungsverpflichtungen koennen auch zu Zeiten unzureichenden Solarstrahlungsangebots eingehalten werden.

Die Phoebus-Anlage ist ein im Wesentlichen konventionelles Kraftwerk. Durch das beschriebene Konzept der Einkopplung solarer Energie kann eine derartige Anlage aber mit einem sehr hohen Anteil an Solarenergie an der gesamten erzeugten Energie betrieben werden. Durch die ebenfalls mögliche Integration eines thermischen Energiespeichers in das Gesamtsystem kann die Menge des benötigten fossilen Brennstoffs weiter reduziert werden.

Von 1993 bis 1997 wurde ein derartiger Kreislauf mit Luftreceiver mit einer thermischen Leistung von 3 MW ständig betrieben, der grundsätzlich alle Komponenten eines zukünftigen Phoebus-Kraftwerks beinhaltet (sogenanntes TSA-System (Technology Program Solar Air Receiver)). Die Versuchsergebnisse zeigen das sehr gute Zusammenspiel der Komponenten sowie eine geringe thermische Trägheit eines derartigen Systems, die ein schnelles Anfahren ermöglicht. Der ein-

fache Aufbau und der unproblematische Wärmeträger Luft zeichnen diese Technik zusätzlich aus /B-19/.

Aktuelle Entwicklungen. Vor dem Hintergrund der seit mehreren Jahren angekündigten erhöhten Einspeisungsvergütung für Strom aus solarthermischen Kraftwerken in Spanien haben sich eine Reihe von Konsortien gebildet, die entsprechende Projekte entwickeln. Im August 2002 wurde schließlich diese Einspeisungsvergütung verabschiedet und im März 2004 erhöht. Nachfolgend werden einige ausgewählte derartige Projektansätze dargestellt.

Phoebus/TSA/PS10. Aufgrund der guten Erfahrungen mit dem Phoebus/TSA/PS10-System wurde von einem von Spanien geführten europäischen Konsortium der Bau und Betrieb einer 10 MW-Anlage mit dem Namen PS10 mit volumetrischem Receiver in Südwestspanien geplant /B-62/. Mitte 2004 erfolgte die Grundsteinlegung. Zwischenzeitlich wurde das Konzept geändert, die Anlage wird einen Rohr-Sattdampfreceiver erhalten, der Dampf mit 40 bar und 250 °C liefern soll. Das als Nordfeld ausgeführte Heliostatenfeld soll aus 624 Heliostaten bestehen. Dabei werden facettierte Glas/Metall-Heliostaten (T-Typ) Sanlúcar 120 mit jeweils ca. 121 m² Spiegelfläche eingesetzt. Der Cavity- (Hohlraum) Receiver wird auf einem rund 100 m hohen Turm angebracht. Er besteht aus vier 5,36 mal 12,0 m großen Rohrpanels. Der in die Anlage integrierte thermische Speicher soll eine nutzbare Wärmeenergie von 15 MWh aufweisen, womit die Anlage 50 Minuten lang mit 50 % Last betrieben werden kann. Die Entwicklung des Konzept mit offenem volumetrischen Receiver wird parallel von deutschen Forschungseinrichtungen und der Industrie im Rahmen der Solair- und KOSMOSOL-Projekte vorangetrieben.

Solar Tres. Hier wird aufgebaut auf dem Know-How aus Bau und Betrieb der Anlage Solar Two (Salz als Wärmeträger und Wärmespeichermedium). Entsprechend heißt dieses Projekt „Solar Tres“ (spanisch für „Solar Drei“). Dieses Turm-Solkraftwerk mit Flüssigsalz-Rohrreceiver, das eine elektrische Leistung von 15 MW aufweisen soll, wird auch auf einen ausschließlichen Solarbetrieb ausgelegt. Das Heliostatenfeld ist als Nordfeld mit 2 494 Heliostaten mit einer Fläche von je 96 m² konzipiert. Als einzusetzende Heliostatentypen sind facettierte Glas/Metall-Heliostaten (T-Typ) mit hochreflektierenden Spiegeln und vereinfachter Konstruktion vorgesehen (solares Vielfaches von 3). Der 120 MW_{th} Receiver ist als zylindrischer Flüssigsalz-Rohrreceiver geplant. Der in das Konzept integrierte Speicher (600 MWh_{th}) soll es ermöglichen, die Anlage mit Wärme aus dem Speicher 16 Stunden lang zu betreiben.

Solgate. Bei Solgate handelt es sich um eine Versuchsanlage unabhängig von der spanischen Einspeisungsvergütung. Diese Pilotanlage eines Turm-Solkraftwerks mit geschlossenem volumetrischen Receiver mit Sekundärkonzentrator und keramischem Absorber mit einer elektrischen Nennleistung von 250 kW wird im Hybridbetrieb (d. h. kombinierter Betrieb mit Erdgas und Solarstrahlung) betrieben.

Die im PSA-Nordfeld angeordneten facettierten Glas/Metall-Heliostaten (T-Typ) weisen eine Spiegelfläche von je ca. 40 m^2 auf (solares Vielfaches von 1). Auf einen Speicher kann hier verzichtet werden.

B.3 Dish/Stirling- und Dish/Brayton-Systeme

Dish/Stirling- und Dish/Brayton-Systeme sind punktkonzentrierende solarthermische Stromerzeugungsanlagen. Sie bestehen im Wesentlichen aus drei Komponenten: einem parabolisch gekrümmten Konzentrator (Dish), einem Receiver und einer Wärmekraftmaschine (Stirlingmotor bzw. Gasturbine) mit angeschlossenem Generator (Abb. B.10).

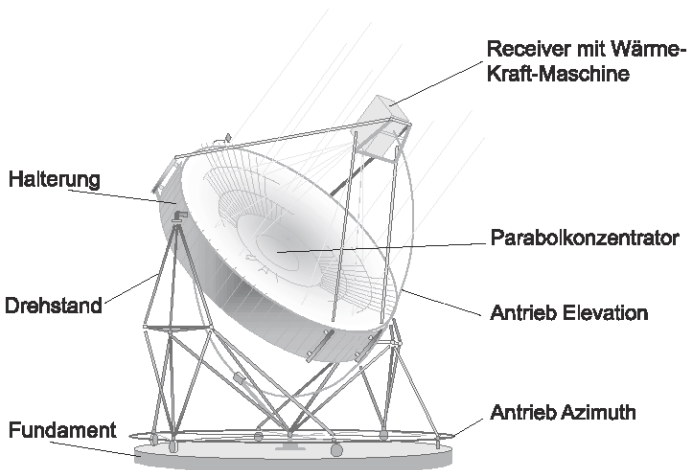


Abb. B.10 Funktionsprinzip eines Dish/Stirling- bzw. Dish/Brayton-Systems

Der Parabolkonzentrator wird zweiachsig der Sonne nachgeführt, so dass er die direkte Solarstrahlung auf einen im Fokus angeordneten Receiver reflektiert. Die im Receiver in Wärme umgewandelte Strahlungsenergie wird einer Stirlingmaschine oder einer Gasturbine zugeführt, die als Wärme-Kraft-Maschine die Wandlung in mechanische Energie vornimmt. Direkt an die Welle der Stirlingmaschine bzw. an die der Gasturbine ist ein Generator gekoppelt, der die mechanische Energie in die letztlich gewollte elektrische Energie überführt. Beide Systeme können parallel oder alternativ zusätzlich zur solaren Beheizung mit einem Gasbrenner (z. B. mit Erdgas oder Biogas) beheizt werden /B-29/, /B-46/. Nachfolgend werden zunächst wesentliche Komponenten derartiger Systeme diskutiert. Anschließend wird auf entsprechende Gesamtsysteme eingegangen.

B.3.1 Komponenten

Parabolkonzentrator (Dish). Der parabolisch gekrümmte Hohlspiegel (Dish) konzentriert das Sonnenlicht, abhängig von der Genauigkeit seiner Formgebung, seiner Oberflächenbeschaffenheit und seiner Brennweite, in einem mehr oder weniger großen Brennfleck. Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems wird entscheidend vom Konzentrationsverhältnis beeinflusst, das bei heute üblichen Konzentratoren zwischen 1 500 und 4 000 liegt. Für einen hohen Systemwirkungsgrad ist ein hohes Konzentrationsverhältnis förderlich.

Bei der Konstruktion der Konzentratoren kann zwischen einem facettierten Aufbau und einer flächenhaften Gestaltung der Konzentratorfläche unterschieden werden. Bei ersterem werden mehrere Spiegelsegmente auf eine tragende Struktur aufgebracht, einzeln gestützt und ausgerichtet. Bei letzterem wird die ganze Konzentratorfläche in einem Formgebungsprozess in eine parabolisch gekrümmte Form gebracht.

Die Spiegelsegmente können dabei direkt aus verspiegeltem Glas bestehen. Sie können aber auch aus Facetten gefertigt werden, die mit einer verspiegelten Folie oder Dünnglasspiegeln belegt sind. Diese Facetten werden meist mit vorgespannten Membranen aus Metall oder Kunststoff (Stretched Membrane Technologie) ausgeführt. Diese Membranen sind beidseitig auf einem Ring befestigt. Sie werden mittels eines Formgebungsprozesses in ihre gewünschte Gestalt gebracht und in der Regel mit Unterdruck stabilisiert. Mit der Metallmembran-Konstruktion werden bei den flächenhaft gestalteten Konzentratoren hohe Steifigkeiten und eine gute optische Leistungsfähigkeit bei geringem Gewicht erzielt. In einer neueren Entwicklung werden die Facetten aus Sandwichelementen aus glasfaserverstärktem Epoxidharz aufgebaut und anschließend mit Dünnglasspiegeln beklebt. Die Konzentratorgrößen liegen bei etwa 6,5 bis maximal 25 m im Durchmesser.

Nachführung. Die punktkonzentrierenden Parabol-Konzentratoren müssen kontinuierlich über zwei Achsen dem Lauf der Sonne nachgeführt werden, damit die Sonnenstrahlen stets parallel zur Konzentratorachse einfallen. Dabei wird zwischen azimuthaler und polarer Nachführung unterschieden.

- Bei der azimuthalen Nachführung wird der Konzentrator über eine Achse parallel zur Erdoberfläche (Elevationsachse) und einer zweiten senkrecht zur Erdoberfläche (Azimut) bewegt.
- Bei der polaren (oder parallaktischen) Nachführung verläuft eine Achse parallel zur Erdrotationsachse (polare Achse) und die andere senkrecht dazu (Deklinationsachse).

Beide Systeme werden über eine Computersteuerung automatisch der Sonne nachgeführt.

Receiver. Der Receiver ist das Bindeglied zwischen Parabol-Konzentrator und der Wärme-Kraft-Maschine. Seine Aufgabe ist es, einen möglichst hohen Anteil der vom Konzentrator reflektierten Strahlungsenergie zu absorbieren und diese in

Form von Wärme an das Arbeitsgas der Wärme-Kraft-Maschine zu übertragen. Hier treten die höchsten Temperaturen des Systems auf; derzeit übliche Betriebstemperaturen liegen im Bereich von 600 bis 800 °C für das Arbeitsmedium. Dabei ist die Intensitätsverteilung der konzentrierten Strahlung im Brennfleck aufgrund von unvermeidbaren Spiegelfehlern nie ganz gleichmäßig. Auf der Absorberfläche können daher große Temperaturgradienten auftreten. Die auftretenden Drücke in Receivern bewegen sich für Stirlingmaschinen zwischen 40 und 200 bar /B-46/ und für Gasturbinen bei einigen bar.

Receiver für Dish-Systeme werden als Hohlraum-Receiver (Cavity-Receiver) ausgeführt. Die konzentrierte Strahlung fällt hier durch eine kleine Öffnung, die als Apertur bezeichnet wird, in einen Hohlraum. Der Apertur-Durchmesser wird dabei so optimiert, dass der größte Teil der konzentrierten Strahlung durch diese Öffnung hindurch tritt und gleichzeitig Konvektions- und Strahlungsverluste möglichst begrenzt werden. Die Absorberfläche ist hinter der Apertur und damit hinter dem Brennfleck angeordnet, um die auftreffende Strahlungsintensität zu vermindern. Bei Dish/Stirling-Systemen ist die Apertur dabei offen; bei den volumetrischen Receivern für Gasturbinen wird sie demgegenüber durch ein Quarzglasfenster geschlossen.

Im Folgenden werden die wesentlichen Receiver Typen, die in der Vergangenheit entwickelt wurden und von denen auch für die Zukunft eine gewisse Bedeutung erwartet werden kann, kurz beschrieben.

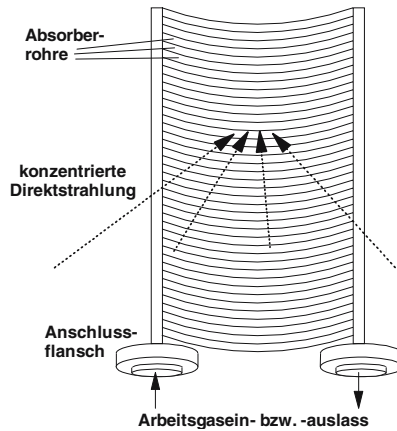


Abb. B.11 Rohrreceiver für einen solarbetriebenen Stirlingmotor

Rohrreceiver. Die einfachste Bauweise eines Solar-Receivers für den Stirlingmotor stellt der direkt bestrahlte Rohrreceiver dar (Abb. B.11). Hier dienen die vom Arbeitsmedium durchströmten Erhitzerrohre des Stirlingmotors als Absorberfläche; sie werden direkt mit der konzentrierten Solarstrahlung beaufschlagt. Dazu muss die Geometrie der Stirling-Erhitzerrohre so gestaltet werden, dass bei mög-

lichst geringem Totvolumen möglichst gleichmäßige und nicht zu hohe Strahlungsflussdichten auf die Absorberfläche auftreffen /B-39/, /B-41/, /B-46/.

Heat Pipe Receiver. Im Heat Pipe (Wärmerohr) Receiver (Abb. B.12) wird ein flüssiges Metall (in der Regel Natrium) als Wärmeträgermedium eingesetzt. Durch einen Verdampfungs- und Kondensationskreislauf, in dem dieses Wärmeträgermedium im Kreislauf bewegt wird, erfolgt der Transport der latenten Verdampfungswärme von der bestrahlten Absorberfläche bei fast konstanter Temperatur zum Stirling-Erhitzer. Das Kondensat wird nach der Wärmeabgabe an den Erhitzer von der Kapillarstruktur aufgenommen und durch die kapillare Saugwirkung zur Heizzone zurück transportiert. Der fertigungstechnische Aufwand des Heat Pipe Prinzips ist deshalb vergleichsweise hoch. Dem steht der Vorteil gegenüber, dass hohe und auch extrem unterschiedliche Wärmestromdichten gleichförmig auf den Stirling-Erhitzer übertragen werden; dadurch sind relativ hohe Maschinenwirkungsgrade und eine lange Lebensdauer möglich. Vorteilhaft ist auch, dass der Heat Pipe Receiver vergleichsweise einfach hybridisiert werden kann; d. h. er kann zusätzlich zur Solarstrahlung auch mit flüssigen oder gasförmigen, fossilen oder biologischen Brennstoffen betrieben werden /B-4/, /B-14/, /B-25/, /B-26/.

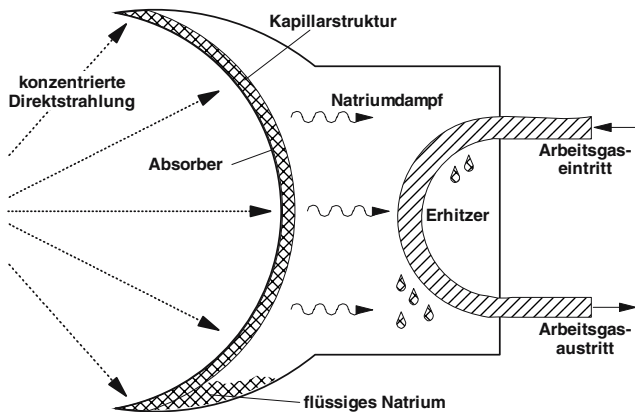


Abb. B.12 Heat Pipe Receiver für Dish/Stirling-Systeme (nach /B-46/)

Volumetrische Receiver. Bei den Dish/Brayton-Systemen wird als Wärmeträgermedium Luft verwendet. Aufgrund der geringen Wärmekapazität von Luft können konventionelle Rohrreceiver nur kleine Wärmestromdichten auf den Rohren ertragen; dies führt zu großen Receivern und entsprechend hohen Druckverlusten. In volumetrischen Receivern (Abb. B.13) wird die konzentrierte Solarstrahlung deshalb im Innern (d. h. also im Volumen) einer hochporösen Struktur absorbiert und die entstehende Wärme direkt durch Konvektion an das Gas, das diese poröse Struktur durchströmt, abgegeben. Der Vorteil liegt in den kleineren charakteristischen Längen des Wärmeübertragers und der daraus resultierenden größeren

Wärmeübertragungszahl. Dadurch ist die zur Übertragung einer bestimmten Leistung erforderliche Temperaturdifferenz und damit auch die Oberflächentemperatur des Wärmeübertragers bei gleicher Arbeitsmitteltemperatur niedriger; außerdem sind die thermomechanischen Beanspruchungen geringer. Der Absorber kann folglich bei höheren Strahlungsflussdichten und Luft-Austrittstemperaturen betrieben werden.

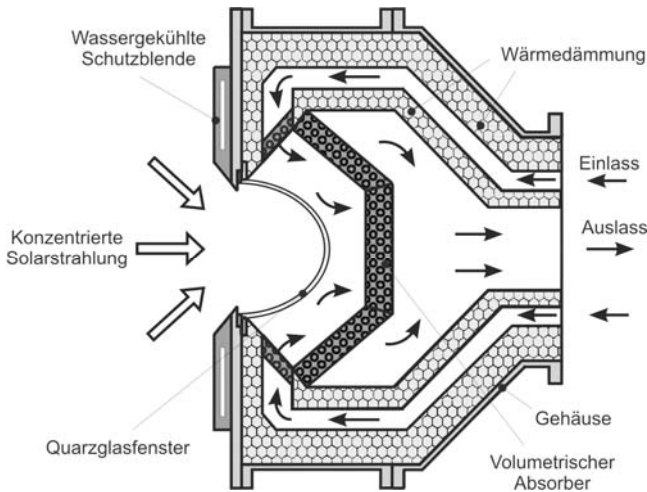


Abb. B.13 Volumetrischer Receiver für ein Dish/Brayton-System (nach /B-7/)

Die Absorberstruktur besteht entweder aus Drahtgeflecht oder aus Keramikschaum. Der Druckverlust durch den Absorber ist vernachlässigbar; dies ist eine wichtige Voraussetzung für gute Turbinenwirkungsgrade. Die Apertur wird durch ein Quarzglasfenster geschlossen; es hat eine hyperbolische Form, damit die Reflexionsverluste klein gehalten werden können. Hinter dem Absorber im Gasaustrittsbereich kann zusätzlich ein mit fossilen oder biogenen Brennstoffen betriebener Brenner integriert werden /B-6/, /B-7/, /B-20/.

Wärme-Kraft-Maschine. Die derart bereitgestellte thermische Energie kann dann mit Hilfe einer Wärme-Kraft-Maschine in elektrische Energie umgewandelt werden. Hierzu können der Stirlingmotor und die Gasturbine zum Einsatz kommen. Sie werden nachfolgend kurz diskutiert.

Stirlingmotor. Der Stirlingmotor gehört zu der Gruppe der Heißgas-Maschinen und arbeitet mit einem geschlossenen System; d. h. im Arbeitsspiel wird immer das selbe Arbeitsgas benutzt. Die Energiezufuhr erfolgt im Unterschied zu Otto- oder Dieselmotoren durch eine äußere Wärmezufuhr; dies macht den Stirlingmotor auch für Solarbetrieb tauglich.

Das grundlegende Prinzip des Stirlingmotors basiert auf dem Effekt, dass ein Gas bei einer Temperaturänderung eine entsprechende Volumenänderungsarbeit

verrichtet. Der Arbeitsprozess wird durch isotherme Verdichtung des kalten und isotherme Entspannung des heißen Mediums bei Wärmezufuhr bei konstantem kleinen und Wärmeabfuhr bei konstantem großen Volumen (isochor) dargestellt. Eine periodische Temperaturänderung – und damit ein kontinuierlicher Betrieb – kann dabei erreicht werden, indem das Arbeitsgas zwischen einem Raum mit konstant hoher Temperatur und einem Raum mit konstant niedriger Temperatur hin- und herbewegt wird.

Wird der Kompressionskolben zur geschlossenen Seite bewegt, strömt das kalte Arbeitsgas durch den Regenerator in den warmen Raum. Dabei gibt der Regenerator isochor die zuvor aufgenommene Wärme an das Arbeitsgas ab (isochorer Heiztakt (1); Abb. B.14). Es wird dadurch auf die Temperatur des warmen Raums aufgewärmt und der Regenerator kühlt sich auf die Temperatur des kalten Raums ab. Das sich im warmen Raum befindende Arbeitsgas dehnt sich nun isotherm aus und nimmt dabei Wärme von dem warmen Raum auf (isothermer Expansionstakt (2); Abb. B.14). Durch das expandierende Arbeitsgas wird der Arbeitskolben zur offenen Seite hin bewegt und verrichtet dabei Arbeit. Durchläuft der Arbeitskolben den unteren Totpunkt und wird nun zur geschlossenen Seite hin bewegt, muss das heiße Arbeitsgas durch den Regenerator in den kalten Raum. Dabei wird isochor Wärme vom Arbeitsgas an den Regenerator abgegeben (isochorer Kühltakt (3); Abb. B.14). Das Gas kühlt sich auf die Temperatur des kalten Raums ab und der Regenerator wird auf die Temperatur des warmen Raums erwärmt. Das Arbeitsgas wird anschließend isotherm komprimiert und gibt die dabei entstehende Wärme an den kalten Raum ab (isothermer Kompressionstakt (4); Abb. B.14) /B-60/.

Grundlegende Systemelemente sind damit der erhitzte Arbeitszylinder, der gekühlte Kompressionszylinder und ein Regenerator, der zur Energiezwischenspeicherung dient. Der Regenerator ist meist ein hochporöser Körper mit einer hohen Wärmekapazität; dieser poröse Körper weist i. Allg. eine Masse auf, die bedeutend größer ist als die Gasmasse, die ihn durchströmt. Je vollständiger der wechselnde Wärmeübergang im Regenerator erfolgt, um so größer ist die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Arbeits- und Kompressionszylinder, und damit der Wirkungsgrad des Stirlingmotors.

Wird der Verdrängerkolben über ein Triebwerk oder ein schwingfähiges System im richtigen Phasenwinkel zum Arbeitskolben gekoppelt, kann das gesamte System als Wärme-Kraft-Maschine arbeiten.

Bei den mechanischen Ausführungen wird zwischen den kinematischen Stirling-Maschinen und den Freikolben-Stirling-Maschinen unterschieden. Weiterhin sind einfach- und doppelt-wirkende Maschinen verfügbar. Bei einfach-wirkenden Stirling-Maschinen erfährt nur eine Seite des Kompressions- bzw. des Expansionskolbens die Druckschwankungen im Arbeitsraum. Bei doppelt-wirkenden Maschinen wirkt der Druck des Arbeitsgases auf beide Seiten der Kolben; sie sind dann zugleich Kompressions- und Expansionskolben /B-46/, /B-57/, /B-60/.

– Kinematische Stirling-Maschinen. Bei den kinematischen Stirling-Maschinen erfolgt die Kraftübertragung – wie auch bei konventionellen Verbrennungsmo-

toren – über ein Kurbelgetriebe. Über eine nach außen führende Welle kann an diesem Getriebe ein Generator angeschlossen werden.

- Freikolben-Stirling-Maschinen. Bei dieser Ausführung bestehen keine mechanischen Verbindungen zwischen dem Arbeitskolben, dem Verdränger und der Umgebung. Beide Kolben können sich frei bewegen. Die umgewandelte Energie wird also nicht auf einen Kurbeltrieb übertragen, sondern kann z. B. über einen Axialgenerator nach außen geführt werden. Die mechanischen Verbindungen sind durch ein inneres Feder-Dämpfungssystem ersetzt; dadurch werden nur zwei bewegte Teile benötigt. Die Maschine ist hermetisch verschlossen, wodurch Dichtungsprobleme umgangen werden. Freikolben-Stirling-Maschinen haben die theoretischen Vorteile eines einfachen Aufbaus und damit hoher Zuverlässigkeit, liegen aber im Entwicklungsstand derzeit noch hinter den kinematischen Maschinen zurück.

Die für Dish/Stirling-Systeme eingesetzten Maschinen arbeiten mit Helium oder Wasserstoff als Arbeitsgas bei Temperaturen von 600 bis 800 °C.

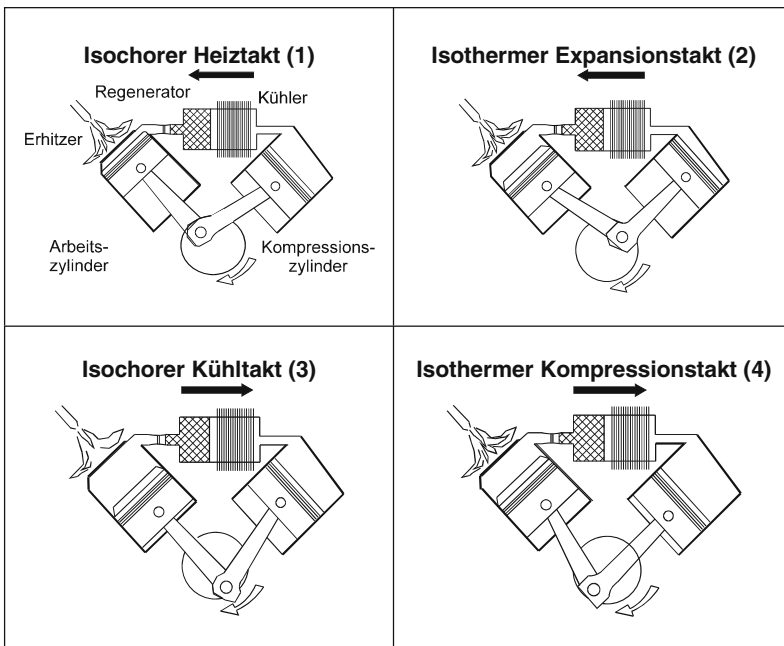


Abb. B.14 Arbeitsweise eines Stirlingmotors (nach /B-36/)

Gasturbine. Der Brayton-Prozess wird in einer Gasturbine realisiert (Abb. B.15). Die komprimierte Luft (z. B. 3 bar) wird in einem Wärmeübertrager (Rekuperator) auf rund 650 °C vorgeheizt und im Receiver durch die konzentrierte Solarstrahlung weiter auf etwa 900 °C erwärmt /B-6/. Anschließend strömt das Heißgas

durch eine Brennkammer; hier kann die Luft bei ungenügender Solarstrahlung mit Hilfe fossiler oder biogener Energieträger zusätzlich erhitzt werden. Nun wird die heiße Luft in einer zweistufigen Turbine entspannt, deren erste Stufe den Kompressor und deren zweite Stufe über ein Getriebe den Generator antreibt. Nach dem Verlassen der Turbine wird das Abgas zur Wärmerückgewinnung durch den Rekuperator geleitet.

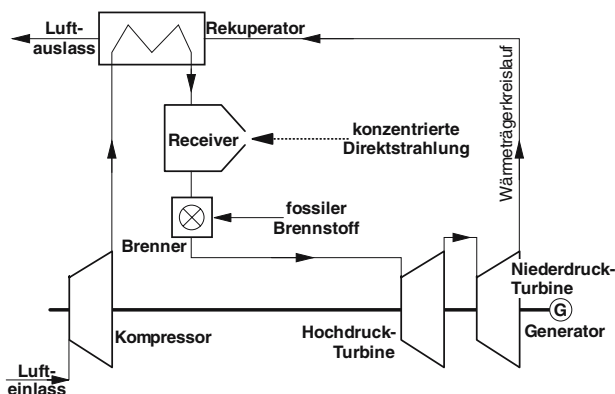


Abb. B.15 Funktionsschema des solaren Brayton-Prozesses

Industriell gefertigte Gasturbinen werden derzeit mit Leistungen zwischen 500 kW und 300 MW angeboten; eine mögliche untere Leistungsgrenze wird gegenwärtig bei ca. 30 kW gesehen. Neuere Entwicklungen gehen dabei hin zum Einsatz von Hochgeschwindigkeitsgeneratoren. Dadurch entfällt das Getriebe; die Bauweise wird mit nur einem rotierenden Bauelement sehr kompakt und einfach.

Steuerung und Regelung. Dish-Systeme werden computergesteuert dem Lauf der Sonne nachgeführt. Bei den Metallmembran-Konzentratoren wird beispielsweise eine Unterdruckpumpe über einen Druckwächter angesteuert, um den gewünschten Unterdruck im Konzentratorinneren zu gewährleisten und damit die Krümmung der Spiegelfläche aufrecht zu erhalten. Die Leistungsregelung erfolgt ebenfalls automatisch; bei den Stirlingmotoren wird dies durch eine Variation des Arbeitsgasmitteldrucks realisiert.

B.3.2 Anlagen

In den letzten Jahren wurden insgesamt sechs Arten von Dish/Stirling-Prototypen entwickelt, die teilweise zu mehreren Einheiten gebaut und getestet wurden. Tabelle B.3 zeigt wesentliche Kenngrößen dieser aktuellen Dish/Stirling-Anlagen.

Die im vorherigen Kapitel diskutierten Systemelemente können zu entsprechenden Gesamtsystemen kombiniert werden (vgl. Abb. B.10). Exemplarisch zeigt Abb. B.16 eine typische Leistungskennlinie mit Wirkungsgraden der 9 kW Anla-

gen, die seit 1991 im Dauerbetrieb (Sonnenauf- bis Sonnenuntergang) eingesetzt werden und insgesamt bisher ca. 40 000 Stunden betrieben wurden /B-41/ (Energie- und Leistungsdaten normiert gemäß IEA Richtlinie /B-47/). Die durchgezogene Linie zeigt den bei optimalen Bedingungen (insbesondere Außentemperatur) erreichbaren Verlauf der Kennlinie.

Tabelle B.3 Solarthermische Versuchs- und Pilotanlagen

	MDAC	SES/ Boeing	SunDish	ADDS Mod2	SBP	EuroDish/ EnviroDish
Jahr	84 – 88	ab 98	ab 94	ab 99	1990 – 2000	ab 2000
Leistung in kW _{netto}	25	25	22	9	9	10
Wirkungsgrad in %	29 – 30 ^a	27	18 – 23	22	18 – 21	22
Anzahl	6	3	3	2	9	2/4
Betriebsstunden in h	12 000	8 350	900	5 000	40 000	>13 000
Verfügbarkeit in %	40 – 84	94			50 – 90	
Status	beendet	Testbetrieb	Testbetrieb	Testbetrieb	3 Systeme Testbetrieb	Dauerbetrieb
Konzentrator						
Durchmesser in m	10,57	10,57	12,25	7,5	7,5 – 8,5	8,5
Bauart	1 ^b	1 ^b	2 ^c	3 ^d	2 ^c	3 ^d
Zahl der Facetten	82	82	16	24	1	12
Facettengröße in cm	91 x 122	91 x 122	Ø 300		Ø750 – 850	
Spiegelträger/ Reflektor	Glas/ Silber	Glas/ Silber	Glas/ Silber	Glas/ Silber	Glas/ Silber	Glas/ Silber
Reflektivität in %	91	>90	>90	94	94	94 (neu)
Konzentrationsfaktor	2 800	2 800			3 000	3 000
Betriebsstunden in h	175 000	13 200	18 000	54 000	100 000	>13 000
Wirkungsgrad in %	88,1		90 (design)		88	
Maschine						
Hersteller	USAB	USAB/SES	STM Corp.	SOLO	SOLO	SOLO
Leistung in kW _{el}	25	25	20 – 25	10	9	10
Arbeitsgas	H ₂	H ₂	H ₂	He	He	He
Mitteldruck in MPa _{max}	20	20	12	15	15	15
max. Gas-Temperatur in °C	720	720	720	650	650	650
Betriebsstunden in h	80 000	17 900		80 000	350 000	80 000
Wirkungsgrad in % ^c	38,5		33,2 (design)	33	30 – 32	33
Receiver						
Typ	Rohr	Rohr	Rohr	Rohr	Rohr	Rohr
Aperturdurchmesser in cm	20	20	22	15	12 – 15	15
Rohrtemperatur in °C	810	810	800	850	850	850
Wirkungsgrad in %	90			90	90	90

^a Bei 760 °C Gastemperatur; ^b Facettiert Glas-Spiegel; ^c Stretched Membrane; ^d Sandwich-Struktur

In Deutschland arbeiten mehrere Firmen an der Weiterentwicklung des SBP 9 kW Systems, das derzeit in allen Komponenten den höchsten Entwicklungsstand aufweist (Tabelle B.3). Deutsche und spanische Partner haben sich zu dem EuroDish Konsortium zusammengeschlossen und die 10 kW EuroDish/EnviroDish-Anlage entwickelt. Die weiterentwickelte Stirling-Maschine (Solo 161) zeigt eine Leistungssteigerung (Wellenleistung) von fast 15 % von 9,5 auf 11 kW bei gleichzeitiger Wirkungsgradsteigerung und einer Kostenreduktion um 50 % bei Einzel-

fertigung. Der bewährte Rohrreceiver wurde an die neue Maschine angepasst; gleichzeitig wurde eine Leistungsabregelung für den Überlastbereich bei hohen Einstrahlungen über 800 W/m^2 eingeführt. Der Konzentrator wurde mit dem Ziel der Optimierung für kleinere Stückzahlen völlig überarbeitet. Er besteht nun nicht mehr aus einer einzelnen Stretched Membrane Facette, sondern aus Sandwichelementen aus glasfaserverstärktem Epoxidharz. Diese Segmente werden zu einer geschlossenen Schale zusammengefügt, die auf einem ringförmigen Fachwerkträger gelagert ist und eine hohe Steifigkeit und Formtreue aufweist. Auf die Vorderseite der Schale sind Dünnglasspiegel aufgeklebt, um eine dauerhaft hohe Reflektivität von ca. 94 % zu erreichen.

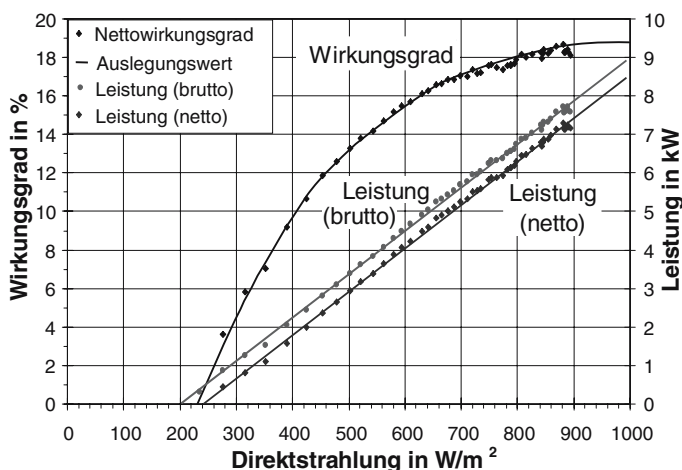


Abb. B.16 Kennlinie und Wirkungsgradverlauf der 9 kW Dish/Stirling Systeme

In den USA wird von drei Gruppen an verschiedenen Dish/Stirling Entwicklungen gearbeitet (Tabelle B.3). Die Gruppe um SES/Boeing hat das Mitte der achtziger Jahre sehr erfolgreich getestete 25 kW Dish/Stirling System von McDonnell Douglas (MDAC, heute Boeing) wieder in Betrieb genommen; derzeit werden die einzelnen Komponenten in Bezug auf eine Kostenreduktion für eine spätere Kommerzialisierung überarbeitet /B-48/, /B-49/. Das SunDish System, als weiteres Projekt, setzt den doppeltwirkenden STM 4-120 Stirlingmotor ein /B-30/. Der Konzentrator besteht hier aus 16 einzelnen Metall-Membran-Facetten, die auf eine tragende Stahlstruktur aufgesetzt sind. Als Bindeglied zwischen Konzentrator und Motor wird dabei ein direkt bestrahlter Rohrreceiver verwendet. Die aktuellen Prototypen sind als hybride Systeme ausgeführt (Zufuehrung von Deponiegas). Bei dem dritten Projekt, dem Advanced Dish Development System (ADDS), liegt der Schwerpunkt auf dem automatischen, unbewachten Betrieb, der sowohl netzgekoppelt als auch netzunabhängig realisierbar sein soll /B-10/. Hierfür wurde der Stirlingmotor Solo 161 für den netzunabhängigen Betrieb umgerüstet. Der Konzentrator besteht aus 24 einzeln parabolisch gekrümmten Glas/Metall Facetten mit

einer azimuthalen Aufhängung, die aneinandergesetzt ein fast vollständiges Paraboloid bilden. Ein Prototyp wird im Süd-Westen der USA betrieben.

Bei den Dish/Brayton-Systemen gibt es noch keine Prototyp-Anlagen. Volumetrische Receiver für Dish/Brayton-Systeme mit 30 kW elektrischer Leistung wurden jedoch bereits entwickelt und erfolgreich getestet.

B.4 Parabolrinnen-Kraftwerke

Parabolrinnen-Kraftwerke gehören zu den linienfokussierenden solarthermischen Stromerzeugungsanlagen.

Bei dieser solarthermischen Stromerzeugungstechnologie konzentriert die reflektierende Oberfläche einer parabolisch gekrümmten Spiegelfläche das Sonnenlicht auf ein entlang der Brennnlinie einer Parabel angebrachtes Absorberrohr (Abb. B.17). Das darin befindliche Wärmeträgermedium (Heat Transportation Fluid (HTF)) wird durch die konzentrierte Solarstrahlung erhitzt und durch Rohre zu einem Dampferzeuger gepumpt, dem eine Dampfturbine mit Generator nachgeschaltet ist.

Der Großteil des derzeit kommerziell erzeugten solarthermischen Stroms wird in derartigen Parabolrinnen-Anlagen produziert. Die in der Mojave-Wüste Kaliforniens errichteten neun SEGS-Anlagen (Solar Electricity Generation Systems) haben eine elektrische Gesamtnennleistung von 354 MW. Die erste Anlage (SEGS I) mit 14 MW elektrischer Leistung wurde bereits 1984 in Betrieb genommen und die zuletzt gebaute Anlage (SEGS IX) im Oktober 1990.

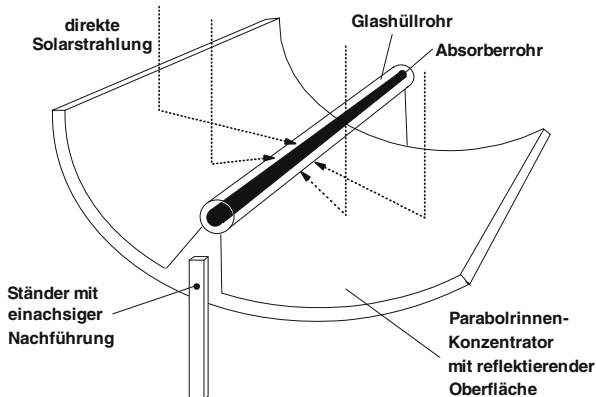


Abb. B.17 Funktionsprinzip der Strahlungssammlung bei einer Parabolrinne

B.4.1 Komponenten

Parabolrinnen-Kraftwerke setzen sich ebenfalls im Wesentlichen aus den Systemkomponenten Kollektor und dem konventionellen Kraftwerksteil zusammen. Diese Elemente werden nachfolgend diskutiert.

Kollektor und Absorber. Da es sich bei den Kollektoren um einachsige gekrümmte Parabolrinnen (parabolic troughs) handelt (Abb. B.17), müssen sie auch einachsig der Sonne nachgeführt werden. Die geometrische Konzentration des Sonnenlichts (d. h. Verhältnis Aperturfläche zu Absorberquerschnittsfläche) derartiger Parabolrinnen ist etwa 50 bis 90-fach; typisch ist ein Wert von 82 für die aktuelle Generation der EuroTrough und der LS-3 Kollektoren. Die Aperturweite eines einzelnen EuroTrough-Kollektors beträgt beispielsweise 5,76 m bei einer Länge von 99 m (EuroTrough I) bzw. von 149 m (EuroTrough II) /B-28/.

Für die Kollektoren werden Weißglasspiegel mit sehr niedrigem Eisenanteil verwendet. Der gewichtete solare Reflexionsgrad beträgt etwa 94 % im sauberen Zustand. Das Glas ist rückseitig mit einer Silberschicht verspiegelt und mit einer Epoxy-Farbschicht gegen Witterungseinflüsse geschützt. Keramikscheiben mit eingelassenen Gewindemuttern sind als Halterung auf die Spiegelfrückseite aufgeklebt.

Je nach Ausrichtung der Kollektoren ist die Leistung im Jahresverlauf nicht konstant. Bei einer Ost-West-Ausrichtung erhält man eine über das Jahr gleichmäßigere Energieausbeute. Eine Nord-Süd-Ausrichtung bedingt eine höhere Leistungsspitze im Sommer und im Winter und – wegen der höheren Kosinusverluste – einen wesentlich geringeren Ertrag.

Die einzelnen Kollektoren werden zu mehrere hundert Meter langen parallelen Strängen zusammengeschaltet. Bei den Kraftwerken SEGS III und SEGS V sind dies z. B. 70 parallele Stränge mit jeweils 14 Kollektoreinheiten.

Die Kollektoren werden einachsig der Sonne nachgeführt. Jede Kollektoreinheit verfügt über einen Sonnensensor, der zusammen mit einer Stelleinheit die Lage des Kollektors regelt. Als Antrieb kamen zunächst Schrittmotoren mit Zahnradgetriebe und später bei den moderneren LS-3 Kollektoren kostengünstigere hydraulische Antriebe zum Einsatz. Alle Kollektoren werden von einem zentralen Rechner überwacht und gesteuert.

Diese Kollektoren reflektieren das eintreffende direkte Sonnenlicht auf eine Brennnlinie. Hier befindet sich das Absorberrohr, in dem die Umwandlung in Wärme und die Übertragung dieser Energie an ein Wärmeträgermedium realisiert wird. Vor allem wegen der über Umfang und Länge nicht gleichmäßigen Wärmezufuhr ist das Absorberrohr hohen thermomechanischen Belastungen ausgesetzt. Um Verluste durch Wärmeabstrahlung zu minimieren, werden die metallischen Absorberrohre in evakuierte und selektiv beschichtete Glasrohre montiert.

Als Wärmeträger wird ein synthetisches Thermoöl eingesetzt, dessen Temperaturobergrenze durch die optischen Verhältnisse und die chemische Stabilität auf

etwa 400 °C beschränkt ist. Mit Hilfe dieses Thermoöls wird die Solarenergie zum konventionellen Kraftwerksteil transportiert.

Konventioneller Kraftwerksteil. Bei den Farm-Solaranlagen kommt – ähnlich wie bei den Turm-Solarkraftwerken – für die Umwandlung der solaren Wärme in elektrische Energie im Wesentlichen konventionelle Kraftwerkstechnik zum Einsatz. Sie wird lediglich an die hier vorliegenden Randbedingungen angepasst. Bei den SEGS-Anlagen werden beispielsweise Turbinen mit und ohne Zwischenüberhitzung eingesetzt. Bei den mit einer Thermoöltemperatur von 390 °C arbeitenden neueren SEGS-Anlagen wird durch eine derartige Zwischenüberhitzung der Wirkungsgrad der Turbine im ausschließlichen Solarbetrieb von 30,6 auf 37,7 % gesteigert /B-3/, /B-8/.

B.4.2 Anlagen

Das Anlagenschema einer Solar-Parabolrinnenanlage zeigt Abb. B.18. Hier ist zunächst der Kollektorkreis zu erkennen. Er arbeitet üblicherweise mit synthetischem Thermoöl, das bis über 400 °C und bei einem geringen Überdruck von etwa 5 bar flüssig bleibt und nicht verdampft. Der gesamte Kollektorkreislauf und die Absorberrohre werden dabei für einen kleinen Volumenstrom bei einem geringen Druckverlust ausgelegt. Der Nachteil des eingesetzten synthetischen Öls liegt in der hohen Viskosität bei niedrigen Temperaturen; dies führt insbesondere morgens beim Hochfahren der Anlage zu erhöhten Pumpverlusten. Außerdem erstarrt das verwendete Thermoöl bei etwa 12 °C.

Der Transport dieses Wärmeträgermediums erfolgt mit durch Frequenzumformer angesteuerte Pumpen. Damit können im Vergleich zu den früher eingesetzten zweistufigen Pumpen die Verluste reduziert und das Regelverhalten verbessert werden.

Das Thermoöl gibt die solare Wärme direkt oder ggf. über einen Speicher an einen Dampferzeuger ab. Eine Wärmeabgabe über einen Speicher bzw. der Einsatz einer Zusatzheizung auf der Basis fossiler Energieträger, die letztlich den gleichen Effekt haben kann, hat folgende Vorteile:

- Der Arbeitskreis wird, unabhängig von kurzzeitigen Sonnenscheinschwankungen, mit Wärme von praktisch konstantem Temperaturniveau aus dem Speicher bzw. durch den Einsatz der Zusatzheizung auf der Basis fossiler Energieträger versorgt.
- Der Kollektorkühlkreislauf und der Arbeitsmittelkreislauf können unabhängig voneinander und damit einfacher geregelt werden.
- Der Speicher bzw. die Zusatzheizung auf Basis fossiler Energieträger erhöhen die Versorgungssicherheit. Sie beeinflussen das Anlagenverhalten insgesamt positiv, da ein Teillastbetrieb mit durchschnittlich niedrigerem Wirkungsgrad weitgehend vermieden werden kann.

Nachteilig sind insbesondere bei einem Speicher der höhere anlagentechnische Aufwand und damit die entsprechenden Kosten.

Im Dampferzeuger wird aus der solaren Wärme Dampf erzeugt, mit dem in einem konventionellen Dampfkreislauf über eine Turbine und einen Generator elektrische Energie bereitgestellt werden kann. Bei den letzten realisierten Anlagen diesen Typs tritt beispielsweise der überhitzte Wasserdampf mit rund 100 bar und 371 °C in den Hochdruckteil der Turbine.

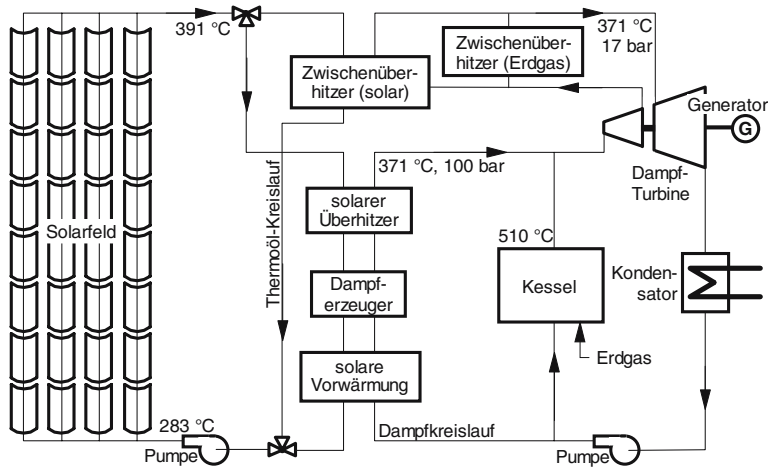


Abb. B.18 Funktionsprinzip einer Farm-Solaranlage (SEGS VI, VII) (nach /B-8/)

Tabelle B.4 zeigt wichtige Kenndaten der in Kalifornien betriebenen Farm-Solkraftwerke SEGS I bis IX /B-8/. Diese SEGS-Kraftwerke verfügen über einen gasbeheizten Kessel für Zeiten niedriger Einstrahlung.

Tabelle B.4 Solarthermische Versuchs- und Pilotanlagen

SEGS	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Leistung in MW	14	30	30	30	30	30	30	80	80
LS-1 (128 m ²)	560	536							
LS-2 (235 m ²)	48	518	980	980	992	800	400		
LS-3 (545 m ²)					32		184	852	888
Spiegelseg. in 1 000	41,60	96,46	117,60	117,60	126,21	96,00	89,22	190,85	198,91
Apertur in 1 000 m ²	82,96	190,34	230,30	230,30	250,56	188,00	194,28	464,34	483,96
Feldeintr.-Temp. in °C	240	231	248	248	293	293	293	293	293
Feldaustr.-Temp. in °C	307	321	349	349	349	390	390	390	390

Abb. B.19 zeigt beispielhaft die Leistungskennlinie von SEGS VI basierend auf den Messwerten des Jahres 1994 /B-8/. Der Zusammenhang zwischen Direktstrahlungssumme und produzierter Elektrizität ist demnach im Wesentlichen linear. Die Anlagenverluste machen sich allerdings in Form eines Schwellenwertes bemerkbar, welcher überschritten werden muss, bis netto Strom produziert wird.

Die SEGS-Anlagen sind mittlerweile technisch ausgereift und arbeiten zuverlässig. Innerhalb von wenigen Jahren wurde die Stromproduktion durch verbesser-

te Wartungs- und Betriebsverfahren wesentlich erhöht und die Kosten merklich gesenkt /B-8/. Neben weiteren Detailverbesserungen stehen derzeit folgende wesentliche technologische Weiterentwicklungen an.

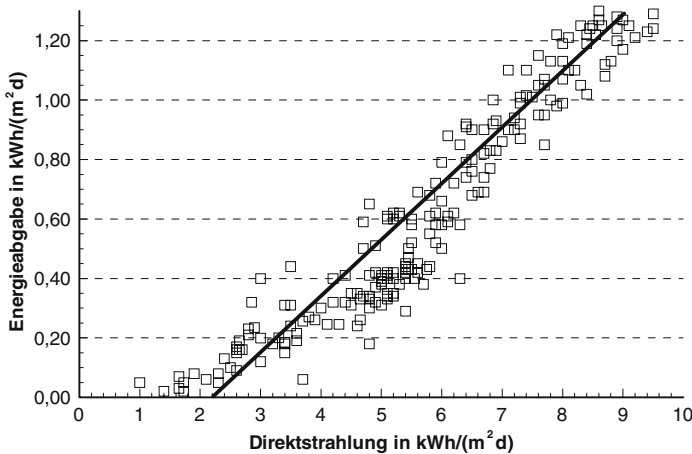


Abb. B.19 Leistungskennlinie von SEGS VI (nach /B-9/)

- Um höhere Dampfparameter zu erreichen, wird eine Direktverdampfung des Wassers in den Absorberrohren angestrebt. Sollte dies gelingen, kann der Wärmeübertrager zwischen Öl- und Wasser-Dampf-Kreislauf eingespart und gleichzeitig der Wirkungsgrad erhöht werden /B-31/.
- Zusätzlich werden auch verbesserte Absorber und Konzentratoren benötigt, die
 - zusammen mit fortschrittlichen Reinigungstechniken für die Kollektoren - sicherstellen sollen, dass ein maximaler Anteil der eintreffenden Solarstrahlung – bei einem reduzierten anlagentechnischen Aufwand – auch kostengünstig genutzt werden kann.
- Die Integration der Parabolrinnen-Anlagen in GuD-Systeme als sogenannte Integrated Solar Combined Cycle Systems ist ein weiteres Entwicklungsziel, um den solaren und konventionellen Kraftwerksteil zukünftig besser aufeinander anzustimmen /B-13/.

B.5 Aufwindkraftwerke

Das Aufwindkraftwerk ist eine nichtkonzentrierende solarthermische Stromerzeugungsanlage, dessen grundsätzlicher Aufbau in Abb. B.20 dargestellt ist. Bei einer derartigen Anlage erwärmt sich der Boden unter einem Glasdach durch die direkte und diffuse Strahlung. Aufgrund des Treibhauseffekts und der konvektiven Wärmeabgabe des Bodens erwärmt sich die Luft unter dem Glasdach und strömt zur

Mitte der Anlage, wo sie infolge der Dichteverringering durch die Erwärmung in einer Turmröhre aufsteigt (Kaminwirkung). Die Umwandlung dieser in den infolge der Solarstrahlung bewegten Luftmassen enthaltenen Energie erfolgt mit Hilfe einer Axialturbine am Fuß der Turmröhre in Bewegungsenergie der Turbine und danach über einen Generator in elektrischen Strom.

Charakteristisch für das Aufwindkraftwerk ist die Turmröhre. Zu ihren Füßen erstreckt sich ein rundes Folien- oder Glasdach. Rund 90 % der sichtbaren kurzwelligen Sonnenstrahlung werden von diesem strahlungsdurchlässigen Dach durchgelassen und vom Erdboden absorbiert. Der erhitzte Boden strahlt einen Teil dieser Energie mit größerer Wellenlänge wieder ab; aber diese Wärmestrahlung kann die Folie bzw. das Glasdach nicht passieren. Durch den so entstehenden Treibhauseffekt – vergleichbar einem Gewächshaus – wird die unter ihr befindliche Luftmenge um etwa 20 K erwärmt. Der andere Teil der Energie des Bodens wird durch konvektiven Wärmeübergang an die Luft abgegeben. Die Dichte der Luft nimmt durch die Erwärmung ab. In ihrem Bestreben, nach oben zu steigen, bewegt sich die erwärmte Luft in Richtung der unteren Öffnung des Turms und strömt in diesen hinein. Die wärmere und deshalb leichtere Luftsäule im Turm erfährt einen Auftrieb und strömt im Turm nach oben. Es entsteht eine Druckdifferenz zwischen dem Lufteinlass am Turm und der Umgebung. Der dabei entstehende Aufwind, in etwa vergleichbar mit der natürlichen Thermik, treibt die in der Fußzone des Kamins eingebaute Axialturbine an, die mit einem Generator gekoppelt ist. Da das Folien- bzw. Glasdach nach den Seiten hin offen ist, strömt, bedingt durch den Sog der Kaminwirkung der hohen Turmröhre, ständig Luft von außen nach, wird erwärmt und gelangt in den Turm.

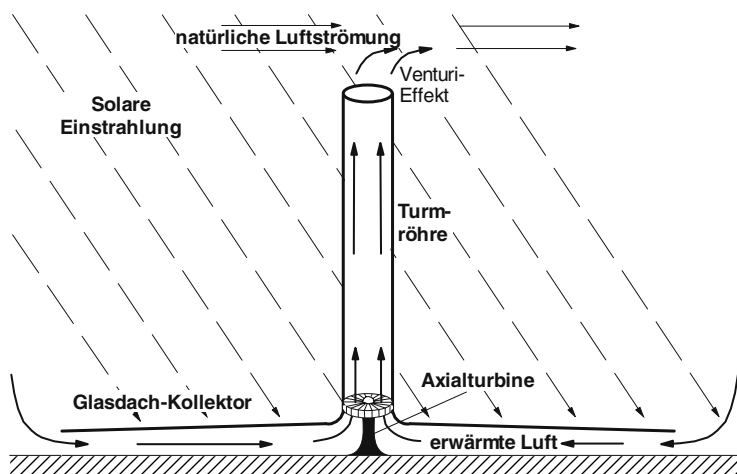


Abb. B.20 Funktionsprinzip des Aufwindkraftwerks

B.5.1 Komponenten

Kollektor. Die warme Luft für das Aufwindkraftwerk wird in einem einfachen Luftkollektor erzeugt, der aus einem Glas- oder Kunststoffdach besteht. Bei der Pilotanlage in Manzanares (Spanien) zeigte sich, dass die Glasdachvariante insbesondere bezüglich der Witterungsbeständigkeit und der technischen Lebensdauer vielversprechender ist. Um die Strömungsverluste innerhalb des Kollektors niedrig zu halten, nimmt die Kollektorhöhe zum Kamin hin zu. Damit nimmt der Strömungsquerschnitt nur radial vergleichsweise wenig ab.

Im Unterschied zu den solarthermischen Parabolrinnen- und Turmkraftwerken kann dieser Kollektor sowohl die direkte als auch die indirekte Solarstrahlung nutzen; allerdings ist der Systemwirkungsgrad um eine Größenordnung niedriger.

Der Kollektorboden wirkt dabei als natürlicher Wärmespeicher. Er nimmt im Tagesverlauf einen Teil der Strahlungsenergie auf und gibt ihn am Abend und in der Nacht wieder ab. Dadurch werden nicht nur mögliche Einstrahlungsschwankungen z. B. durch wechselnde Bewölkung ausgeglichen, sondern auch ein Teil der Stromproduktion in die Abend- und Nachtstunden verlegt (Abb. B.21). Am Abend sinkende Umgebungstemperaturen begünstigen diesen Effekt weiter, da die treibende Kraft des Kraftwerks die Temperaturdifferenz zwischen der warmen Luft im Inneren der Kaminröhre und der kühleren Umgebungsluft ist. Das Vergrößern der Wärmespeicherkapazität durch Integration eines einfachen Wasserspeichers in den Kollektor führt dazu, dass ein Aufwindkraftwerk im Grundlastbetrieb gefahren werden kann. Bei Anlagen ohne vergrößertes Wärmespeichervermögen müssen demgegenüber Turmröhre, Turbine und Generator für eine kurzzeitige Leistungsspitze ausgelegt werden, während die Anlage den größten Teil der Zeit im Teillastbereich läuft. Eine Anpassung der Stromerzeugung an Strahlungsangebot oder auch Stromnachfrage ist ebenfalls durch eine Verstellung der Turbinenschaufeln möglich.

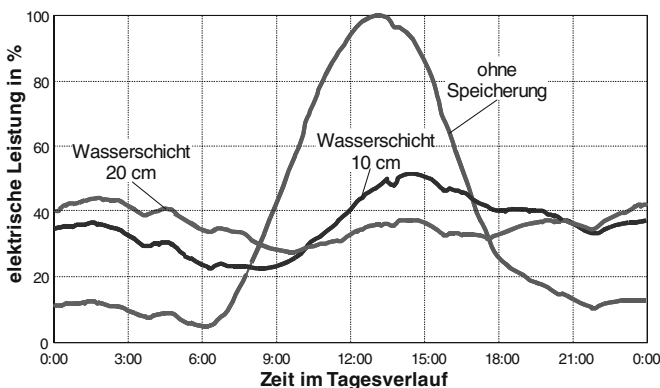


Abb. B.21 Leistungscharakteristik eines Aufwindkraftwerks als Funktion des Kollektor-Wasserspeichers (nach /B-43/)

Solche thermischer Speicher können in Form wassergefüllter Folienschläuche ausgeführt werden, die auf dem Boden unter dem Glasdachkollektor ausgelegt werden. Diese werden einmal gefüllt und dann bleibend verschlossen, so dass keine Verdunstungsverluste auftreten. Unterstellt man eine gleichmäßige Verteilung, dann entspricht die Wassermenge in den Schläuchen einer Wassertiefe zwischen 5 und 20 cm, je nach gewünschter Energieerzeugungseigenschaft /B-43/. Eine derartige Wärmespeicherung in wassergefüllten Schläuchen ist deshalb besonders vielversprechend, weil

- der Wärmeübergangskoeffizient zwischen den Schläuchen und dem Wasser schon bei geringer Strömungsgeschwindigkeit des Wassers (z. B. durch natürliche Konvektion) viel größer ist als der von schwarzer Folie ins Erdreich und
- die Wärmekapazität von Wasser etwa fünfmal so groß ist wie die des Erdbodens.

Schon bei geringen Mengen an Wasser in solchen Speicher-Schläuchen ergeben sich die in Abb. B.21 dargestellten Verläufe der Energieerzeugung im Vergleich zur ausschließlichen Bodenspeicherung.

Bei 20 cm Schichttiefe ist die Energieerzeugung in der Nacht bereits größer als am Tage. 10 cm reichen bereits aus, insbesondere wenn die Energieabgabe zusätzlich gezielt gesteuert wird. Das kann durch kleine Pumpen in den Schläuchen erreicht werden, welche die Wassergeschwindigkeiten (zwischen 2 und 10 cm/s) regeln. Der Eigenverbrauch der Pumpen dafür bleibt unter 1 % der erzeugten Strommenge /B-43/.

Turmrohre. Der Turm stellt die eigentliche Wärmekraftmaschine des Aufwindkraftwerkes dar. Der Wirkungsgrad des Kraftwerks bezüglich der Umwandlung von Wärme in kinetische Energie ist dabei eine direkte Funktion der Turmhöhe; die von den Windturbinen genutzte Druckdifferenz hängt nämlich linear von der Turmhöhe ab, wenn Reibungsverluste vernachlässigt werden. Für die abgegebene elektrische Leistung ist also die Turmhöhe mitentscheidend.

Für eine kommerzielle Anlage der 100 bzw. 200 MW-Klasse wird von einer Turmhöhe von rund 1 000 m ausgegangen. Die favorisierte Konstruktion ist ein freistehender Stahlbetonturm; es sind aber auch andere Ausführungen denkbar. Der Bau eines solchen 1 000 m hohen Turmes aus Stahlbeton gilt heute als technisch beherrschbar; es handelt sich um eine u. a. vom Kühlturmbau bekannte Bauweise.

Turbine. Grundsätzlich werden zwei Hauptvarianten der Integration der Turbine in den Turm unterschieden. Zum Einen kann eine einzelne Turbine (oder mehrere) mit vertikaler Achse in den Turmschaft eingebaut werden. Zum Anderen können auch mehrere Turbinen mit horizontaler Achse am Umfang des Turmfußes montiert werden.

Bei den verwendeten Turbinen handelt es sich i. Allg. um ummantelte druckgestufte Axialturbinen. Im Gegensatz dazu sind die zur Nutzung der Windenergie eingesetzten Windenergiekonverter geschwindigkeitsgestuft. Dabei ist der Wir-

kungsgrad einer gemantelten, druckgestuften Turbine höher als der eines offenen geschwindigkeitsgestuften Windenergiekonverters; die Mantelung verhindert ein Aufweiten der Stromröhre und erlaubt es damit, einen höheren Leistungsbeiwert zu erreichen. Dabei werden blattwinkelgeregelte Systeme verwendet. Die Strömungsverhältnisse im Aufwindkraftwerk sind aufgrund der großen thermischen Trägheit des Systems im Gegensatz zu den böenbelasteten freistehenden Windenergiekonvertern sehr gleichmäßig. Man rechnet deshalb aufgrund der günstigeren Betriebsbedingungen mit einer entsprechend deutlich längeren Turbinenlebensdauer.

B.5.2 Anlagen

Tabelle B.5 zeigt die wichtigsten Daten für die ausgeführte Pilotanlage in Manzanares in Spanien und zwei projektierte kommerzielle Kraftwerke.

Die Funktionsweise eines derartigen Aufwindkraftwerks wurde während des Betriebs einer 50 kW Pilotanlage in Manzanares, Spanien, demonstriert. Im Rahmen des neunjährigen Test- und Demonstrationsbetriebs wurde die Anlage zwischen 1986 und 1989 auch 32 Monate im Dauerbetrieb mit durchschnittlich 8,9 Stunden am Tag gefahren /B-42/, /B-43/.

Die Leistungskennlinie einer derartigen Anlage folgt im Wesentlichen dem Verlauf der anderen solarthermischen Kraftwerke. Nach der Überwindung eines bestimmten Schwellenwertes steigt die Stromerzeugung proportional mit der einestrahlten Sonnenenergie an (Abb. B.22). Der solarelektrische Wirkungsgrad derartigen Anlagen liegt zwischen 0,1 und 1 %.

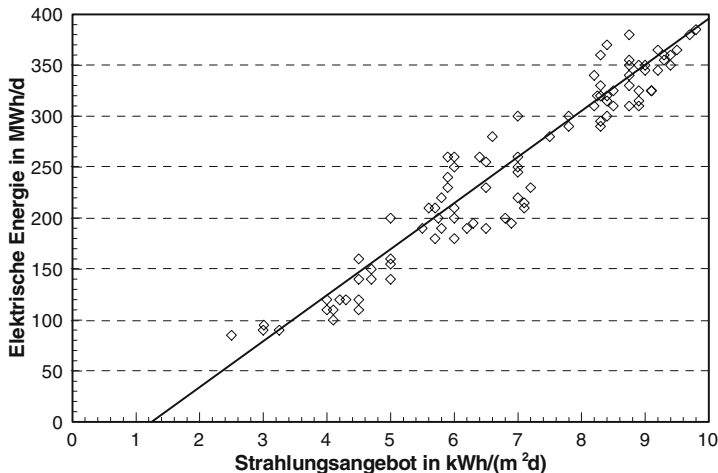


Abb. B.22 Leistungskennlinie eines Aufwindkraftwerks (berechnet für 750 m Turmhöhe, 42 m Turmradius, 1 100 m Kollektorradius und 30 MW-Anlagenleistung; nach /B-3/)

Nach Tabelle B.5 geht die Tendenz bei den geplanten Anlagen – im Vergleich zu der Pilotanlage in Manzanares – hin zu größeren Turmhöhen und damit auch deutlich höheren Leistungen. Daraus resultiert dann auch ein entsprechend größerer anlagentechnischer Aufwand. Zusammengekommen hat sich dabei aber an dem grundsätzlichen Aufbau derartiger Anlagen wenig geändert (Abb. B.20).

Tabelle B.5 Daten verschiedener Aufwindkraftwerke

	Pilotanlage Manzanares	Projekt Solar- Millennium AG	Projekt EnviroMission AG
Elektrische Leistung in MW	0,05	100	200
Turmhöhe in m	195	1 000	1 000
Turmdurchmesser in m	10	130	120
Kollektordurchm. in m	240	4 000 / 7 000 ^a	5 000 / 7 000 ^a
Turbinenanzahl	1 im Turm	1 im Turm	32 am Übergang Kollektor zu Turm
Turbinenachsenanord.	vertikal	vertikal	horizontal
Status	Betrieb bis 1989	Planung	Detailplanung

^a Kollektorgröße variiert je nach letztlich gewünschtem Kapazitätsfaktor; dieser ist hier definiert als das Verhältnis der bereitgestellten elektrischen zur maximal möglichen elektrischen Jahresenergie.

B.6 Solarteich-Kraftwerke

Bei Solarteichen handelt es sich um Anlagen zur solarthermischen Wärme- und Strombereitstellung. Als Kollektor und Wärmespeicher dient ein mit Sole gefülltes Becken. Vom Grund dieses sogenannten Solarteichs wird die Wärme entnommen und einer Wärmekraftmaschine zugeführt, die einen Generator antreibt und dadurch elektrische Energie bereitstellt.

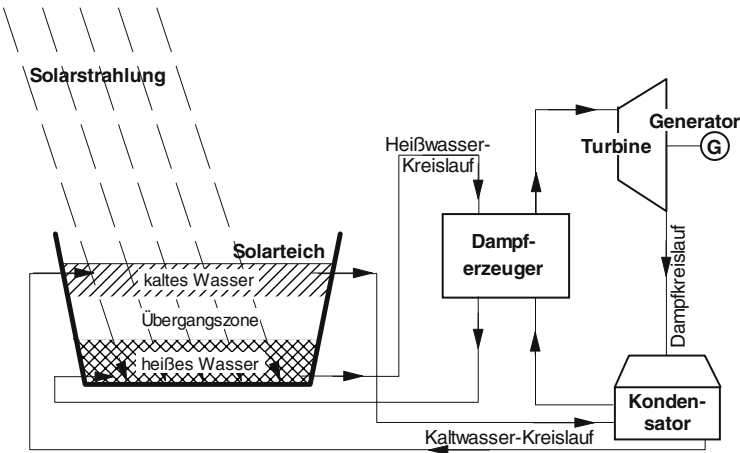


Abb. B.23 Anlagenschema eines Solarteiches

Der grundsätzliche Aufbau eines derartigen Solarteiches zeigt Abb. B.23. Demnach absorbiert das Wasser ähnlich wie der Absorber eines üblichen Solarkollektors die eintreffende direkte und diffuse Solarstrahlung und erwärmt sich infolgedessen. Die Salzkonzentration wird so eingestellt, dass sie zum Grund hin stark zunimmt. Dadurch wird die natürliche Konvektion und der damit verbundene Wärmeverlust an der Oberfläche infolge Verdampfung, Konvektion und Strahlung wirksam unterdrückt. Aus der Speicherzone am Grund kann daher Wärme bei etwa 80 bis 90 °C (Stagnationstemperatur ca. 100 °C) entnommen werden. Mit Hilfe geeigneter thermodynamischer Kreisprozesse (z. B. organischer Rankine-Prozess) kann die Wärme dann zur Stromerzeugung genutzt werden.

B.6.1 Komponenten

Teichkollektor. Beim Teichkollektor handelt es sich um natürliche oder künstlich angelegte Seen, Teiche oder Becken, die durch Wasserschichtung infolge unterschiedlichen Salzgehaltes wie ein solarthermischer Kollektor wirken. Die der Sonnenstrahlung zugewandten Schichten relativ geringeren Salzgehalts werden zur Unterdrückung von Wellen oft mit Kunststoffgittern oder -netzen versehen. Diese obere Durchmischungszone eines derartigen Teichkollektors ist üblicherweise ca. 0,5 m dick. Die sich daran anschließende Übergangszone hat eine Dicke von etwa 1,0 bis 2,0 m und die untere Speicherzone von 1,5 bis 5 m.

Wenn in einem gewöhnlichen Teich oder See die tieferen Wasserschichten von der Sonne erwärmt werden, steigt das erwärmte Wasser zur Oberfläche auf; es weist eine geringere Dichte als kälteres Wasser auf. An der Wasseroberfläche wird dann die von der Sonne zugeführte Wärme an die Atmosphäre abgegeben. Dadurch entspricht die Wassertemperatur im Mittel meist in etwa der Umgebungstemperatur. In einem Solarteich wird diese Wärmeabgabe an die Atmosphäre demgegenüber durch in den tieferen Wasserschichten gelöstes Salz verhindert. Durch das im Wasser gelöste Salz ist die Dichte des Wassers am Boden des Teichs so groß, dass es nicht an die Oberfläche aufsteigen kann, selbst wenn es von der Sonne aufgeheizt wird.

Die Salzkonzentration muss deshalb gezielt so eingestellt werden, dass sie mit der Tiefe zunimmt (Abb. B.24). Dadurch stellt sich eine zunächst stabile Wasserschichtung ein. Die Sonnenenergie, die als Licht am Teichboden ankommt und dort in Wärme umgewandelt wird, bleibt dort „gefangen“. Die obere, nahezu salzlose Wasserschicht wirkt dabei nur als transparente, wärmeisolierende Abdeckung der wärmeabsorbierenden und -speichernden tieferen Wasserschichten.

Damit die Schichtung des Solarteichs stabil bleibt, darf die Temperaturzunahme mit der Tiefe (Temperaturgradient) nicht größer sein als die Zunahme der Dichte (d. h. des Salzgehalts) mit der Tiefe. Deshalb müssen die relevanten Parameter kontinuierlich überwacht werden, um bei Bedarf rechtzeitig entsprechende Maßnahmen (Wärmeentnahme, Salzzufuhr) ergreifen zu können.

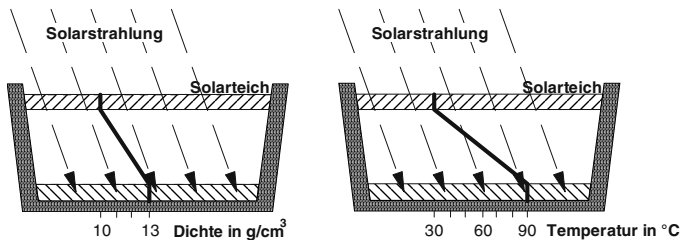


Abb. B.24 Dichte- (links) und Temperaturgradient (rechts) eines Solarteiches

Wärmeübertrager. Grundsätzlich stehen zwei Verfahren zur Wärmeentnahme aus dem Solarteich zur Verfügung.

- Mit Rohrbündel-Wärmeübertragern, durch die das Arbeitsfluid der Wärme-Kraft-Maschine strömt, kann beispielsweise der heißen Speicherzone Wärme entzogen werden.
- Der Wärmeübertrager kann auch außerhalb des Solarteichs installiert werden. Diese Konfiguration ist für Wartungsarbeiten günstiger. Hier wird die heiße Sole dann mittels eines Ansaugdiffusors aus der Speicherzone abgepumpt; die abgekühlte Sole, die den Wärmeübertrager verlässt, wird dann über einen weiteren Diffusor dem Teich in etwas größerer Tiefe wieder zugeführt. Dies bringt mehrere Vorteile mit sich: Erstens kann die Position des Ansaugdiffusors auf die Tiefe eingestellt werden, in der die Temperatur am höchsten ist. Zweitens werden die Wärmeverluste durch den Teichboden reduziert, indem das abgekühlte Wasser nahe am Grund dem Teich wieder zugeführt wird.

Eine ausreichend dimensionierte Wärmeübertragereinheit ist für den erfolgreichen Betrieb eines Solarteichs unumgänglich. Insbesondere zu Zeiten sehr hoher Einstrahlung muss nämlich gewährleistet sein, dass dem Teich genug Wärme entzogen werden kann, damit er nicht zu kochen beginnt oder die Schichtung instabil wird.

Wärme-Kraft-Maschine. Zur Wandlung der thermischen Solar-Energie in mechanische und weiter in elektrische Energie werden üblicherweise ORC-Systeme eingesetzt. Dies sind Dampfturbinenprozesse, in denen ein niedrigsiedendes Kreislaufmittel meist organischen Ursprungs eingesetzt wird. Derartige Kreisprozesse erlauben es, auch bei den geringen hier nutzbaren Temperaturdifferenzen noch elektrische Energie bereitzustellen. Die damit erreichbaren Wirkungsgrade liegen bei rund 1 % bezogen auf die eingestrahlte Sonnenenergie.

Steuerung und Regelung. Damit der Solarteich funktioniert, muss die Solarstrahlung die Speicherzone erreichen. Daraus muss ein ausreichendes Transmissionsvermögen der darüber liegenden Wasserschichten gegeben sein; dies sicher zu stellen ist eine ständige Aufgabe beim Betrieb eines Solarteichs.

Durch Diffusion erfolgt zudem ein ständiger Ausgleich der Salzkonzentration im Solarteich. Wellenbewegungen durch Wind verstärken diesen Ausgleich im oberflächennahen Bereich. Deshalb muss ständig Salz aus den oberflächennahen

Wasserschichten entnommen und tieferen Zonen wieder zugeführt werden. Dazu wird Oberflächenwasser in separaten flachen Becken (Salinen) verdampft. Das zurückbleibende Salz wird dann den tieferen Zonen wieder zugeführt.

Wird bei solarer Einstrahlung nicht genügend Wärme aus dem Speicherbereich des Solarteichs entnommen, kann die Erwärmung der tieferen Wasserschichten zu Instabilitäten der Schichtungen führen. Dies hätte die Zerstörung der für das Funktionieren des Solarteichs unbedingt erforderlichen Gradientenzone zur Folge.

Damit muss während des Betriebs eines Solarteichs der Transmissionsgrad, der Salzgehalt und die Temperatur regelmäßig überwacht werden. Dazu ist jeweils der Verlauf dieser Größen von der Wasseroberfläche bis zum Grund zu messen, damit bestimmt werden kann, wie viel Wärme dem Teich wo entnommen werden kann bzw. muss, welche Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der jeweils erforderlichen Salzkonzentration erforderlich sind, und welche Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Wasserqualität (Verhindern von Trübung durch Partikelimmission sowie durch Algen und Bakterien) erforderlich sind.

B.6.2 Anlagen

Ausgeführt sind Solarteich-Kraftwerke mit elektrischen Leistungen von wenigen zehn kW bis zu wenigen MW u. a. in Israel, Texas, Australien und Indien (zur Prozesswärmebereitstellung). Die solarelektrischen Wirkungsgrade sind mit rund einem Prozent klein; die mittleren spezifischen Leistungen liegen bei 5 bis 10 W/m² je nach Einstrahlung, Salzgehalt und Maximaltemperatur. Kurzfristig können höhere Leistungen entnommen werden, dabei kühlt sich der Solarteich entsprechend schneller ab. Tabelle B.6 zeigt typische Beispiele derartiger Anlagen.

Tabelle B.6 Daten verschiedener Solarteich-Kraftwerke

	El Paso Texas, USA	Beit Ha'Arava Israel	Pyramid Hill Australien
Leistung	300 kW _{th} 70 kW _{el}	5 MW _{el} max. 570 kW _{el} Mittelwert	60 kW _{th}
Teichfläche in m ²	3 350	250 000	3 000

Anhang C – Energetische Nutzung von Biomasse

Unter dem Begriff „Biomasse“ werden Stoffe organischer Herkunft (d. h. kohlenstoffhaltige Materie) zusammengefasst. Biomasse beinhaltet damit

- die in der Natur lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere),
- die daraus resultierenden Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle (z. B. tierische Exkreme),
- abgestorbene (aber noch nicht fossile) Phyto- und Zoomasse (z. B. Stroh) und
- im weiteren Sinne alle Stoffe, die beispielsweise durch eine technische Umwandlung und/oder eine stoffliche Nutzung entstanden sind bzw. anfallen (z. B. Schwarzlauge, Papier und Zellstoff, Schlachthofabfälle, organische Hausmüllfraktion, Pflanzenöl, Alkohol).

Die Abgrenzung der Biomasse gegenüber den fossilen Energieträgern beginnt beim Torf, dem fossilen Sekundärprodukt der Verrottung. Damit zählt Torf im strengeren Sinn dieser Begriffsabgrenzung nicht mehr zur Biomasse; dies widerspricht der in einigen Ländern (u. a. Schweden, Finnland) üblichen Praxis, wo Torf durchaus als Biomasse bezeichnet wird.

Biomasse kann zusätzlich in sogenannte Primär- und Sekundärprodukte unterteilt werden /C-1/.

- Primärprodukte sind durch direkte photosynthetische Ausnutzung der Sonnenenergie entstanden; dazu zählt im Wesentlichen die gesamte Pflanzenmasse wie z. B. land- und forstwirtschaftliche Produkte aus einem Energiepflanzenanbau (u. a. schnellwachsende Bäume, Energiegräser) oder pflanzliche Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle aus der Land- und Forstwirtschaft sowie der Weiterverarbeitungsindustrie (u. a. Stroh, Wald-, Industrierest- und Altholz).
- Sekundärprodukte beziehen dagegen ihre Energie nur indirekt von der Sonne; sie werden durch den Ab- oder Umbau organischer Substanz in höheren Organismen (z. B. Tiere) gebildet. Zu ihnen gehören z. B. die gesamte Zoomasse, deren Exkreme (z. B. Gülle, Festmist) und Klärschlamm.

C.1 Aufbau typischer Bereitstellungsketten

Eine Bereitstellungs- oder Versorgungskette, mit der Energie aus Biomasse bereitgestellt werden kann, umfasst alle Prozesse beginnend mit der Produktion der Energiepflanzen bzw. der Verfügbarmachung von Rückständen, Nebenprodukten oder Abfällen organischer Herkunft bis zur Bereitstellung der Endenergie (z. B. Fernwärme, Strom). Sie beschreibt damit den „Lebensweg“ der organischen Stoffe

von der Produktion und damit der Primärenergie bis zur Bereitstellung der entsprechenden End- bzw. Nutzenergie (Abb. C.1).

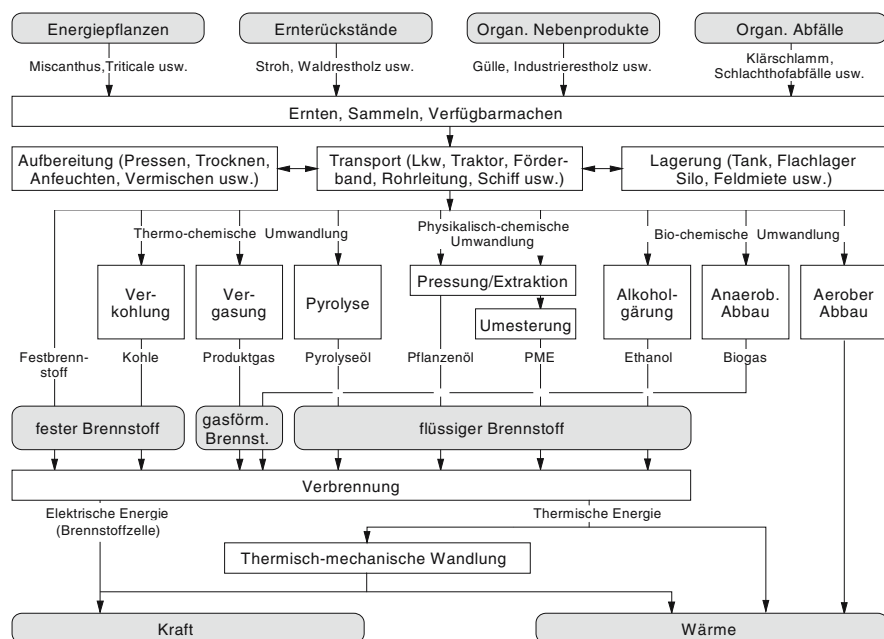


Abb. C.1 Möglichkeiten einer Energiebereitstellung aus Biomasse (grau unterlegte Kästen: Energieträger, nicht grau unterlegte Kästen: Umwandlungsprozesse; vereinfachte Darstellung ohne Licht als Nutzenergie; PME Pflanzenölmethylester; die in Brennstoffzellen ablaufenden Reaktionen werden dabei als eine „kalte“ Verbrennung angesehen) (nach /C-1/)

Das Ziel einer derartigen Biomasse-Bereitstellungs- bzw. Versorgungskette besteht darin, eine gegebene, ggf. schwankende End- bzw. Nutzenergienachfrage zu decken und die dazu erforderliche(n) Konversionsanlage(n) mit der benötigten Menge und Qualität der jeweils eingesetzten organischen Stoffe zu versorgen /C-1/.

Jede Bereitstellungskette besteht aus den Lebenswegabschnitten Biomasseproduktion bzw. -verfügbarmachung, Bereitstellung, Nutzung sowie Verwertung bzw. Entsorgung der anfallenden Rückstände, Nebenprodukte bzw. Abfälle. Jeder einzelne Abschnitt setzt sich im Regelfall wiederum aus zahlreichen Einzelprozessen zusammen. Beispielsweise erfordert die Biomasseproduktion u. a. eine Saatbettbereitung, die Ausbringung von Düngemitteln und bestimmte Pflegemaßnahmen. Da die verschiedenen Lebenswegabschnitte im Normalfall nicht am gleichen Ort angesiedelt sind, müssen die jeweiligen Entfernungen durch entsprechende Transporte (z. B. mit Lkw, über Rohrleitungen) überbrückt werden.

Eine bestimmte Bereitstellungskette wird damit letztlich durch die Randbedingungen festgelegt, die von der Biomasseproduktion (Angebotsseite) einerseits und

der Endenergiebereitstellung (Nachfrageseite) andererseits vorgegeben werden. Dazu kommen als weitere wesentliche Bestimmungsgrößen ökonomische und technische (und administrative) Randbedingungen, welche die praktische Umsetzung bzw. Realisierung einer bestimmten Kette signifikant beeinflussen. Beispielsweise wird die Wahl der Konversionstechnologie u. a. durch den oder die bereitzustellenden Endenergieträger (z. B. thermische Energie, elektrische Energie) bzw. die entsprechende Nutzenergie (z. B. Wärme, Kraft) und – ganz wesentlich – auch durch die gesetzlichen Umweltschutzvorgaben beeinflusst. Zusätzlich kann die erforderliche Entsorgung von Stoffen, die im Verlauf der Bereitstellung und/oder bei der Nutzung anfallen (z. B. ausgefaulte Gülle bei der Biogasgewinnung, Asche bei der Verbrennung von Festbrennstoffen), für eine bestimmte Bereitstellungskette bestimmend sein. Aus den möglichen Entsorgungswegen für die entstehenden Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle und/oder der Konversionstechnologie leiten sich wiederum Anforderungen an die Eigenschaften der Biomasse ab (z. B. Stückigkeit, Wassergehalt), die im Regelfall durch eine vorherige Aufbereitung bereitgestellt werden müssen. Hier ist es u. U. erforderlich, zunächst einen entsprechenden Sekundärenergieträger mit definierten Eigenschaften zu produzieren (z. B. Holzpellets, Hackschnitzel, Strohballen); dies kann mit technischen, energetischen, ökonomischen und/oder ökologischen Vorteilen verbunden sein. Daneben sind Art (z. B. holz- oder halmgutartig) und Qualität (z. B. Wassergehalt, Zusammensetzung) der verfügbaren Biomasse von Bedeutung sowie der zeitliche Verlauf der Energienachfrage bzw. des Biomasseangebots vor dem Hintergrund der jahreszeitlichen Unterschiede. Daraus resultieren wiederum möglicherweise bestimmte Lagernotwendigkeiten; u. U. kann auch eine Trocknung der Biomasse notwendig werden, damit eine Lagerstabilität gewährleistet werden kann. Zusätzlich muss die letztlich gefundene Kombination unter den gegebenen Randbedingungen vor Ort ökonomisch tragfähig, genehmigungsfähig sowie sozial akzeptabel sein /C-1/.

C.2 Wandlungsmöglichkeiten in End- bzw. Nutzenergie

Die verfügbare Biomasse kann im Verlauf einer Bereitstellungskette auf sehr unterschiedliche Weise aufgearbeitet und letztlich in die gewünschte End- bzw. Nutzenergie umgewandelt werden; hierfür sind eine Vielzahl unterschiedlichster Möglichkeiten und Optionen gegeben /C-1/.

Im einfachsten Fall wird beispielsweise lignocellulosehaltige Biomasse im Anschluss an eine mechanische Aufbereitung (u. a. Zerkleinerung, Verdichtung) direkt in einer Feuerungsanlage verbrannt. Für zahlreiche vielversprechende Anwendungen (z. B. die mobile Kraftbereitstellung im Pkw- oder Lkw-Motor, die hocheffiziente Stromerzeugung in einer Gasturbine) ist es aber sinnvoll oder sogar notwendig, flüssige oder gasförmige Sekundärenergieträger aus der Biomasse herzustellen. Der eigentlichen Umwandlung in End- bzw. Nutzenergie werden somit spezifische Veredelungsprozesse vorgeschaltet, bei denen die Energieträger hin-

sichtlich einer oder mehrerer der folgenden Eigenschaften aufgewertet werden: Energiedichte, Handhabung, Speicher- und Transporteigenschaften, Umweltverträglichkeit der energetischen Nutzung, Potenzial zur Substitution fossiler Energieträger, Verwertbarkeit von anfallenden Rückständen, Nebenprodukten oder Abfällen.

Bei den heute verfügbaren Verfahren zur Umwandlung organischer Stoffe in feste, flüssige oder gasförmige Sekundärenergieträger als Zwischenstufe vor der Umwandlung in die letztlich gewünschte End- bzw. Nutzenergie kann zwischen thermo-chemischen, physikalisch-chemischen und bio-chemischen Veredelungsverfahren unterschieden werden (Abb. C.1).

C.2.1 Thermo-chemische Umwandlung

Durch thermo-chemische Veredelungsverfahren (Vergasung, Pyrolyse und Verkohlung) werden feste Bioenergieträger in erster Linie unter dem Einfluss von Wärme in feste, flüssige und/oder gasförmige Sekundärenergieträger transformiert /C-1/.

Vergasung. Bei der thermo-chemischen Vergasung werden biogene Festbrennstoffe bei hohen Temperaturen möglichst vollständig in brennbare Gase umgewandelt. Dabei wird dem Prozess unterstöchiometrisch ein sauerstoffhaltiges Vergasungsmittel (z. B. Luft) zugeführt, durch das u. a. der in der Biomasse enthaltene Kohlenstoff in Kohlenstoffmonoxid umgewandelt und damit in einen gasförmigen Energieträger überführt werden kann. Gleichzeitig wird durch die teilweise Verbrennung des Einsatzmaterials die erforderliche Prozesswärme bereitgestellt, damit der Vergasungsprozess, der Energie benötigt, überhaupt stattfinden kann. Das entstandene niederkalorische Brenngas kann in Brennern zur Wärmebereitstellung und u. a. in Gasmotoren oder -turbinen sowie ggf. in Brennstoffzellen zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Alternativ dazu kann das erzeugte Produktgas durch weitere Umwandlungen auch in flüssige Sekundärenergieträger (z. B. Methanol) umgewandelt werden, die dann außer u. a. in Blockheizkraftwerken (BHKW) ggf. auch im Verkehrsbereich einsetzbar sind.

Pyrolyse. Bei der Pyrolyse werden biogene Festbrennstoffe unter dem ausschließlichen Einfluss von thermischer Energie mit dem Ziel einer möglichst hohen Ausbeute an flüssigen Komponenten veredelt bzw. verflüssigt. Derartigen Verfahren liegt der pyrolytische Abbau der Biomasse und damit ihre Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Sauerstoffabschluss zugrunde, durch den die Biomasse in gasförmige (z. B. Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid), flüssige (z. B. Bioöl) und feste Komponenten (z. B. Holzkohle) aufgespalten wird. Die entstandenen flüssigen Sekundärenergieträger können – wenn die dafür benötigte Technologie verfügbar ist – anschließend als Brennstoff in entsprechenden Feuerungsanlagen oder als Treibstoff in Motoren zur Kraft- (u. a. für die Stromerzeugung) bzw. gekoppel-

ten Wärme- und Kraft-Bereitstellung und u. U. auch im Traktionsbereich eingesetzt werden.

Verkohlung. Unter der Verkohlung von fester Biomasse wird eine thermo-chemische Umwandlung mit dem Ziel einer möglichst hohen Ausbeute an veredeltem Festbrennstoff (Holzkohle) verstanden. Auch dazu wird die organische Masse thermisch zersetzt. Die erforderliche Prozesswärme wird dabei häufig durch Teilverbrennung des Rohstoffs (d. h. durch die bei der thermischen Zersetzung freigesetzten gasförmigen und flüssigen Zersetzungsprodukte) bereitgestellt. Die Verkohlung unterscheidet sich damit nicht grundsätzlich von der Vergasung oder der Pyrolyse; die Bedingungen, unter denen die thermo-chemische Umwandlung hier realisiert wird, werden nur so gesetzt, dass bei den Reaktionsprodukten der Feststoffanteil maximiert wird. Die dadurch gewonnene verkohlte Biomasse kann anschließend in entsprechenden Anlagen zur Wärmebereitstellung eingesetzt werden. Alternativ ist auch eine stoffliche Nutzung möglich (z. B. Aktivkohle).

C.2.2 Physikalisch-chemische Umwandlung

Zu den Verfahren der physikalisch-chemischen Umwandlung zählen alle Möglichkeiten zur Bereitstellung von Energieträgern auf Pflanzenölbasis. Ausgangsmaterial stellen jeweils ölhaltige Biomassen dar (z. B. Rapssaat, Sonnenblumensaat). Dabei muss zunächst immer die flüssige Ölphase von der festen Phase abgetrennt werden. Beispielsweise kann dies durch ein mechanisches Auspressen realisiert werden, bei dem z. B. das Rapsöl von dem Rapskuchen (d. h. dem festen Pressrückstand) abgetrennt wird. Bei der alternativ oder additiv möglichen Extraktion wird der ölhaltigen Saat oder dem ölhaltigen Presskuchen der Ölinhalt mit Hilfe eines Lösemittels entzogen. Öl und Lösemittel werden anschließend durch Destillation getrennt. Als Feststoff bleibt nach der Extraktion das sogenannte Extraktionsschrot zurück, das beispielsweise stofflich (z. B. als Futtermittel) genutzt werden kann. Das derart gewonnene Pflanzenöl ist sowohl in seiner Reinform als auch nach einer chemischen Umwandlung (d. h. Umesterung) zu Pflanzenölmethylester (PME) in Motoren und Heiz- bzw. Heizkraftwerken (d. h. Blockheizkraftwerken) als Treib- oder Brennstoff energetisch nutzbar /C-1/.

C.2.3 Bio-chemische Umwandlung

Bei den bio-chemischen Veredelungsverfahren erfolgt die Umwandlung der Biomasse in Sekundärenergieträger bzw. in End- oder Nutzenergie mit Hilfe von Mikroorganismen und damit durch biologische Prozesse /C-1/.

Alkoholgärung. Zucker-, stärke- und cellulosehaltige Biomasse kann – nach einer entsprechenden Aufbereitung – durch eine alkoholische Gärung mit Hilfe z. B. von Hefen in Ethanol überführt werden; damit wird hier die organische Masse im

wässrigen Milieu mit Hilfe biologischer Prozesse abgebaut. Der entstandene Alkohol kann anschließend durch eine Destillation abgetrennt und im Anschluss daran – da er mit Wasser ein azeotropes Gemisch bildet – durch eine Absolutierung mit einem Schlepptmittel in Reinform gewonnen werden kann. Reines Bioethanol kann dann als Treib- und Brennstoff in Motoren oder Verbrennungsanlagen zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung eingesetzt werden. In einigen Ländern wird das Ethanol auch konventionellem Otto-Kraftstoff im Bereich weniger Prozent zugemischt; dieses Gemisch kann dann weitgehend problemlos in vorhandenen Fahrzeugen mit Ottomotor eingesetzt werden.

Anaerober Abbau. Beim anaeroben Abbau organischer Stoffe (d. h. dem Abbau unter Sauerstoffabschluss) entsteht durch die Tätigkeit bestimmter Bakterien – und damit durch biologische Abbauprozesse – ein wasserdampfgesättigtes Mischgas (Biogas), das zu rund zwei Dritteln aus Methan (CH_4) besteht. Dieser Prozess läuft natürlich z. B. auf dem Grund von Seen und technisch u. a. in Bio- oder Klärgasanlagen bzw. in Deponien ab. Das entstandene Gasgemisch kann – nach einer ggf. notwendigen Aufbereitung – in Gasbrennern oder Motoren als Energieträger genutzt werden. Grundsätzlich ist – nach einer entsprechenden Aufbereitung und Verdichtung – auch ein Einsatz im Traktionsbereich möglich.

Aerober Abbau. Beim aeroben Abbau wird die Biomasse mit Luftsauerstoff unter Wärmefreisetzung ebenfalls mit Hilfe von Bakterien im Wesentlichen zu Kohlenstoffdioxid oxidiert (Kompostierung). Die freiwerdende Wärme kann beispielsweise mit Hilfe von Wärmepumpen gewonnen und in Form von Niedertemperaturwärme verfügbar gemacht werden. Derartige Möglichkeiten haben bisher jedoch noch keine praktische Relevanz erlangt.

Anhang D – Energieeinheiten

Vorsätze und Vorsatzzeichen

Atto	a	10 ⁻¹⁸	Trillionstel
Femto	f	10 ⁻¹⁵	Billiardstel
Piko	p	10 ⁻¹²	Billionstel
Nano	n	10 ⁻⁹	Milliardstel
Mikro	μ	10 ⁻⁶	Millionstel
Milli	m	10 ⁻³	Tausendstel
Zenti	c	10 ⁻²	Hunderstel
Dezi	d	10 ⁻¹	Zehntel
Deka	da	10 ¹	Zehn
Hekto	h	10 ²	Hundert
Kilo	k	10 ³	Tausend
Mega	M	10 ⁶	Million
Giga	G	10 ⁹	Milliarde
Tera	T	10 ¹²	Billion
Peta	P	10 ¹⁵	Billiarde
Exa	E	10 ¹⁸	Trillion

Umrechnungsfaktoren

	kJ	kWh	kg SKE	kg RÖE	m³ Erdgas
1 Kilojoule (kJ)		0,000278	0,000034	0,000024	0,000032
1 Kilowattstunde (kWh)	3 600		0,123	0,086	0,113
1 kg Steinkohleneinheit (SKE)	29 308	8,14		0,7	0,923
1 kg Rohöleinheit (RÖE)	41 868	11,63	1,486		1,319
1 m³ Erdgas	31 736	8,816	1,083	0,758	

Die Zahlenangaben beziehen sich grundsätzlich auf den Heizwert (H_u).

Literatur

- /1-1/ Kaltschmitt, M.: Regenerative Energien zur Stromerzeugung I, II; Skriptum zur Vorlesung, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, WS 00/01 und SS 01
- /1-2/ Hulpke, H. u. a. (Hrsg.): Römpf Umwelt Lexikon; Georg Thieme, Stuttgart, New York, 2000, 2. Auflage
- /1-3/ BP (Hrsg.): BP Statistical Review of World Energy 2004; BP, London, Juni 2005 (www.bp.com)
- /1-4/ Hall, D.O.; Rosillo-Calle, F.; Woods, J.: Biomass Utilization in Households and Industry – Energy Use and Development; Chemosphere 29 (1994), 5, S. 1099-1119
- /1-5/ International Energy Agency (IEA) (Hrsg.): Energy statistics and balances of non-OECD countries for 1995/96; International Energy Agency (IEA), Paris, 1998
- /1-6/ Woods, J.; Hall, D.O.: Bioenergy for Development – Technical and Environmental Dimensions; FAO Environment and Energy Paper 13; Food and Agriculture Organisation (FAO), Rom, 1994
- /1-7/ NN: Energiedaten; Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Berlin, 2005 (www.bwma.bund.de)
- /1-8/ Kleemann, M.; Meliß, M.: Regenerative Energiequellen; Springer, Berlin, Heidelberg, 1993, 2. Auflage
- /1-9/ Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse; Springer, Berlin, Heidelberg, 2001
- /1-10/ Wöhe, G.: Einführung in die Allgemeine Volkswirtschaftslehre; Franz Vahlen, München, 1978, 13. Auflage
- /1-11/ Eyerer, P. (Hrsg.): Ganzheitliche Bilanzierung - Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen; Springer, Berlin, Heidelberg, 1996
- /1-12/ Kaltschmitt, M.; Reinhardt, G.A. (Hrsg.): Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung; Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1997
- /1-13/ Marheineke, T.: Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Stromerzeugungstechniken. Dissertation. Universität Stuttgart 2002
- /1-14/ Houghton, J. T. u. a.: Climate Change 1995 – The Science of Climate Change; Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1996
- /1-15/ Kaltschmitt, M.; Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energieträger in Deutschland; Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1993
- /1-16/ Schneider, S.; Kaltschmitt, M.: Erneuerbare Energien; BWK 57(2005), 4, S.87 - 96

- /1-17/ Frischknecht, R., Hofstetter, P.; Knoepfel, I.; Dones, R.; Zollinger, E.: Ökoinventare für Energiesysteme. Zürich 1996, 3. Aufl.
- /1-18/ GEMIS: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme. Version 4.12. Ökoinstitut 2002
- /1-19/ Borken, J.; Patyk, A.; Reinhardt, G. A.: Basisdaten für die ökologische Bilanzierung. Vieweg Braunschweig/Wiesbaden 1999
- /1-20/ Schulz, W.: Energiereport IV, Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030, Energiewirtschaftliche Referenzprognose, Prognos, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, 2005
- /1-21/ Strauss, K.: Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, regenerativer und nuklearer Energiequellen; Springer, Berlin, Heidelberg, 1998, 4. Auflage
- /1-22/ Wittke, F.; Ziesing, H.-J.: Primärenergieverbrauch in Deutschland von hohen Energiepreisssteigerungen und konjunktureller Belebung geprägt; DIW-Wochenbericht 7/05, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin, 2005
- /1-23/ ISO 14040: Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen, Deutsche Fassung der EN ISO 14040; Beuth, Berlin, 1997
- /1-24/ Sontow, J.; Kaltschmitt, M.: Kapazitätseffekte einer Windstromerzeugung – Quantifizierung und ökonomische Bewertung; BWK 51(1999), 11/12, S. 68 – 73

- /2-1/ Kaltschmitt, M.: Regenerative Energien zur Stromerzeugung I; Skriptum zur Vorlesung, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, WS 00/01
- /2-2/ Schäfer, H.; Rouvel, L.: Nutzung regenerativer Energien; Schriftenreihe IfE, Heft 1, Resch, München, 1992
- /2-3/ Flemming, G.: Einführung in die angewandte Meteorologie; Akademie, Berlin, 1991
- /2-4/ Kleemann, M.; Meli, M.: Regenerative Energiequellen; Springer, Berlin, Heidelberg, 1993, 2. Auflage
- /2-5/ DWD (Hrsg.): Deutsches Meteorologisches Jahrbuch; Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., verschiedene Jahrgänge
- /2-6/ Köthe, H. K.: Praxis solar- und windelektrischer Energieversorgung; VDI, Düsseldorf, 1982
- /2-7/ Liljequist, G. H.; Cihak, K.: Allgemeine Meteorologie; Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1984, 3. Auflage
- /2-8/ Troen, I.; Petersen, E. L.: European Wind Atlas; Risø National Laboratory, Roskilde, Dänemark, 1989
- /2-9/ Vischer, D.; Huber, H.: Wasserbau; Springer, Berlin, Heidelberg, 1993, 5. Auflage
- /2-10/ Liu, B. Y. H.; Jordan, R. C.: The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation; Solar Energy 4 (1960), 3, S. 1 - 19
- /2-11/ Malberg, H.: Meteorologie und Klimatologie; Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1983
- /2-12/ Häckel, H.: Meteorologie; Eugen Ulmer, Stuttgart, 1985
- /2-13/ Hoth, P.: Persönliche Mitteilung; GeoForschungsZentrum, Potsdam, März 1997

- /2-14/ Bußmann, W. u. a.: Geothermie - Wärme aus der Erde; C. F. Müller, Karlsruhe, 1991
- /2-15/ Collares-Pereira, M.; Rabl, A.: The Average Distribution of Solar Radiation Correlation between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values; *Solar Energy* 22(1977), 2, S. 155 - 164
- /2-16/ Schulz, R. u. a.: Geothermische Energie; C. F. Müller, Karlsruhe, 1992
- /2-17/ Fricke, J.; Borst, W. L.: Energie - Ein Lehrbuch der physikalischen Grundlagen; R. Oldenburg, München, Wien, 1981
- /2-18/ Duffie, J. A.; Beckman, W. A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*; John Wiley and Sons, New York, Brisbane, 1991
- /2-19/ Rummel, F. u. a.: Erdwärme - Energieträger der Zukunft?; MeSy, Bochum, 1991
- /2-20/ Hellmann, G.: Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre; *Meteorologische Zeitschrift* 32(1915), 1
- /2-21/ DWD (Hrsg.): Karte der Windgeschwindigkeitsverteilung in der Bundesrepublik Deutschland; Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., 2001
- /2-22/ Kaltschmitt, M.; Wiese, A. (Hrsg.): *Erneuerbare Energieträger in Deutschland*; Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1993
- /2-23/ Wood, J. A.: *Das Sonnensystem*; Ferdinand Enke, Stuttgart, 1984
- /2-24/ Kippenhahn, R.: *Der Stern, von dem wir leben*; Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1990
- /2-25/ Cralle, H. T.; Vietor, D. M.: Solar Energy and Biomass; in: Kitani, O.; Hall, C. W. (Hrsg.): *Biomass Handbook*; Gordon and Breach Saina Publishers, New York, USA, 1989
- /2-26/ Knauer, N.: Grundlagen der Futterproduktion auf Weidegrünland; Schriftenreihe der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Kiel, Heft 47, 1970
- /2-27/ Larcher, W.: *Ökophysiologie der Pflanzen*; Eugen Ulmer, Stuttgart, 1994, 5. Auflage
- /2-28/ Lerch, G.: *Pflanzenökologie*; Akademie, Berlin, 1991
- /2-29/ Lieth, H.: Phenology and Seasonality Modelling; *Ecol Studies* 8, Heidelberg, 1974
- /2-30/ Ludlow, M. M.; Wilson, G. L.: Photosynthesis of Tropical Pasture Plants, II; Illuminance, Carbon Dioxide Concentration, Leaf Temperature and Leaf Air Pressure Difference; *Australian Journal of Biological Science* 24 (1971), S. 449 - 470
- /2-31/ Strasburger, E.: *Lehrbuch der Botanik*; Gustav Fischer, Stuttgart, New York, 1983, 32. Auflage
- /2-32/ Sauer, N.; Reymann, D.: Standarddeckungsbeiträge 1991/92 und Rechenwerte für die Betriebssystematik in der Landwirtschaft; KTBL-Arbeitspapier 181; Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 1993
- /2-33/ Christoffer, J.; Ulbricht-Eissing, M.: Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland; Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 147; Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach a. M., 1989
- /2-34/ Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch*; Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bonn, verschiedene Jahrgänge
- /2-35/ Brehm, D. R. u. a.: Ergebnisse von Temperaturmessungen im oberflächennahen Erdreich; *Zeitschrift für angewandte Geowissenschaften* 15 (1989), 8, S. 61 - 72

- /2-36/ Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik; Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1989, 12. Auflage
- /2-37/ Haenel, R. (Hrsg.): Atlas of Subsurface Temperatures in the European Community; Th. Schäfer, Hannover, 1980
- /2-38/ Hurtig, E. u. a. (Hrsg.): Geothermal Atlas of Europe; Geographisch-Kartographische Anstalt, Gotha, 1992
- /2-39/ Haenel, R.; Staroste, E. (Hrsg.): Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland; Th. Schäfer, Hannover, 1988
- /2-40/ BP (Hrsg.): BP Statistical Review of World Energy 2004; BP, London, Juni 2005 (www.bp.com)
- /2-41/ Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse; Springer, Berlin, Heidelberg, 2001
- /2-42/ Kaltschmitt, M.; Huenges, E.; Wolff, H. (Hrsg.): Energie aus Erdwärme; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1999
- /2-43/ DWD (Hrsg.): Leitfaden für die Ausbildung im deutschen Wetterdienst; Nr. 1: Allgemeine Meteorologie; Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., 1987
- /2-44/ Streicher, W.: Sonnenenergienutzung; Vorlesungsskriptum; Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, 2005
- /2-45/ Möller, F.: Einführung in die Meteorologie; Band 2; Bibliographisches Institut, Mannheim, 1973
- /2-46/ Hsu, S. A.: Coastal Meteorology; Academic Press, London, 1988
- /2-47/ Edling, D.: Theoretische Meteorologie; Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1996
- /2-48/ Tangermann-Dlugi, G.: Numerische Simulationen atmosphärischer Grenzschichtströmungen über langgestreckten mesoskaligen Hügelketten bei neutraler thermischer Schichtung; Wissenschaftliche Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Karlsruhe Nr. 2, Karlsruhe, 1982
- /2-49/ Hoff, A. M.: Ein analytisches Verfahren zur Bestimmung der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeiten über zweidimensionalen Hügeln; Schriftenreihe des Meteorologischen Instituts der Universität Hannover, Band 28, Hannover, 1987
- /2-50/ Stull, R. B.: An Introduction to Boundary Layer Meteorology; Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988
- /2-51/ Taylor, P. A.; Teunissen, H. W.: The Askervein Project: Overview and Background Data; Boundary-Layer Meteorology 39(1987), S. 15 – 39
- /2-52/ Albiger, J. u. a.: Windkraftnutzung im Binnenland - Potential- und Standortevaluierung; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 44(1994), 10, S. 669 - 675

- /3-1/ Hammer, G.: Die neue Wärmeschutzverordnung für Architekten; Weka Baufachverlage, Augsburg, 1993
- /3-2/ Kerschberger, A.: Transparente Wärmedämmung zur Gebäudeheizung: Systemausbildung, Wirtschaftlichkeit, Perspektiven; Institut für Bauökonomie, Universität Stuttgart, Bauök-Papiere Nr. 56, Stuttgart, 1994

- /3-3/ Platzer, W.: Eigenschaften von transparenten Wärmedämmmaterialien; Tagungsband: Transparente Wärmedämmung, Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie, Gleisdorf, 1995
- /3-4/ Heimrath, R.: Sensitivitätsanalyse einer Wärmeversorgung mit Erdschicht-Direktverdampfungs-Wärmepumpen; Diplomarbeit am Institut für Wärmetechnik, TU Graz, 1998
- /3-5/ Treberspurg, M.: Neues Bauen mit der Sonne; Springer, Wien, 1994
- /3-6/ Streicher, W.: Sonnenenergienutzung; Vorlesungsskriptum am Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, 2005
- /3-7/ Streicher, W.: Informatik in der Energie- und Umwelttechnik; Vorlesungsskriptum am Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, 2004
- /3-8/ Heimrath, R.: Dokumentation - Dynamische Simulation Betonkernkühlung mit Hilfe eines Erdwärmetauschers, Institut für Wärmetechnik; TU Graz, 2000
- /3-9/ Hahne, E.; Drück, H.; Fischer, S.; Müller-Steinhagen, H.: Manuskript zur Vorlesung Solartechnik (Teil 2), Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart, 2003
- /3-10/ Feist, W.: Das Niedrigenergiehaus, Neuer Standard für energiebewusstes Bauen; C.F. Müller, Heidelberg, 1998
- /3-11/ EN 13790: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden, Berechnung des Heizenergiebedarfs, Wohngebäude, Beuth-Verlag, Berlin, 2004
- /3-12/ EN 410: Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen, Beuth-Verlag, Berlin, 2004

- /4-1/ Kleemann, M.; Meli, M.: Regenerative Energiequellen; Springer, Berlin, Heidelberg, 1993, 2. Auflage
- /4-2/ Fisch, N.: Solartechnik I und II; Skriptum zur Vorlesung; Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, 1993
- /4-3/ Duffie, J. A.; Beckman, W. A.: Solar Engineering of Thermal Processes; John Wiley and Sons, New York, Brisbane, 1991
- /4-4/ Ladener, H.: Solaranlagen; Ökobuch, Staufen, 1993
- /4-5/ FIZ (Hrsg.): Sonnenenergie zur Warmwasserbereitung und Raumheizung; TÜV Rheinland, Köln, 1988
- /4-6/ VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2067: Wirtschaftlichkeitsberechnungen von Wärmeverbrauchsanlagen, Blatt 4: Brauchwassererwärmung; VDI, Düsseldorf, 1974
- /4-7/ Gerthsen, C. u. a.: Physik; Springer, Berlin, Heidelberg, 1982, 14. Auflage
- /4-8/ Peuser, F. A.: Zur Planung von Solarkollektoranlagen und zur Dimensionierung der Systemkomponenten; Wärmetechnik 31(1986), 7, 10, 12 und 32(1987), 2
- /4-9/ Themeßl, A.; Weiß, W.: Solaranlagen Selbstbau; Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, Gleisdorf, Österreich, 1999
- /4-10/ Jenni Energietechnik (Hrsg.): Solaranlagen Planung und Bau; Oberburg, Österreich, 1989
- /4-11/ Streicher, W.: Sonnenenergienutzung; Skriptum, Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, Österreich, 2005

- /4-12/ Fisch, M. N. u. a.: Integrale Wärmeversorgungskonzepte und solare Nahwärme - Pilotprojekte in Deutschland; ASEW-Tagung, Bremen, 1994, Tagungsband
- /4-13/ Nast, M.; Nitsch, J.: Solare Wärmespeicherung einschließlich Großwärmespeicher in Baden-Württemberg; Arbeitsbericht Nr. 18, Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart, 1994
- /4-14/ VDI (Hrsg.): VDI Wärmeatlas; VDI, Düsseldorf, 2002
- /4-15/ NN: Energiedaten; Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Berlin, 2005 (www.bwma.bund.de)
- /4-16/ Clairent: Stoffwertprogramm von Antifrogenen; Clairent GmbH, Frankfurt, 1998
- /4-17/ Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE (Hrsg.): Heizen mit der Sonne; Gleisdorf, Österreich, 1997
- /4-18/ Frei, U.; Vogelsanger, P.: Solar thermal systems for domestic hot water and space heating; SPF Institut für Solartechnik Prüfung Forschung, Schweiz, 1998
- /4-19/ Streicher, W.; Oberleitner, W.: Betriebsergebnisse der größten Solaranlage Österreichs, Solarunterstütztes Biomasse-Nahwärmenetz Eibiswald; 9. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, Deutschland, 1999
- /4-20/ Thür, A.: Sonnige Herbergen, Markteinführung von Solaranlagen in Beherbergungsbetrieben; Erneuerbare Energie, 1/97, 1997
- /4-21/ Themessl, A.; Kogler, R.; Reiter, H.: Erneuerbare Energie für die Stadt Villach; Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, Gleisdorf, Österreich, 1995
- /4-22/ Fa. Solid: Firmenmitteilung
- /4-23/ Purkarthofer, G.: Marktübersicht Thermische Solaranlagen; Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, Gleisdorf, Österreich, 1998
- /4-24/ Mittelbach, W.: Sorptionsspeicher – Neue Perspektiven für Solare Raumheizung; Gleisdorf Solar 2000
- /4-25/ Streicher, W.: Minimizing the Risk of Water Hammer and Other Problems at the Beginning of Stagnation of Solar Thermal Plants – a Theoretical Approach; Solar Energy, Volume 69, Number 1-6, 2001
- /4-26/ Fink, Ch.; Heimrath, R.; Riva, R.: Forschungsprojekt Solarunterstützte Wärmenetze, Projektteil Thermische Solaranlagen für Mehrfamilienhäuser; Endbericht, Institut für Wärmetechnik, TU Graz
- /4-27/ o.V.: Vakuum-Beschichtungen von Solarabsorbern – Dünne Schichten, die es in sich haben; Sonnenenergie (2000), 6, S. 20 – 23
- /4-28/ o.V.: Markenzeichen: Dunkelblau; Sonne, Wind und Wärme 24(2000), 1, S. 18
- /4-29/ o.V.: Schlummerndes Potenzial genutzt; Sonnenenergie (2000), 6, S. 24 – 25
- /4-30/ Siegmund, A.: Neue Materialien in der Solar-Wärmespeichertechnik; 10. Symposium Thermische Solarenergie; Staffelstein, 2000, Tagungsband, S. 72 – 76
- /4-31/ Peuser, F.A.; Croy, R.; Schuhmacher, J.; Weiss, R.: Langzeiterfahrungen mit thermischen Solaranlagen; Jülich, 1997
- /4-32/ Umweltbundesamt (www.umweltbundesamt.de)

- /4-33/ Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen erneuerbaren Energien; Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 3, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002, vollständige Neubearbeitung
- /4-34/ NN: Statistik der in Deutschland installierten PV-Anlagen und Kollektorflächen; Deutscher Fachverbund Solarenergie (DFS), Berlin, Februar 2005
- /4-35/ Schneider, S.; Kaltschmitt, M.: Erneuerbare Energien; BWK 57(2005), 4, S. 87 – 96
- /4-36/ Weiß, W.: Solare Raumheizungsanlagen im europäischen Vergleich; Erneuerbare Energie 4/2000

- /5-1/ Kleemann, M.; Meli, M.: Regenerative Energiequellen; Springer, Berlin, Heidelberg, 1993, 2. Auflage
- /5-2/ Schneider, S.; Kaltschmitt, M.: Erneuerbare Energien; BWK 57(2005), 4, S. 87 – 96
- /5-3/ Kaltschmitt, M.; Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energieträger in Deutschland; Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1993
- /5-4/ Degner, A. u. a.: Elektromagnetische Verträglichkeit und Sicherheitsdesign für photovoltaische Systeme - Das europäische Verbundprojekt ESDEPS; Ostbayrisches Technologie-Kolleg (OTTI), Regensburg (Hrsg.): 14. Symposium Photovoltaische Solarenergie. Staffelstein, 1999; S. 425 – 429
- /5-5/ Moskowitz, P. D.; Fthenakis, V. M.: Toxic Materials Released from PV-Modules during Fires; Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA, 1993
- /5-6/ Raicu, A.; Heidler, K.; Klei, G.; Bücher, K.: Realistic reporting conditions for site-independent energy rating of PV devices, 11th EC Photovoltaic Solar Energy Conference, Montreux, 1992
- /5-7/ Akademie der Wissenschaften zu Berlin (Hrsg.): Sonnenenergie; Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1991
- /5-8/ Meissner, D. (Hrsg.): Solarzellen - Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Photovoltaik; Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1993
- /5-9/ Schmidt, H.; Sauer, D.U.: Wechselrichter-Wirkungsgrade – Praxisgerechte Modellierung und Abschätzung; Sonnenenergie, Heft 4, 1996, S. 43-47
- /5-10/ Luque, A.; Hegedus, S. (eds.): Handbook of Photovoltaic Sciences and Engineering; Wiley 2003, ISBN 0-471-49196-9
- /5-11/ Bernreuter, J.: Strom von der grünen Wiese; Photon 6 (2001), 2, S. 28 – 32
- /5-12/ Hulpke, H. u. a. (Hrsg.): Römpf Umwelt Lexikon; Georg Thieme, Stuttgart, New York, 2000, 2. Auflage
- /5-13/ Sauer, D.U.; Kaiser, R.: Der Einfluß baulicher und meteorologischer Bedingungen auf die Temperatur des Solargenerators – Analyse und Simulation; 9. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1994, S. 485 – 491
- /5-14/ Sauer, D.U.: Untersuchungen zum Einsatz und Entwicklung von Simulationsmodellen für die Auslegung von Photovoltaik-Systemen; Diplomarbeit, TH Darmstadt / Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Freiburg, 1994
- /5-15/ Schmid, J. (Hrsg.): Photovoltaik - Strom aus der Sonne; C. F. Müller, Karlsruhe, 1993, 3. Auflage

- /5-16/ Ladener, H.: Solare Stromversorgung; Ökobuch, Staufen, 1986
- /5-17/ Köthe, H. K.: Stromversorgung mit Solarzellen; Franzis, München, 1991, 2. Auflage
- /5-18/ Lehner, G. (Hrsg.): Solartechnik; Kontakt + Studium Band 21; Lexika, Grafenau, 1978
- /5-19/ Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): Photovoltaikanlagen – Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit; BINE Projekt Info Nr. 6, September 1998
- /5-20/ Diefenbach G.: Photovoltaikanlagen als Naturschutzzonen - Landnutzung in Harmonie mit der Natur bei zentralen Photovoltaikanlagen am Beispiel der 340 kW-Anlage in Kolben-Gondorf; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 44(1994), S. 41 – 64
- /5-21/ Kaltschmitt, M.: Regenerative Energien zur Stromerzeugung I; Skriptum zur Vorlesung, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, WS 00/01
- /5-22/ Moskowitz, P. D.; Fthenakis, V. M.: Toxic Material Release from PV-Modules during Fires; Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, 1993
- /5-23/ Götzberger, A.; Stahl, W.: Global Estimation of Available Solar Radiation And Costs of Energy for Tracking And Non-Tracking PV-Systems; Proceedings, 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, Nevada, USA, Oktober 1985, Tagungsband
- /5-24/ Jossen, A. (Hrsg.): Wiederaufladbare Batterien – Schwerpunkt: stationäre Systeme; Seminarband OTTI-Technologiekolleg, Ulm 2004
- /5-25/ Möller, J.; Heinemann, D.; Wolters, D.: Integrierte Betrachtung der Umweltauswirkungen von Photovoltaik-Technologien; Ostbayrisches Technologie-Kolleg (OTTI), Regensburg (Hrsg.): 13. Symposium Photovoltaische Solarenergie. Staffelstein, 11. – 13. März 1998. S. 549 – 553
- /5-26/ Shockley, W.: Electrons and Holes in Semiconductors; D. Van Nostrand, Princeton, New York, USA, 1950
- /5-27/ Sze, S. M.: Physics of Semiconductor Devices; J. Wiley & Sons, New York, USA, 1981
- /5-28/ Fonash, S. J.: Solar Cell Device Physics; Academic Press, New York, USA, 1981
- /5-29/ Coutts, T. J.; Meakin, J. D. (Hrsg.): Current Topics in Photovoltaics; Academic Press, London, UK, 1985
- /5-30/ Henry, C. J.: J. Appl. Phys. 51, 4494 (1980)
- /5-31/ Bonnet, D.: Cadmium Telluride Solar Cells; in: Archer, M. D.; Hill, R.: Clean Electricity from Photovoltaics; Imperial College Press, London, 2001
- /5-32/ Rau, U.; Schock, H. W.: Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells; in: Archer, M. D.; Hill, R.: Clean Electricity from Photovoltaics; Imperial College Press, London, 2001
- /5-33/ Wagner, R.; Sauer, D.U.: Charge strategies for valve-regulated lead/acid batteries in solar power applications, J. Power Sources 95(2001), S. 141 – 152
- /5-34/ Bloss, W. H. u. a.: Grid-connected Solar Houses; Proc. 10th EC Photovoltaic Solar Energy Conference, Lisbon, April 1991, Tagungsband
- /5-35/ Shaped Crystal Growth 1986; J. Crystal Growth 82(1987)

- /5-36/ Chao, C.; Bell, R. O.: Effect of Solar Cell Processing on the Quality of EFG Nonagon Growth; 19th IEEE Photovoltaic Spec. Conference, New Orleans, USA, 1987; Tagungsband
- /5-37/ Werner, J. H.; Bergmann, R.; Brendel, R.: Advances in Solid State Physics; in: Helbig, R.: Festkörperprobleme; Vieweg, Braunschweig, 1994, Band 34, S. 115
- /5-38/ Bergmann, R. B. u. a.: Crystalline Silicon Films by Chemical Vapor Deposition on Glass for Thin Film Solar Cells; 25th IEEE Photovoltaic Spec. Conference, Washington, D.C., USA, 1996; Tagungsband
- /5-39/ Green, M. A.; Emery, K.; King, D. L.; Igari, S.; Warta, W.: Solar Cell Efficiency Tables (Version 19), Progr. in Photovoltaic Research & Applications 10(2002), 55
- /5-40/ Goetzberger, A.; Voß, B.; Knobloch, J.: Sonnenenergie: Photovoltaik; Teubner, Stuttgart, 1997
- /5-41/ Stäblier, D. L.; Wronski, C.: Optically induced conductivity changes in discharge-produced amorphous silicon; J. Appl. Phys. 51(1980), 3262
- /5-42/ Keppner, H.; Meier, J.; Torres, P.; Fischer, D.; Shah, A.: Microcrystalline Silicon and Micromorph Tandem Solar Cells; Applied Physics A (Materials Science Processing) A69, 169(1999)
- /5-43/ Catchpole, K. R.; McCann, M. J.; Weber, K. J.; Blakers, A. W.: A Review of Thin-Film Crystalline Silicon for Solar Cell Applications. II. Foreign Substrates; Solar Energy Materials and Solar Cells 68(2001), 173
- /5-44/ Brendel, R.: Review of Layer Transfer Processes for Crystalline Thin-Film Silicon Solar Cells; J. Appl. Phys. 40(2001), 4431
- /5-45/ Werner, J. H.; Dassow, R.; Rinke, T. J.; Köhler, J. R.; Bergmann, R. B.: From Polycrystalline to Single Crystalline Silicon on Glass; Thin Solid Films 383(2001), 95 – 100
- /5-46/ Roth, W. (Hrsg.): Netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen; Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, Juni 2001
- /5-47/ Schweizer, P.; Shresta, J. N.: What can Solar Electricity provide for the Himalayan Society? The case of Nepal; 13. European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nizza, 1995
- /5-48/ Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen erneuerbaren Energien; Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 3, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002, vollständige Neubearbeitung
- /5-49/ Hanisch, R. u. a.: Einsatzmöglichkeiten der Photovoltaik für eine zukunftsfähige Elektrizitätsversorgung in Deutschland; In: Ostbayerisches Technologie-Kolleg (OTTI), Regensburg (Hrsg.): 14. Symposium Photovoltaische Solarenergie. Staffelein, 1999; 526 – 530
- /5-50/ Taguchi, M.; Kawamoto, K.; Tsuge, S.; Baba, T.; Sataka, H.; Morizane, M.; Uchihasi, K.; Nakamura, N.; Kyiama, S.; Oota, O.: HITM Cells – High Efficiency Crystalline Si Cells with novel structure, Progr. in Photovoltaic Research & Applications 8(2000), 503

- /5-51/ Luque, A.: Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration; Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1989
- /5-52/ O'Regan, B.; Graetzel, M.: A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films; Nature 353(1991), 737
- /5-53/ Hinsch, A.; Kroon, J. M.; Kem, R.; Uhlendorf, I.; Holzbock, J.; Meyer, A.; Ferber, J.: Long-term Stability of Dye-sensitised Solar Cells; Progr. in Photovoltaic Research & Applications 9(2001), 425
- /5-54/ Archer, M. D.; Hill, R.: Clean Electricity from Photovoltaics; Imperial College Press, London, 2001
- /5-55/ Green, M. A.: High Efficiency Silicon Solar Cells; Trans Tech Publications, Aedermannsdorf, Schweiz, 1987
- /5-56/ Green, M. A.: Silicon Solar Cells: Advanced Principles and Practice; Bridge Printery, Sydney, 1995
- /5-57/ Roth, W. (Hrsg.): Dezentrale Stromversorgung mit Photovoltaik; Seminarhandbuch Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, 2002
- /5-58/ NN: Kostendaten zu Photovoltaiksystemen bzw. Systemkomponenten; Photon Special 2005, Solar Verlag, Aachen, 2005

- /6-1/ Gasch, R.; Twele, J.: Windkraftanlagen; Teubner, Stuttgart, 2005, 4. Auflage
- /6-2/ Molly, J. P.: Windenergie - Theorie, Anwendung, Messung; C. F. Müller, Heidelberg, 1997, 3. Auflage
- /6-3/ Hau, E.: Windkraftanlagen; Springer, Berlin, Heidelberg, 2002
- /6-4/ Heier, S.: Windkraftanlagen; Teubner, Stuttgart, 2005, 4. Auflage
- /6-5/ Kleemann, M.; Meliß, M.: Regenerative Energiequellen; Springer, Berlin, Heidelberg, 1993, 2. Auflage
- /6-6/ Betz, A.: Das Maximum der theoretischen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren; Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen, 20. 9. 1920
- /6-7/ Klosse, R.: Flickererzeugung durch Windkraftanlagen; DEWI-Magazin 6(1996), 10, S. 30 - 38
- /6-8/ Kaltschmitt, M.: Regenerative Energien zur Stromerzeugung I; Skriptum zur Vorlesung, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, WS 00/01
- /6-9/ Jarras, L.: Strom aus Wind; Springer, Berlin, Heidelberg, 1981
- /6-10/ Krohn, S.: Offshore Wind Energy: Full Speed Ahead; www.windpower.org/aricles/offshore.htm
- /6-11/ Niedersächsische Energie-Agentur, Deutsches Windenergie-Institut, Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung (Hrsg.): Untersuchung der wirtschaftlichen und energiewirtschaftlichen Effekte von Bau und Betrieb von Offshore-Windparks in der Nordsee auf das Land Niedersachsen; Projekt-Nr. 2930, Hannover, 2001
- /6-12/ Greenpeace (Hrsg.): Zukunft Windkraft – Die Energie aus dem Meer. Technische Möglichkeiten und ökologische Randbedingungen; Deutsches Windenergie-Institut, Wilhelmshaven, 2000

- /6-13/ Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.): Geräuschemissionen und Geräuschmissionen im Umfeld von Windkraftanlagen; Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Potsdam, 1997
- /6-14/ Osten, T.; Pahlke, T.: Schattenwurf von Windenergieanlagen: Wird die Geräuschabstrahlung der MW-Anlagen in den Schatten gestellt?; DEWI Magazin 7(1998), 13, S. 6 – 12
- /6-15/ Pohl, J.; Faul F., Mausfeld, R.: Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergieanlagen, Untersuchung im Auftrag des Landes Schleswig-Holstein; Institut für Psychologie, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Juli 1999
- /6-16/ Michalak, J.: Schattenwurf des Rotors einer Windkraftanlage; Windenergie aktuell 5(1995), 2, S.17 – 23
- /6-17/ Imrie, S. J.: The Environmental Implications of Renewable Energy Technology - Full Report. DG Research, The STOA Programme; Luxembourg, Selbstverlag, 1992
- /6-18/ Galler, C.: Auswirkung der Windenergienutzung auf Landschaftsbilder einer Mittelgebirgsregion – Optimierung der Standortplanung aus landschaftsästhetischer Sicht; Schriftenreihe des Institutes für Landschaftspflege und Naturschutz am Fachbereich für Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover, Arbeitsmaterialien 43, Hannover, August 2000
- /6-19/ Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): Windenergie und Naturschutz; BINE-Projektinfo Nr. 2, März 1996
- /6-20/ Loske, K.-H.: Einfluss von Windkraftanlagen auf das Verhalten der Vögel im Binnenland; in: BWE (Hrsg.): Vogelschutz und Windenergie – Konflikte, Lösungsmöglichkeiten und Visionen; BWE, Osnabrück, 1999
- /6-21/ Vögel brüten auch in der Nähe von Windparks; Neue Energie 10(2001), 4, S. 25
- /6-22/ Menzel, C.: Mehr Hasen gezählt – Wildtiere lassen sich durch Windturbinen nicht stören; Neue Energie 10(2001), 4, S. 24
- /6-23/ Bundesamt für Naturschutz (BfN): Empfehlungen des Bundesamtes für Naturschutz zu naturschutzverträglichen Windkraftanlagen; BfN, Bonn-Bad Godesberg, 2000
- /6-24/ Umweltbundesamt (UBA): Hintergrundpapier zum Forschungsprojekt: Untersuchungen zur Vermeidung und Verminderung von Belastungen der Meeresumwelt durch Offshore-Windenergieparks im küstenfernen Bereich der Nord- und Ostsee (FKZ 200 97 106); UBA, Berlin, 2001
- /6-25/ Institut für Tourismus- und Bäderforschung in Nordeuropa (Hrsg.): Touristische Effekte von On- und Offshore-Windkraftanlagen in Schleswig-Holstein; Institut für Tourismus- und Bäderforschung in Nordeuropa, Kiel, September 2000
- /6-26/ Kehrbaum R.; Kleemann, M.; Erp van, F.: Windenergieanlagen – Nutzung, Akzeptanz und Entsorgung; Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment, Band 10, Jülich 1998
- /6-27/ Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen erneuerbaren Energien; Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 3, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002, vollständige Neubearbeitung
- /6-28/ Schneider, S.; Kaltschmitt, M.: Erneuerbare Energien; BWK 57(2005), 4, S. 87 – 96

- /6-29/ Matthies, H. G.; Garrad, A. D.: Study of offshore wind energy in the EC; Verlag Natürliche Energie, Brekendorf, 1994
- /6-30/ Ender, C.: Windenergienutzung in Deutschland – Stand 31. 12. 2004; DEWI Magazin Nr. 26, Februar 2005, S. 24 – 36
- /6-31/ Beitz, W.; Küttner, K.H. (Hrsg.): Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer, Berlin, Heidelberg, 1981, 14. Auflage
- /6-32/ Bundesverband Windenergie e.V. (Hrsg.): Windenergie 2005, Marktübersicht; BWE Service GmbH, Osnabrück, April 2005

- /7-1/ Schröder, W. u. a.: Grundlagen des Wasserbaus; Werner, Düsseldorf, 1999, 4. Auflage
- /7-2/ Giesecke, J.: Wasserbau; Skriptum zur Vorlesung, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 2000
- /7-3/ Laufen, R.: Kraftwerke; Grundlagen, Wärmekraftwerke, Wasserkraftwerke; Springer, Berlin, Heidelberg, 1984
- /7-4/ Rotarius, T. (Hrsg.): Wasserkraft nutzen - Ratgeber für Technik und Praxis; Rotarius, Cölbe, 1991
- /7-5/ Rouvel, L.; Schaefer, H.: Nutzung regenerativer Energien; Schriftenreihe IfE, Band 1; Resch, München, 1992
- /7-6/ Pucker, N.: Physikalische Grundlagen der Energietechnik; Springer, Wien, New York, 1986
- /7-7/ Kaltschmitt, M.: Regenerative Energien zur Stromerzeugung I; Skriptum zur Vorlesung, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, WS 00/01
- /7-8/ Giesecke, J.; Mosony, E.: Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb; Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, 4. Auflage
- /7-9/ Bundesamt für Konjunkturfragen (Hrsg.): Einführung in Bau und Betrieb von Kleinstwasserkraftanlagen, Bern (Schweiz), 1993
- /7-10/ Vischer, D.; Huber, A.: Wasserbau; Springer, Berlin, Heidelberg, 2002, 6. Auflage
- /7-11/ König, F.: Bau von Wasserkraftanlagen; C. F. Müller, Karlsruhe, 1985
- /7-12/ Denzel, P.: Dampf- und Wasserkraftwerke; Bibliographisches Institut Mannheim, Mannheim, 1968
- /7-13/ Wasserwirtschaftsverband Baden-Württemberg (Hrsg.): Leitfaden für den Bau von Kleinwasserkraftwerken; Frankh Kosmos, Stuttgart, 1994, 2. Auflage
- /7-14/ Voith (Hrsg.): Francis-Schachtelturbinen in standardisierten Baugrößen; Werkschrift 2519, Voith, Heidenheim, 1985
- /7-15/ Voith (Hrsg.): Pelton-turbinen in standardisierten Baugrößen; Werkschrift 2517, Voith, Heidenheim, 1985
- /7-16/ Zaugg, C.; Leutewiler, H.: Kleinwasserkraftwerke und Gewässerökologie; Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 1998, 2. Auflage
- /7-17/ Bunge, T. et al.: Wasserkraft als erneuerbare Energiequelle – rechtliche und ökologische Aspekte; UBA Texte 01/01, Berlin, 2001

- /7-18/ Jorde, K.: Ökologisch begründete dynamische Mindestwasserregelungen in Ausleitungsstrecken; Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 90, Stuttgart, 1997
- /7-19/ Tönnmann, F.: Umweltverträglichkeitsuntersuchungen bei der Modernisierung von Wasserkraftwerken; In: Wasserbau und Wasserwirtschaft Nr. 75: Betrieb, Unterhalt und Modernisierung von Wasserbauten; Lehrstuhl für Wasserbau, Technische Universität München, 1992
- /7-20/ Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.): Grundzüge der Gewässerpflege; Fließgewässer; Schriftenreihe Heft 21, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München, 1987
- /7-21/ Strobl, T. u. a.: Ein Beitrag zur Festlegung des Restabflusses bei Ausleitungskraftwerken; Wasserwirtschaft 80(1990), 1, S. 33 - 39
- /7-22/ Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie Baden-Württemberg (Hrsg.): Wasserkraft in Baden-Württemberg; Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1991
- /7-23/ Frohnholzer, J.: Systematik der Wasserkräfte in der Bundesrepublik Deutschland; Bayerische Wasserkraftwerke, München, 1963
- /7-24/ BMFT (Hrsg.): Nutzung der Wasserenergien; Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen, KFA, Jülich, 1976
- /7-25/ Bostel, J. u. a.: Möglicher zukünftiger Beitrag regenerativer Energiequellen zur Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland; KFA (Jül-156), Jülich, Juni 1982
- /7-26/ DIW, ISI (Hrsg.): Erneuerbare Energiequellen, Abschätzung des Potentials in der Bundesrepublik Deutschland; DIW und ISI, Berlin und Karlsruhe, 1984
- /7-27/ Rhode, F.: Nutzung regenerativer Energie; Handbuchreihe erneuerbarer Energie; Band 13; TÜV Rheinland, Köln, 1988
- /7-28/ Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ (Hrsg.): Studienkomplex A 2.3: Wasserkraft; DIW und Institut für Wasserbau, Berlin und Stuttgart, 1989
- /7-29/ Ludwig, M.: Die Wasserkraftpotentiale des Freistaates Sachsen und der anderen neuen Bundesländer; VDI-Kolloquium, Dresden, Juni 1994, Tagungsband
- /7-30/ Kaltschmitt, M.; Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energieträger in Deutschland; Springer, Berlin, Heidelberg, 1993
- /7-31/ Schneider, S.; Kaltschmitt, M.: Erneuerbare Energien; BWK 57(2005), 4, S. 87 – 96
- /7-32/ Bayerisches Staatsministerium des Innern (Hrsg.): Wasserkraftausbau in Bayern; Schriftenreihe „Wasserwirtschaft in Bayern“, Heft 20, Bayerisches Staatsministerium des Innern, München, 1988
- /7-33/ Giesecke, J.; Jorde, K.: Nutzung der Wasserkraft in der Region Hochrhein-Bodensee; in Boysen, B. u. a.: Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Neckar-Alb; Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 5, Universität Stuttgart, Juli 1990

- /7-34/ BMWi (Hrsg.): Bericht über den Stand der Markteinführung und der Kostenentwicklung von Anlagen zur Erzeugung von Strom (Erfahrungsbericht zum EEG); Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin, 2002
- /8-1/ Neubarth, J.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Regenerative Energien in Österreich – Systemtechnik, Potenziale, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte; Springer, Wien, 2000
- /8-2/ Pomhoff, C. u. a.: Technik und Einsatzmöglichkeiten für Wärmepumpen (Untersuchung für Bayern); Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Verkehr, München, 1993
- /8-3/ Halozan, H.; Holzapfel K.: Heizen mit Wärmepumpen, TÜV Rheinland, Köln, 1987
- /8-4/ Hackensellner, T.; Dünnwald, G.: Wärmepumpen; Teil VIII der Reihe Regenerative Energien, VDI, Düsseldorf, 1996
- /8-5/ Günther-Pomhoff, C.; Pfitzner, G.: Wärmepumpen; Forschungsbericht der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 1995
- /8-6/ Europäisches Komitee für Normung (Hrsg.): Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen, EN 378-1, Juni 2000
- /8-7/ Sanner, B., Knoblich K.: Umweltverträglichkeit der Wärmeträgermedien und Kältemittel verschiedener erdgekoppelter Wärmepumpensysteme; Zeitschrift für angewandte Geowissenschaften 16(1991), 10, S. 67 – 90
- /8-8/ SIA (Hrsg.): Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme. Serie „Planung, Energie und Gebäude“; SIA-Dokumentation D0136, Zürich, 1996
- /8-9/ Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (Hrsg.): Anlagen zur Gewinnung von Erdwärme (AGE); ÖWAV-Regelblatt 207, Wien, 1993
- /8-10/ Ingerle, K.; Becker, W.: Ausbreitung von Wärmepumpen-Kältemitteln im Erdreich und Grundwasser; Studie im Auftrag der Elektrizitätswerke Österreichs, Wien, 1995
- /8-11/ Kraus, W. E.: Sicherheit von CO₂-Kälteanlagen, Kohlendioxid – Besonderheiten und Einsatzchancen als Kältemittel; Statusbericht des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins, Nr. 20, Stuttgart, November 1998
- /8-12/ Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): CO₂ als Kältemittel für Wärmepumpe und Kältemaschine; BINE-Projektinfo 10/00, 2000
- /8-13/ Kaltschmitt, M; Lux, R.: Außenluft- und erdreichgekoppelte Wärmepumpen; Zeitschrift für Energiewirtschaft 21(1997), 1, S. 69 - 77
- /8-14/ Schneider, S.; Kaltschmitt, M.: Erneuerbare Energien; BWK 57(2005), 4, S. 87 – 96
- /8-15/ Sanner, B.: Erdgekoppelte Wärmepumpen, Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation; Fachinformationszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 1992
- /8-16/ Stiebel-Eltron (Hrsg.): Warmes Wohnen mit Umweltenergie, Wärmepumpenanlagen, Planung und Installation; Ausgabe 1989/1991
- /8-17/ Gerbert H.: Vergleich verschiedener Erdkollektor-Systeme; Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, Fachinformationszentrum Karlsruhe, 1991
- /8-18/ Sanner, B.; Rybach, L.; Eugster, W.J.: Erdwärmesonden Burgdorf – ein Programm und viele Missverständnisse; Geothermie CH 1/97, S. 4-6

- /8-19/ Eugster, W.J.; Rybach, L.: Langzeitverhalten von Erdwärmesonden – Messungen und Modellrechnungen am Beispiel einer Anlage in Elgg (ZH), Schweiz; IZW-Bericht 2/97, S. 65-69, Karlsruhe 1997
- /8-20/ Sanner, B.; Knoblich K.: Umwelteinfluss erdgekoppelter Wärmepumpen; Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, FIZ Karlsruhe, Karlsruhe, 1991
- /8-21/ Sanner, B.: Erdgekoppelte Wärmepumpen, Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation; IZW-Bericht 2/92, FIZ, Karlsruhe 1992
- /8-22/ Gerbert, H.: Vergleich verschiedener Erdkollektor-Systeme; - IZW-Bericht 3/91, S. 75-86, FIZ, Karlsruhe 1991
- /8-23/ Messner, O. H .C.; De Winter, F.: Umweltschutzgerechte Wärmepumpenkollektoren hohen Wirkungsgrades; IZW-Bericht 1/94, FIZ, Karlsruhe 1994
- /8-24/ Bukau, F.: Wärmepumpentechnik, Wärmequellen – Wärmepumpen – Verbraucher - Grundlagen und Berechnungen; Oldenbourg, München, 1983
- /8-25/ Hellström, G.: PC-Modelle zur Erdsondenauslegung; IZW Bericht 3/91, FIZ, Karlsruhe 1991
- /8-26/ Fehr, A.: Risikodeckung des Bundes für Geothermie-Bohrungen; Geothermie CH 1/91, S. 2, Biel 1991
- /8-27/ ASUE (Hrsg.): Gas-Wärmepumpen; Broschüre der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V., Hamburg, 1996
- /8-28/ Kaltschmitt, M.; Huenges, E.; Wolff, H. (Hrsg.): Energie aus Erdwärme; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1999
- /8-29/ Katzenbach, R.; Knoblich, K.; Mands, E.; Rückert, A.; Sanner, B.: Energiepfähle – Verbindung von Geotechnik und Geothermie; IZW-Bericht 2/97, FIZ, Karlsruhe 1997
- /8-30/ NN: Der harte Winter deckt bei Wärmepumpen manche Schwachstellen auf; VDI Nachrichten 9/2002, S. 15 (1.3.2002)
- /8-31/ Cube, H. L.; Steimle, F.: Wärmepumpen – Grundlagen und Praxis; VDI-Verlag GmbH, 1984
- /8-32/ Gilli, P. V.; Streicher, W.; Halozan, H.; Breembroeck, G.: Environmental Benefits of Heat Pumping Technologies; IEA Heat Pump Centre, Analysis Report HPC – AR6, März 1999
- /8-33/ Kruse, H.; Heidelck, R.: Heizen mit Wärmepumpen; Verlag TÜV Rheinland, Köln, 2002, 3. erweiterte und völlig überarbeitete Auflage
- /8-34/ Streicher, W. u. a.: Benutzerfreundliche Heizungssysteme für Niedrigenergie- und Passivhäuser, Endbericht zum Projekt in der Forschungsausschreibung „Haus der Zukunft“, BMVIT, Hrsg.: Institut für Wärmetechnik, TU Graz, 2004
- /9-1/ Schön, M.; Rockel, W.: Nutzung niedrigthermaler Tiefenwässer - Geologische Grundlagen; in: Bußmann, W. u. a.: Geothermie - Wärme aus der Erde; C. F. Müller, Karlsruhe, 1991
- /9-2/ Förster, S.: Bohrtechnischer Aufschluss thermalwasserführender Schichten und Herrichten des Bohrloches für die Förderung; in: Bußmann, W. u. a.: Geothermie - Wärme aus der Erde; C. F. Müller, Karlsruhe, 1991

- /9-3/ Kaltschmitt, M.; Huenges, E.; Wolff, H. (Hrsg.): Energie aus Erdwärme; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1999
- /9-4/ Seibt, P.: 100 °C ein Grenzwert? - Hydrothermale Energiegewinnung in Neustadt-Glewe; 3. Geothermische Fachtagung, Schwerin, 1994
- /9-5/ Seibt, P. u. a.: Untersuchungen zur Verbesserung des Injektivitätsindex in klastischen Sedimenten; Studie im Auftrag des BMBF; GTN - Geothermie Neubrandenburg GmbH, Neubrandenburg, 1997
- /9-6/ Poppei, J.: Entwicklung wissenschaftlicher Methoden zur Speicherbewertung und Abbauüberwachung; Bericht zum BMFT-Vorhaben 0326912A, Bonn, 1994 (unveröffentlicht)
- /9-7/ Rummel, F.; Kappelmeyer, O.: Erdwärme – Energieträger der Zukunft? Fakten, Forschung, Zukunft; C.F. Müller, Karlsruhe, 1993
- /9-8/ GFZ (Hrsg.): Evaluierung geowissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedingungen für die Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen; Geothermie Report 99-2, Abschlussprojekt zum BMBF-Projekt BEO 0326969, Potsdam, 1999
- /9-9/ Schneider, S.; Kaltschmitt, M.: Erneuerbare Energien; BWK 57(2005), 4, S. 87 – 96
- /9-10/ Brandt, W.; Kabus, F.: Planung, Errichtung und Betrieb von Anlagen zur Nutzung geothermischer Energie – Beispiele aus Norddeutschland; VDI Bericht 1236, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996
- /9-11/ Meyer, P. u. a.: Möglichkeiten der Nutzung des geothermischen Potentials an ausgewählten Standorten im Bundesland Sachsen-Anhalt; GTN Geothermie Neubrandenburg GmbH, Neubrandenburg, 1993
- /9-12/ Poppei, J.: Tiefe Erdwärmesonden; Geothermische Energie-Nutzung, Erfahrung, Perspektive; Geothermische Fachtagung in Schwerin, Oktober 1994
- /9-13/ Rafferty, K.: Geothermal Power Generation - A Primer on Low-Temperature, Small-Scale Applications; Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, OR, 2000
- /9-14/ Huenges, E.: Persönliche Mitteilung; GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam, 2002
- /9-15/ Baumgärtner, J.; Jung, R.: Nutzung trockener Formationen; in: Kaltschmitt, M.; Huenges, E.; Wolff, H. (Hrsg.): Energie aus Erdwärme; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1999
- /9-16/ Ura, K.; Saitou, S.: Geothermal Binary Power Generation System; World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, 2000
- /9-17/ Bresee, J. C.: Geothermal Energy in Europe - The Soultz Hot Dry Rock Project; Gordon and Breach Science Publishers, Philadelphia, USA, 1992
- /9-18/ Rummel, F.; Kappelmeyer, O. (Hrsg.): Erdwärme; C. F. Müller, Karlsruhe, 1993
- /9-19/ Schulz, R. u. a. (Hrsg.): Geothermische Energie - Forschung und Anwendung in Deutschland; C. F. Müller, Karlsruhe, 1992
- /9-20/ Frisch, H. u. a.: Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken; in: Schulz, H. u. a.: Geothermische Energie; C. F. Müller, Karlsruhe, 1992

- /9-21/ Haenel, R. u. a.: Geothermisches Energiepotential; Pilotstudie zur Abschätzung der geothermischen Energievorräte an ausgewählten Beispielen in der Bundesrepublik Deutschland; Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung; Hannover, 1988
- /9-22/ Schulz, R. u. a.: Geothermie Nordwestdeutschland - Endbericht; Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, 1995
- /9-23/ Jobmann, M.; Schulz, R.: Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt im süddeutschen Molassebecken, Teilgebiet: Hydrogeothermik; Bericht, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, 1989 (unveröffentlicht)
- /9-24/ Haenel, R.; Staroste, E. (Hrsg.): Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland; Th. Schäfer, Hannover, 1988
- /9-25/ Jung, R.: Persönliche Mitteilung; Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA), Hannover, 2002
- /9-26/ Rogge, S.; Kaltschmitt, M.: Strom- und Wärmebereitstellung aus Erdwärme – Eine ökonomische Analyse; Erdöl – Erdgas – Kohle 118(2002), 1, S. 34 – 38
- /9-27/ Kaltschmitt, M.; Müller, M.: Geothermische Stromerzeugung in Deutschland – Stand und Perspektiven; 8. Geothermische Fachtagung „Die neue Rolle der Geothermie“, Landau, November 2004, Tagungsband

- /A-1/ Boyle, G.: Renewable Energy; Oxford University Press, Oxford, 1996
- /A-2/ Graw, K.-U.: Nutzung der Tideenergie – Eine kurze Einführung; Geotechnik – Wasserbau – Wasserwirtschaft: Materialien No. 2, Professur Grundbau und Wasserbau, Universität Leipzig, 2001
- /A-3/ Graw, K.-U.: Wellenenergie – Eine hydromechanische Analyse; Bericht Nr. 8 des Lehr- und Forschungsgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft, Bergische Universität - GH Wuppertal, 1995
- /A-4/ www.uni-leipzig.de/welle/index.html
- /A-5/ Laughton, M. A.: Renewable Energy Sources; Elsevier Applied Science, London, 1990
- /A-6/ Kleemann, M.; Meliß, M.: Regenerative Energiequellen; Springer, Berlin, Heidelberg, 1993, 2. Auflage
- /A-7/ Hoppe-Kilpper, M.: Persönliche Mitteilung; Institut für Solare Energieversorgungssysteme (ISET), Kassel, 2002
- /A-8/ Hoffmann, W.: Energie aus Sonne, Wind und Meer; Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1990
- /A-9/ Ziegler, T.: Wolkenkratzer für die Nordsee; Die Welt, 27. 01. 1996

- /B-1/ Alpert, D. J. u. a.: An Assessment of Second-Generation Stretched-Membrane Mirror Modules (SAND 90-0183); Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 1990
- /B-2/ Becker, M.; Klimas, P. (Hrsg.): Second Generation Central Receiver Technologies - A Status Report; C. F. Müller, Karlsruhe, 1993

- /B-3/ Becker, M.; Meinecke, W. u. a. (Hrsg.): Solarthermische Anlagen - Technologien im Vergleich; Springer, Berlin, Heidelberg, 1992
- /B-4/ Brost, O.; Mack, H.; Wierse, M.: Heat Pipe Technology - a Technology to improve Solar-Thermal Power Systems; Proceedings, 8th International Heat Pipe Conference, Peking, China, 1992, Tagungsband
- /B-5/ Buck, R.; Bräuning, T.; Denk, T.; Pfänder, M.; Schwarbözl, P.; Tellez, F.: Solar-Hybrid Gas Turbine-based Power Tower System (REFOS); Journal of Solar Energy Engineering 124(2002), 3
- /B-6/ Buck, R.; Heller, P.; Koch, H.: Receiver Development for a Dish/Brayton System; ASME Solar Energy Conference 1996, San Antonio, TX, USA, 1996; Tagungsband, S. 91 - 96
- /B-7/ Buck, R.; Laing, D.; Schiel, W.: Solarthermie für dezentrale Stromerzeugung; Forschungsverbund Sonnenenergie, Jahrestagung 1996; DLR, Köln, 1996, Tagungsband
- /B-8/ Cohen, G. u. a.: Recent Improvements and Performance Experience at the Kramer Junction SEGS Plants; ASME Solar Energy Conference, San Antonio, TX, USA, 1996; Tagungsband, S. 479 - 485
- /B-9/ Cordes, S. u. a.: Test and Evaluation of the Schlaich, Bergermann und Partner Heliostat Prototype Concentrator; SolarPACES Technical Report III-4/94, DLR, Köln, 1994
- /B-10/ Diver, R.; Andraka C.; Rawlinson, K., Sandia National Laboratories Thomas, G.; Goldberg, V., WG Associates: The Advanced Dish Development System Project; ASME Solar 2001 Conference - The Power to Choose, April 21 -25, Washington D.C, USA
- /B-11/ Energy Technology Engineering Center (Hrsg.): Performance of the Vanguard Solar Dish-Stirling Engine Module AP-4608 (Research Project 2003-5); EPRI, Palo Alto, CA, USA, 1986
- /B-12/ Fesharaki, M.: Industrielle Anwendungen inverser Gasturbinenprozesse - Biomasse - Sonnenenergie und Industrielle Abgase; Dissertation, Institut für Thermische Turbomaschinen, TU Graz, 1997
- /B-13/ Garg, S.: Mathania Integrated Combined Cycle Project (Status Note on the 140 MW first ISCCS Project); SolarPACES Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Sydney, 2001
- /B-14/ Goebel, O.; Laing, D.: Second Generation Sodium Heat Pipe Receiver for a USAB V160 Stirling Engine: Development and On-sun Test Results; 28th IECEC, Atlanta, GA, USA, 1993; Tagungsband Vol. 2, S. 539
- /B-15/ Gould, W. R. u. a.: The Solar Two Power Tower Project Status and Experience to Date; ASME Solar Energy Conference, San Antonio, TX, USA, 1996; Tagungsband, S. 119 - 124
- /B-16/ Grasse, W. (Hrsg.): IEA-Solar Power and Chemical Energy Systems; SolarPACES Annual Report 1994, DLR, Köln, 1995
- /B-17/ Grasse, W. (Hrsg.): Solar Power and Chemical Energy Systems; SolarPACES Annual Report, 1995; DLR, Köln, 1995

- /B-18/ Grasse, W.: SSPS Results of Test and Operation 1981-1984; DLR, Köln, 1985
- /B-19/ Haeger, M. u. a.: Operational Experiences with the Experimental Set-Up of a 2,5 MWth Volumetric Air Receiver (TSA) at the Plataforma Solar de Almeria; PSA Internal Report; CIEMAT, Almeria, Spanien, 1994
- /B-20/ Heller, P.; Buck, R.; Biehler, T.: Development of a Volumetric Receiver for a Dish/Brayton System; ASME Solar Energy Conference, San Francisco, CA, USA, 1994; Tagungsband S. 561 - 566
- /B-21/ IEA - SolarPACES Program (Hrsg.): Solar Thermal Power and Solar Chemical Energy Systems; IEA, Birmingham, 1994
- /B-22/ Instituto de Energías Renovables (IER) (Hrsg.): Central Electrosolar de Almería Proyecto CESA 1 - Descripción General del Proyecto (CESA-84-1-2); CIEMAT, Madrid, 1984
- /B-23/ Interatom (Hrsg.): Gasgekühltes Sonnenturm-Kraftwerk; Schlußbericht Technologieprogramm GAST; Interatom, Bergisch-Gladbach, 1988
- /B-24/ Klaiß, H.; Staiß, F. (Hrsg.): Solarthermische Kraftwerke für den Mittelmeerraum; Springer, Berlin, Heidelberg, 1992
- /B-25/ Laing, D., Goebel, O.: Sodium Heat Pipe Receiver for a SPS V160 Stirling Engine: Second Generation Design; 6th International Symposium on Solar Thermal Technologies, Mojacar, Spanien, 1992; Tagungsband
- /B-26/ Laing, D.; Goebel, O.: Natrium Heat Pipe Receiver der 2. Generation für ein 9 kWel Dish/Stirling System; 9. Internationales Sonnenforum, Stuttgart, 1994, Tagungsband
- /B-27/ Lopez, C. W.; Stone, K. W.: Design and Performance for the Southern California Edison Stirling Dish; ASME Solar Energy Conference, Maui, HW, USA, 1992; Tagungsband Vol. 2
- /B-28/ Lüpfert, E.; Geyer, M., Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Germany; Schiel, W., Schlaich Bergermann und Partner (SBP), Germany; Esteban, A.; Osuna, R., INABENSA, Spain; Zarza, E., CIEMAT-PSA, Spain Nava, P., Flabeg Solar International, GERMANY: Eurotrough Design Issues and Prototype Testing at PSA; ASME Solar 2001 Conference - The Power to Choose, April 21 -25, Washington D.C, USA
- /B-29/ Mancini, T.: Dish/Stirling Development program in the USA; Fifth Task III-Meeting within IEA Solar Paces on Solar Technology and Applications, DLR, Köln, 1995; Tagungsband
- /B-30/ Mayette, J., Salt River Project; Davenport R. ; Forristall, R., Science Applications International Corporation: The Salt River Project SunDish Dish-Stirling System; ASME Solar 2001 Conference - The Power to Choose, April 21 -25, Washington D.C, USA
- /B-31/ Müller, M.: Direct Solar Steam in Parabolic Trough Collectors (DISS); PSA, Almería, Spanien, 1994
- /B-32/ Pacheco, J. E.: Results of Molten Salt Panel and Component Experiments for Solar Central Receivers (SAND 94-2525); Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 1995

- /B-33/ Persönliche Mitteilung; Steinmüller, Gummersbach, 1997
- /B-34/ Pilkington Solar International (Hrsg.): Solar Thermal Power - Now; Pilkington Solar International, Köln, 1996
- /B-35/ Pitz-Paal, R. u. a.: Solarturmkraftwerke; Jahrestagung Forschungsverbund Sonnenenergie, Kassel, 1996, Tagungsband
- /B-36/ Raggam, A.: Ökologie-Energie, Skriptum zur Vorlesung; Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, 1997
- /B-37/ Romero, M. et al.: Design and Implementation Plan of a 10 MW Solar Tower Power Plant Based on Volumetric-Air Technology in Seville (Spain); Proceedings of the ASME Solar 2000 Conference, 17.-22. Juni 2000, Madison, USA
- /B-38/ Romero, M.: Desarrollo de Heliostatos de Vidrio de 100 m²: Especificacion Tecnica Para el Diseño de Dos Prototipos a Instalar en la Plataforma Solar de Almería (CIEMAT-IER/R2B/DO/DHA-2/0); CIEMAT, Madrid, Spanien, 1994
- /B-39/ Schiel, W. u. a.: Long Term Testing of three 9 kW Dish/Stirling Systems; ASME, San Francisco, CA, USA, 1994; Tagungsband
- /B-40/ Schiel, W.; Keck, T.; Schweizer, A.: Technical and Economical Potential of a Dish-Stirling System; 6th International Symposium on Solar Thermal Technologies, Mojacar, Spanien, 1992; Tagungsband
- /B-41/ Schiel, W.; Schweizer, A.; Stine, W.: Evaluation of the 9-kW Dish/Stirling System of Schlaich, Bergermann and Partner Using the Proposed IEA Dish/Stirling Performance Analysis Guidelines; 29th IECEC, Monterey, CA, USA, 1994; Tagungsband
- /B-42/ Schiel, W. u. a.: Aufwindkraftwerk; Schlußbericht zum Auftrag Übertragbarkeit der Ergebnisse des Aufwindkraftwerkes in Manzanares auf größere Anlagen, BMFT-Förderkennzeichen 0324249D; SBP, Stuttgart, 1990
- /B-43/ Schlaich, J. u. a.: The Solar Updraft Tower; Bauwerk Verlag, Berlin, 2005
- /B-44/ Schlaich, J.; Schiel, W.: Persönliche Mitteilung; SBP, Stuttgart, 1997
- /B-45/ Steinmüller (Hrsg.): PHOEBUS Solar Power Tower; Steinmüller, Gummersbach, 1995
- /B-46/ Stine, W. B.; Diver, R. E.: A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology (SAND 93-7027); Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 1994
- /B-47/ Stine, W. B.; Powell, M. A.: Proposed Guidelines for Reporting Performance of a Solar Dish/Stirling Electric Generation System; Proceedings, 28th IECEC, Atlanta, GA, USA, 1993; Tagungsband Vol. 2, S. 2 503 - 2 510
- /B-48/ Stone, K.; Leingang, E., The Boeing Company; Liden, B.; Ellis, E.; Sattar, T., Stirling Energy Systems; Mancini, T., Sandia National Laboratories; Nelving, H., Kockums, Sweden: SES/Boeing Dish Stirling System Operation; ASME Solar 2001 Conference - The Power to Choose, April 21 –25, Washington D.C, USA
- /B-49/ Stone, K.; Leingang, E., The Boeing Company; Rodriguez, G.; Paisley J.; Nguyen, J., Stirling Energy Systems; Mancini, T., Sandia National Laboratories; Nelving, H., Kockums, Sweden: Performance of the SES/Boeing Dish Stirling System; ASME Solar 2001 Conference - The Power to Choose, April 21 –25, Washington D.C, USA

- /B-50/ Strachan, J. W.; Houser, R. M.: Testing and Evaluation of Large-Area Heliostats for Solar Thermal Applications (SAND 92-1381); Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 1992
- /B-51/ Strauss, K.: Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, regenerativer und nuklearer Energiequellen; Springer, Berlin, Heidelberg, 1998, 4. Auflage
- /B-52/ Trieb, F.: Solar Electricity Generation, Description and Comparison of Solar Technologies for Electricity Generation; DLR, Stuttgart, 1995
- /B-53/ TSA Consortium (Hrsg.): PHOEBUS - A Solar Tower Plant with Volumetric Air Receiver, Post-Feasibility Study 1C; D & M Energietechnik, FDE, Steinmüller, DLR, Fricker, Wiesbaden, Stuttgart, Gummersbach, Köln, 1994
- /B-54/ Tyner, C. u. a.: Solar Power Tower Development: Recent Experiences; 8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, DLR, Köln, 1996; Tagungsband
- /B-55/ Valverde, A.; Weinrebe, G.: Implementation of an Automatic Aiming-Point Strategy for a Volumetric Receiver in PSA's CESA-1 Heliostat Field; 8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, DLR, Köln, 1996; Tagungsband
- /B-56/ Vant-Hull, L. u. a.: Assessment of the Real-Time Receiver Excess-Flux-Density Protection Software at Solar Two; 8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, DLR, Köln, 1996; Tagungsband
- /B-57/ Walker, G.: Stirling Engines; Clarendon, Oxford, 1980
- /B-58/ Weinrebe, G. u. a.: On the Performance of the ASM150 Stressed Membrane Heliostat; 1996 ASME Solar Energy Conference, San Antonio, TX, USA, 1996; Tagungsband S. 113 - 117
- /B-59/ Weinrebe, G. u. a.: The ASM-150 Stressed Membrane Heliostat: Test Results and Operational Experiences; 8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, DLR, Köln, 1996; Tagungsband
- /B-60/ Werdich, M.: Stirling-Maschinen – Grundlagen, Technik, Anwendung; Ökobuch, Staufen, 1994
- /B-61/ Winter, C.-J. u. a.: Solar Power Plants; Springer, Berlin, Heidelberg, 1991
- /B-62/ Zarza, E. u. a.: Project DISS: Development of a new Generation of Solar Thermal Power Stations; 8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, DLR, Köln, 1996; Tagungsband

- /C-1/ Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse; Springer, Berlin, Heidelberg, 2001

Sachwortverzeichnis

- 2-D-Modelle 461
- 3-D-Modelle 461
- Abbewegung 592
- Abdeckung
 - Absorber 140
- Abdeckungstransmissionskoeffizient 151
- Abfluss 85, 88
- Abflusscharakteristik 95
- Abflussflächenpotenzial 387
- Abflussgeschehen 86, 87
- Abflusshöhe 86, 93
- Abflusskoeffizient 86
- Abflusslinienpotenzial 387
- Abflussmessung 89
- Abflussregime 86
- Abflussvariationen 94
- Abflussverhalten 93, 94
- Abgekoppelte Solarsysteme 128, 134
- Ablenkbohrung 461
- Abluft-Zuluft Wärmepumpe 427
- Abminderungsfaktor 125, 282
- Absanden 459
- Abschaltwindgeschwindigkeit 317
- Abschattungseffekte 325
- Abschattungsverluste 207
- Abscheidebecken 467
- Abscheidebedingung 225
- Abscheidemethode 225
- Abscheideparameter 225
- Abscheidetemperatur 225
- Absenkung 485
- Absorber 127, 138, 400, 401, 625
 - Definition 145
 - Rohrleitungssystem 146
- Absorberfläche 116
- Absorberfunktion 128
- Absorbergebiet 221
- Absorberherstellung 225
- Absorbermaterial 145, 146
- Absorbermatte 148
- Absorberoberfläche 127
- Absorberquerschnittsfläche 632
- Absorberrohr 632
- Absorberschichten, selektive 139
- Absorbertyp 407
- Absorption 48, 137
- Absorptionsanlagen 399
- Absorptionsgrad 137
- Absorptionskoeffizient 116, 137, 139
- Absorptionstiefe 206
- Absorptionsverhalten, Solarzellen 273
- Absorptionsvermögen 137
- Absorptionswärmepumpe 400
- Abstandsfaktor 325
- Abstandsfläche, Windkraftanlage 326
- Abstrahlungsverluste 142
- Abwärme 526
- Adsorptionsanlage 399
- Advanced Dish Development System 630
- Aerober Abbau 650
- Aerodynamische Verluste 315
- Aggregatzustandsänderung 158
- Akkumulator 245, 250
- Aktionsturbine 361
- Aktive Systeme 115
- Aktivierungsschritt 224
- Aktiv-Stall-Regelung 322
- Akzeptanz Windenergie 342
- Akzeptoren 201, 202
- Albedo 53
- Alkoholische Gärung 649
- Alkylenglykol 162

- Aluminiumbereitstellung 25
- Ammoniak 400
- Ammoniakdampf 605
- Amorphes Silicium 214, 221
- Anaerober Abbau 650
- Anemometer 73
- Angebotscharakteristik
 - Jahresverlauf 534
 - Monatsverlauf 534
 - Tagesverlauf 535
- Angebotsvariationen
 - räuml. Vergl. 536, 566
 - zeitl. Vergl. 534, 564
- Angströmsche Kompensations-
 - Pyrheliometer 54
- Anlagenaufstellung
 - Hauptwindrichtung 326
 - keine Hauptwindrichtung 326
- Anlagenbestand
 - Photovoltaik 279
 - Solarthermie 198
 - Windenergie 349
- Anlagenkennlinie (Strom)
 - Photovoltaik 208
 - Windenergie 316
- Anlagenleistungen, Vergleich 537, 568
- Anlaufwindgeschwindigkeit 317
- Annuität 18
- Ansaugdiffusor 642
- Anschlussbox 230
- Anstellwinkel 288
- Anströmwinkel 284, 289
- Antireflexschicht 212, 218
- Antitriptische Winde 68
- Antizyklone 67
- Antriebsmoment 289
- Antriebsprinzip, Wärmepumpe 399
- Anwendungsbereiche
 - Photovoltaik 251, 257
 - Wärmepumpe 432
- Apertur 614, 623
- Aperturdurchmesser 613
- Aperturfläche 125
- Aphel 39
- Aquifer 118, 408, 416, 502
- Aquiferbeeinflussung 484
- Aquiferspeicher 159
- Äquivalenter *U*-Wert 119
- Äqui. Wärmedurchgangskoeffizient 119
- Aramidfaser 297
- Arbeitskreis 633
- Arbeitsmaschinen 510
- Arbeitsmittel 400, 401, 420, 425
- Arbeitsmitteldampf 400, 510
- Arbeitsmittelkreislauf 633
- Arbeitsprozess 625
- Arbeitsstoffe 515
- Arbeitsstoffpaar 400
- Arbeitsvermögen, Wasser 87
- Arbeitszahl 402, 404, 434
- Array-Felder 232
- a-Si:H-Solarzelle 221
- Assimilation 101
- Asynchrongenerator 301, 369
- Äthylenglykol 162
- Atmosphäre, Zusammensetzung 43
- Atmosphärenbewegung 64
- Atmosphärenrand 39
- Atmosphärische Gegenstrahlung 50
- Atmung 100
- Ätzen 217
- Auf- und Abwinde 68
- Aufbewegung 592
- Auf-Dach-Montage 147, 243
- Aufdampfprozess 225
- Aufgelöste Polare 286
- Aufschluss 503
- Aufständigung 242
 - nachgeführte 244
 - starre 243
- Aufständigungssysteme 243
- Aufstau 383
- Auftriebsbeiwert 286, 287
- Auftriebskraft 286
- Auftriebsprinzip 284, 290
- Aufwandszahl 402
- Aufwindkraftwerk 635
- Ausbau, Wasserkraftanlagen 393

- Ausbaudurchfluss 353
- Ausbauwürdiges Potenzial 387
- Ausdehnungsgefäß 160
- Ausgangsspannung 237
- Ausgangstransformator 233
- Auslauf 368
- Auslegungsdurchfluss 363
- Ausleitungskraftwerke 353, 356
- Ausleitungsstrecken 385
- Außenaufstellung, Wärmepumpe 406
- Äußerer Photoeffekt 203
- Austreiber 400, 401
- Auswaschung 275
- Autonome Anlagen 251
- Axialmaschinen 423
- Axialturbine 636, 638
- Azimutale Nachführung 622
- Azimuthwinkel 51
- Azimutlager 304
- Baggerschlämme 383
- Bandabstand 198
- Bändermodell 197, 200
- Bandlücke 198, 211
- Bandziehverfahren 217
- Batterie 245, 250
- Baugröße, Wärmeübertrager 420
- Bauweise
 - aufgelöste 354
 - überströmte 354
 - zusammenhängende 354
- Beckenabdeckung 170
- Begriffsabgrenzung, Erdwärme 395
- Bentonit-Zement-Suspension 412, 415
- Bereitstellungskette 646
 - Bestimmungsgrößen 646
 - Definition 645
 - Ziel 646
- Bergwerk 418
- Bergwinde 68
- Bernoulli-Gleichung 87, 285, 347
- Bestrahlungsstärke 207
- Betonbauweise 306
- Betonbereitstellung 25
- Betonkollektor 419
- Betonkörper 595
- Betriebskosten
 - geoth. Stromerz. 520
 - hydroth. Erdwärme 475
 - konv. Wärmesysteme 35
 - Kraftwerke 30
 - Photovoltaik 266
 - Solarthermie 183
 - tiefe Sonde 494
 - Wärmepumpe 439
 - Wasserkraft 377
 - Windenergie 333
- Betriebsverhalten
 - Generatoren 303
 - Wasserkraftanlage 372
- Betz'sche Leistungsbeiwert 283, 290
- Betz'sche Theorie 283
- Bilanzausgleich 462
- Bio-chemische Umwandlung 649
- Biogaserzeugung 650
- Biomasse 97
 - Abgrenzung 645
 - Definition 645
 - Wandlungsmöglichkeiten 647
- Biomasseangebotscharakteristik 105
- Biomasseertragspotenzial 102
- Biomasseproduktivität 106
- Biotope 386
- Bivalent-alternativer Betrieb 431
- Bivalenter Betrieb 431
- Bivalent-paralleler Betrieb 431
- Blattlager 298
- Blattspitzengeschwindigkeit 297
- Blattspitzenverstellung 299
- Blattverdrehung 299
- Blattverstellantrieb 299
- Blattverstellmechanismus 299
- Blattverstellung 298, 323
- Blattwinkel 323
- Blattwinkeleinstellregelung 299
- Blattwinkelverstellung 324
- Blaubrenner 34
- Blei 246
- Bleibatterie 245

- Blei-Gel 248
- Bleioxid 246
- Bleisulfat 246
- Blei-Vlies 248
- Blindleistung 301, 302
- Blitzschutz 250
- Blockierdiode 231
- Bodenart, Wärmeentzug 413
- Bodentyp 79
- Bohrarbeiten 446
- Bohrlochausbautechnik 504
- Bohrloch-Dublette 502
- Bohrlochkopf 491
- Bohrloch-Motorpumpe 463
- Bohrloch-Televiewer 510
- Bohrlochwandung 510
- Bohrloch-Wellenpumpe 462
- Bohrpfähle 416
- Bohrphasen 458
- Bohrtechnologie 458
- Bohrungskopf 463
- Bohrungsumgebungsbeeinflussung 484
- Bohrverfahren, Erdwärmesonde 414
- Boltzmann-Konstante 208
- Brandungsenergie 592
- Brandungsenergiekraftwerk 593
- Braunkohlekraftwerk 27
- Brayton-Prozess 627
- Brenner 33
- Brennfleck 622
- Brennstoffversorgung 33
- Brennwertkessel 33
- Bruchgeräusche 510
- Brunnenanordnung 159
- Brunnenleistung 417
- Bruttostromerzeugung, Deutschland 10
- Buchtenkraftwerk 355
- Buntsandstein 504
- Bussysteme 616
- Bypassdiode 231, 232
- C₃-Pflanzen 101
- C₃-Typ der Photosynthese 99
- C₄-Pflanzen 101
- C₄-Typ der Photosynthese 99
- Cadmium-Tellurid 223
- CAGRA 461
- Camborne-Konzept 507
- Canting 611
- Cased-Hole-Komplettierung 458
- Cavity-Receiver 623
- CdTe-Modul 224
- CFEST 461
- CFK 297
- Chalkogenid-Solarzelle 223
- Chalkopyrit-Solarzelle 223
- Chips 216
- Chloroplaste 98, 99
- Clausius-Rankine-Prozess 511
- CO₂-Äquivalente
 - Definition 21
 - geoth. Stromerz. 524
 - hydroth. Erdwärme 478
 - konv. Wärmesysteme 37
 - Kraftwerke 31
 - Photovoltaik 270
 - Solarthermie 188, 190
 - Strombereitstellung 554
 - tiefe Sonde 496
 - Vergleich 554, 580
 - Wärmebereitstellung 580
 - Wärmepumpe 444
 - Wasserkraft 380
 - Windenergie 337
- CO₂-Assimilation 101
- Cockerell-Floß 596
- Corioliskraft 64, 65
- Coulomb'scher Wirkungsgrad 250
- $c_p(\lambda)$ -Kennlinien 315
- Czochralski-Prozess 216
- Dachflächenpotenzial
 - Photovoltaik 276
 - Solarthermie 194
- Dachintegration 147, 148
- Dachmontage 243
- Dammbalkenverschluss 348
- Dammbauwerk 599
- Dämmschicht 132
- Dämmsysteme 121

- Dampferzeuger 633
- Dampfkraftwerke 27
- Dampfprozess 399
- Dampfturbine 510
- Dämpfung 298
- Darrieus-Rotor 293, 599
- Deckungsgrad, solarer 144, 166
- Deckungsrate, solare 172
- Defektelektron 200
- Degradation 222
- Deklinationssachse 622
- Deposition 220, 225, 227
- Dezentrale Systeme, Photovoltaik 258
- Dezentraler Wechselrichter 239
- Diffuser Energiedurchlassgrad 118
- Diffuser g -Wert 118
- Diffusionslänge 206
- Diffusionspotenzial 207
- Diffusionsstrom 204
- Diffusor 225, 368, 512
- Diffusstrahlung 50
- Diffusstrahlung auf geneigte, ausgerichtete Flächen 53
- Diode 209
- Diodengleichung von Shockley 208
- Direktabsorptionsreceiver 615
- Direkte Dampfnutzung 511
- Direkte Netz-Kopplung:
Windkraftanlage 308
- Direkte Systeme 469
- Direktgewinnsystem 127, 130
- Direktstrahlung 50
- Direktstrahlung auf geneigte, ausgerichtete Flächen 51
- Direktumrichter 310
- Direktverdampfung 400, 409, 411, 415
- Direktwärmeübertrager 492
- Discoeffekt 339
- Dish/Brayton-Systeme 621
- Dish/Stirling-Systeme 621
- Diskontrate 18
- Diskretisierung 461
- Donatoren 201, 202
- Donau 93
- Doppelglasscheibe 120
- Doppelmantelwärmeübertrager 163
- Doppelrohrinstallation 467
- Doppelrohrsysteme 466
- Doppel-U-Sonde 412
- Dorfstromversorgungssysteme 256
- Dotierabfluss 358
- Dotierstoffe 201
- Dotierturbine 352, 357
- Dotierung 201, 212
- Double Flash-System 513
- Drahtgeflecht 625
- Drahtwickelfilter 459
- Drain-Back Kollektorsystem 161
- Drallverluste 283, 290
- Drehspindel 299
- Drehstrom-Asynchronmotor 463
- Drehstromsammelschiene 328
- Drehzahlregelung 320
- Drehzahlstellung 464
- Dreibeinfundament 307
- Dreiblattrotor 296
- Dreileitersystem 468
- Drift 384
- Druckenergie 349
- Druckenergiehöhe 347
- Druck-Enthalpie-Diagramm 398
- Druckleistung 279
- Druckleitung 356
- Druckplatten-Anemometer 73
- Druckring 611
- Druckrohrleitung 349, 360
- Druckschacht 356
- Druckspeicher 155
- Druckstollen 356
- Druckstoßdämpfung 356
- Druckunterschiede 603
- Druckverlust 625
- Dublette 416, 457, 461, 502, 506
- Düngung 104
- Dunkelatmung 100
- Dunkelreaktion 98
- Dünnglasspiegel 622, 630
- Dünnschichtsolarzelle 214, 225

- Durchfluss 373
- Durchflussmessung 90
- Durchflussregelung 369
- Durchmischungszone 641
- Durchsichtige Abdeckungen 120
- Durchstich 353
- Durchströmturbine 366
- Durchwurzelbarkeit 104
- Duschwasserbereitstellung 176
- Dynamischer Stall 322
- Ebbstrom 599
- EFG-Ribbon 217
- Eigendrehimpuls 197
- Eigenfrequenz 595
- Eigenleitung 199
- Einbautiefe 463
- Ein-Becken-System 598
- Einbettung 230
- Einblattrotor 297
- Eindiffusion 217
- Einfach-U-Sonden 412
- Einkristalle 217
- Einlaufapparat 358
- Einlaufbauwerk 348, 360
- Einlaufkanal 593
- Einlaufverluste 349, 593
- Einleitorsystem 468
- Einpfahlfundament 306
- Einsatzbereiche, Turbinen 361
- Einschalttemperaturdifferenz 160
- Einspeichersystem 173
- Einteilung, solath. Kraftwerke 608
- Eintiefung 383
- Einwegnutzung 598
- Einzelanlagen 310
- Einzelanlagenaufstellung 325
- Einzelfacette 611
- Einzelspiegel 610
- Einzelzellen-Basis 232
- Einzugsgebiet 86
- Eisabwurfrisiko 340
- Eisenausfällung 465
- Ekliptik 40
- Elektrische Verluste 316
- Elektromagnetische Strahlung 37, 38
- Elektromagnetische Verträglichkeit 274
- Elektromotorwärmepumpe 402
- Elektronenleitung 199
- Elektronische Expansionsventile 424
- Elektron-Loch-Paar 200, 211
- Elevationsachse 622
- Elevationsgetriebe 610
- Emissionsgrad 142
- Emissionskoeffizient 139
- Emissionsvermögen 137
- Endenergieträger 3
- Endenergieverbrauch, Deutschland 9
- Energie, Definition 2
- Energiebänder 197
- Energiebasis 3
- Energiebegriffe 2
- Energiebilanz
 - Absorber 141
 - allgemeine 140
 - Erde 37, 46
 - geoth. Stromerz. 524
 - hydroth. Erdwärme 478
 - Kollektor 140
 - Photovoltaik 269
 - Solarthermie 189
 - Strombereitstellung 553
 - tiefe Sonde 496
 - Vergleich 553, 578
 - Wärmebereitstellung 578
 - Wärmepumpe 443
 - Wasserkraft 380
 - Windenergie 335, 336
- Energiedurchlassgrad 118
- Energieeinheiten 635
- Energieertrag, Windkraftanlage 319
- Energiefluss
 - Gebäude 115
 - Photovoltaik 260
 - Windenergie 314
- Energieinhalt, Batterie 249
- Energielinie 349, 350
- Energielücke 197, 198, 211
- Energieniveau 202

- Energiepfähle 415, 416
- Energiequellen 4, 12
- Energiequellen 44
- Energiespeicher 252
- Energieströme 37
- Energieträger 2
- Energieträgerpreise 26
- Energieversorgung, Windkraftanlage 299
- Energievorkommen, geothermische 113
- Energievorrat
 - Definition 4
 - fossil 4
 - rezent 4
- Energiewandlung, solath. Kraftwerke 607
- Energiewandlungskette
 - Photovoltaik 259
 - Solaranlage 164
 - Wasserkraft 370
 - Windenergie 313
- ENS 241
- Entgasung 464
- Entladeschutzdiode 250
- Entnahmebrunnen 416, 417
- Entzugsleistung, Koaxialbrunnen 418
- Epitaxie 204
- Erdatmosphäre 42
- Erdaufbau 108
- Erdberührte Betonbauteile 415
- Erddamm 358
- Erdentstehung 41
- Erdkern 109
- Erdkruste 108, 109
- Erdmantel 109
- Erdreichwärmeübertrager 409, 428
- Erdung 250
- Erdwärme 108, 395
- Erdwärmekollektor 409
- Erdwärmesonde 411
- Erdwärmesondenmaterial 412
- Erhitzerrohre 623
- Erneuerbare Energien
 - Definition 4
 - Nutzungsmöglichkeiten 12
 - Quellen 11
 - untersuchte Möglichkeiten 13
- Ernteverfahren 105
- Erregung 301
- Ersatzkältemittel 427
- Ersatzschaltbild 208
- Erschließungspotenzial 24
- Ertragsniveau 106
- Erzeugungspotenziale
 - geoth. Stromerz. 528
 - hydroth. Erdwärme 486
 - oberfl. Erdwärme 452
 - Photovoltaik 276
 - Solarthermie 194
 - Strombereitstellung 558
 - tiefe Sonde 500
 - Umgebungsluft 451
 - Vergleich 558, 585
 - Wärmebereitstellung 585
 - Wärmepumpe 451
 - Wasserkraft 388
 - Windenergie Offshore 346
 - Windenergie Onshore 344
- Ethanol 650
- EuroDish-Anlage 629
- Europäischer Wirkungsgrad 242
- EuroTrough 632
- Expander 424
- Expansion 399
- Expansionsventil 399, 400, 420, 423
- Extinktion 48
- Extraktion 649
- Fahnenposition 323
- Fahnenstellung 299
- Fallhöhe 350, 373
- Fallrohr 417
- Farbstoffsolarzelle 228, 229
- Fassadenmontage 243
- Faulgase 383
- FCKW 425
- FCKW-Halon-Verbots-Verordnung 426
- Fehlerstrom-(FI)-Schutzschalter 241
- Felskavernenspeicher 159
- Fenster 130
- Fenster I 47

- Fenster II 47
- Fernwärmenetze 468
- Fernwärmetechnik 490
- Ferrosilicium 275
- Fertigpfähle 416
- Feststoffabscheidung 511
- Feststoffbildung 465
- Feststoffspeicher 157
- Feuchtigkeit 230
- Filterkies 459
- Filtration 465
- Fischbauchklappen 358
- Fischfarm 593
- Fischtreppe 358, 384
- Fischunterstände 385
- Fischweg 359
- Flächenabsorber 407
- Flächenpotenzial 344, 387
- Flächenverbrauch
 - Photovoltaik 273
 - Windkraftnutzung 342
- Flachgründung 305
- Flächiger Erdwärmekollektor 411
- Flachkollektor 148, 152
- Flachwassereffekte 593
- Flash-Behälter 511, 513
- Fließgeschwindigkeit 385
- Fließgewässerbiotope 384
- Fließgewässergesellschaft 383
- Fließgewässerorganismen 385
- Fließkontinuum 383
- Fließwiderstand 506
- Floridastrom 602
- Flügelrad-Anemometer 73
- Fluidsysteme 114
- Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe 425
- Fluoreszenzkollektor 255
- Flussbett 353
- Flüssigkeitserhitzer 421
- Flüssigkeitskollektor
 - Kenndaten 153
 - nichtstrahlungskonzentrierend 148
 - strahlungskonzentrierend 150
- Flüssigkeitssäule 463, 467
- Flüssigkeitsspeicher 155
- Flüssigkeitsverluste 507
- Flusskraftwerke 354
- Flussschleife 353
- Flusssysteme 93
- Flutstrom 599
- Foliengießverfahren 217
- Folienschläuche 637
- Förderbohrung 461
- Fördereinrichtung 526
- Förderhöhe 464
- Förderrohrstrang 490
- Förderstränge 459
- Formation-Micro-Scanner 510
- Formparameter 81
- Fossil biogene Energieträger 4
- Fossil mineralische Energieträger 4
- Fossile Energieträger 4
- Frac-Operation 508
- Francisturbinen 364
- Freie Atmosphäre 67
- Freiflächenpotenzial 277
- Freikolben-Stirling-Maschine 626
- Freilaufdiode 231, 232
- Freilaufstollen 356
- Freileitungssysteme 469
- Freischalteinrichtungen 250
- Freispiegelstollen 360
- Fremdwasseranteil 93
- Frostschutzmittel 162
- Froude-Rankinsches Theorem 281
- Fruchtfolge 104
- Füllfaktor 210
- Fundament 305
- Fundamentplatten 416
- Funktionsprinzip: Wärmepumpe 399
- Gallium-Arsenid 228
- Gas- und Dampfturbinenprozess 28
- Gasabsorption 48, 49
- Gasbrenner 33
- Gasentlösungspunkt 464
- Gaserhitzer 421
- Gasgebläsebrenner 33
- Gaslift 462

- Gasmengen 464
- Gasphasendeposition 221, 225
- Gasturbine 621, 627
- Gasturbinenkraftwerke 28
- Gebäudeaußenhülle 115
- Gebirgsdruck 508
- Gegenstromwärmeübertrager 163
- Geländestruktur 71
- Gelbbrenner 34
- Gelenklose Nabe 298
- Generator 301, 369, 511, 637
- Generatorwirkungsgrad 369
- Geodätische Höhe 347
- Geomechanische Einflüsse 485
- Geophone 510
- Geostrophischer Wind 65
- Geothermie-Bohrung 458
- Geothermiespeicher 458
- Geothermische Energie 40, 108
- Geothermische Heizzentrale 462
- Geothermische Systeme 113
- Geothermischer Gradient 110
- Geräuschemissionen 297
 - Hörschall 338
 - Infraschall 339
- Geröllspeicher 134
- Gesamtmodul 231
- Gesamtniederschlag 83
- Gesamtsystemkonfig., Wärmepumpe 427
- Geschiebe 383
- Geschiebeaufkommen 355
- Geschlossene Luftreceiver 614
- Geschlossene Naturumlaufsysteme 168
- Geschlossene Systeme, Solaranlage 167
- Geschlossene Zwangsumlaufsysteme 169
- Geschwindigkeitsenergiehöhe 347
- Geschwindigkeitsverhältnis 282
- Gesteinsmatrix 507
- Gesteinsspeicher 157
- Getriebe 300, 368
- Getriebebefestigung 301
- Getriebestufe 300
- Gewichtsfundament 306
- Gezeiten 42
- Gezeitenkraftwerk 598
- Gezeitenströmung 599
- Gezeitenwelle 597
- GFK 297
- Glasdachkollektor 637
- Glasfaser 297
- Glas-Metall-Heliostate 610
- Glassuperstrat 227
- Glattrohrwärmeübertrager 163
- Gleichdruckturbinen 361
- Gleichstromsammelschiene 328
- Gleichstromzwischenkreis 301, 309
- Gleitzahl 288, 290
- Globalstrahlung 50
 - auf geneigte, ausgerichtete Flächen 54
 - Jahresgang 51
 - Strahlungsanteile 51
- Gondel 299, 300, 304
- Grabenkollektor 410
- Grabensysteme 502
- Gradientenzone 643
- Gradientkraft 64, 65
- Gradientwind 66
- Grädigkeit 420, 423
- Gravitationsenergie 40, 111
- Grenzschicht, planetarische 68
- Grubenwassernutzung 418
- Grundbauarten, Kollektoren 148
- Grundlastanlage 470
- Grundprinzip, Wärmepumpe 398
- Gründungspfahl 306, 415
- Grundwasserbrunnen 416
- Grundwasserleiter 416
- Grundwassernutzung 416, 417
- Grundwassersammler 418
- Grundwasserstabilisierung 354
- GuD-Kraftwerke 28
- Gülle 647
- Gummimembran 359
- Gummipufferung 301
- g-Wert 118
- GWP-Wert 447
- Hackschnitzel 647
- Hagel 85

- Halbhermetische Verdichter 422
- Halbleiter 199
- Halbleitermaterial 214
- Halbleiter-Silicium 215
- Halbwertlänge 72
- Haltebremse 304
- Hartgestein 506
- Häufigkeitsverteilung 80
- Hauptmedienleitungen 466
- Hauptnährelemente 104
- Hauptslopbehälter 467
- Hauptspannung 508
- Hausanlage 469
- Hausanschluss 468
- Hausnummernbeleuchtung 255
- Hausübergabestation 469
- Havariekesselanlage 470
- HDR-System 506
- HDR-Technologie 502
- Heat Pipe 415
- Heat Pipe Receiver 623
- Hebezeuge 311
- Heilbad 470
- Heißdampf 502
- Heißdampfvorkommen 114, 502
- Heißgas-Maschine 625
- Heißwasseraquifere 502, 504
- Heißwasservorkommen 114, 502
- Heizkessel 33
- Heizzahl 402, 404, 434
- Heizzentrale, Systemauslegung 470
- Heliostate 610
- Heliostatenfeld 610
- Heliostatenfeld-Steuerungstechnik 616
- Helium 44
- Hellmann-Exponent 70, 71
- Hellmann'sche Höhenformel 70
- Hemmnisse, Wasserkraftnutzung 393
- Herbststürme 592
- Heterojunction, Intrinsic Thin-Layer 220
- Heterokontakt 220
- Heterostruktur-Solarzelle 223, 224
- Heteroübergang 223
- Heuschrecken 386
- HFCKW 425
- HFKW-Gemisch 426
- High-Density-Polyethylen 412
- High-Flow-Prinzip 154
- Himmelskörper 39
- Hochdruckanlagen 352, 356
- Hochdruck-Ausleitungskraftwerk 356
- Hochdruckseite 397
- Hochdruck-Turbine 513
- Hochdruckzellen 67
- Hocheffizienz-Solarzelle 220
- Hochfrequenztransformator 239
- Hochspannungs-Drehstrom-Übertr. 328
- Hochspannungs-Gleichstrom-Übertr. 328
- Hochwasserereignis 374
- Hochwasserschutz 354
- Höhenabhängigkeit, Wind 70
- Höhentyp 79
- Hohlbohrschnecke 415
- Hohldecke 134
- Hohlglasrecycling 275
- Hohlpfähle 416
- Hohlraum-Receiver 623
- Hohlspiegel 621
- Holzpellets 647
- Horizontaler Erdwärmekollektor 409
- Hörschal 338
- Hot spot-Effekt 231
- Hot-Dry-Rock-Technologie 502
- H-Rotor 293
- Hubkolbenverdichter 422
- Hybridansatz 20
- Hybridsysteme 115
- Hydraulic-Fracturing 504, 507
- Hydraulischer Kurzschluss 483
- Hydraulisches Spalten 508
- Hydrodynamische Druckgleichung 87
- Hydrogeothermie 457
- Hydrothermale Erdwärmenutzung 457
- Hydrothermale Hochdrucklagerst. 114
- Hydrothermale Niederdrucklagerst. 114
- Hypokausten 157
- Ideale Gase 397
- IGBT's 238

- IGBT-Umrichter 303
- IGBT-Wechselrichter 309
- Imlochhammerbohrverfahren 415
- Impeller-Sonde 509
- Indachkollektor 147
- Indirekte Gewinnsysteme 128, 131
- Indirekte Netzkoppl., Windkraftanl. 309
- Indirekte Systeme 469
- Indoor-Anwendungen 251
- Infraschall 339
- Inhibitoren 490
- Injektionsbohrung 461
- Injektionsstränge 459
- Injektionsteste 460
- Injektivitätsindex 459
- Innenaufstellung, Wärmepumpe 407
- Innerer Photoeffekt 203
- Input-Output-Analyse 20
- Inselanlagen 251
- Inselbetrieb 369
- Inselwechselrichter 233, 235
- Installierbare Anlagenleistungen
 - Photovoltaik 277
 - Windenergie 344
- Inversionsschicht 220
- Investitionen
 - geoth. Stromerz. 519
 - hydroth. Erdwärme 474
 - konv. Wärmesysteme 35
 - Kraftwerke 30
 - Photovoltaik 265
 - Solarthermie 180
 - tiefe Sonde 494
 - Wärmepumpe 439
 - Wasserkraft 376
 - Windenergie 331
- Ionenimplantation 204
- Isenthalpe Drosselung 397
- Isenthalpe Verdichtung 397
- Isobare 66
- Isolationsfehler 241
- Isolierverglasung 120
- Isotope 41
- Jahresarbeitszahl 404
- Jahresaufwandszahl 402
- Jahresdauerlinie 470
- Jahresgang
 - Biomassebildung 107
 - tagesmittlere Strahlungsleistungen 56
 - Windgeschwindigkeiten 78
- Jahresheizzahl 404
- Jahresmittel Windgeschwindigkeit 77
- Jahresniederschlagsmittel 84
- Jahresspeicher 96, 357
- Jahressummen Globalstrahlung 57
- Jahrhundertwelle 592
- Jalousie 125
- Joule-Thomson-Effekt 397
- Jura 118
- Kabellose Überwachungsverfahren 467
- Käferpopulation 448
- Kalina-Prozess 514, 516
- Kaltdampfprozess 397, 399
- Kältemittel 397, 425, 447
- Kanalbrenner 619
- Kanalfreie Systeme 469
- Kanalgebundene Systeme 469
- Kanalkraftwerke 353
- Kanalsystem 134
- Kapazität 248
- Kapillarrohre 424
- Kaplanturbine 362
- Kapselung 338
- Karstaquifere 505
- Kaskadensystem 463
- Kathodenzerstäubung 224
- Kegelradturbinen 363
- Keilrinne 592
- Keramikschaum 625
- Kernfusion 37
- Kiesbankbrüter 385
- Kies-Wasserspeicher 159
- Kinematische Stirling-Maschine 626
- Kinetische Leistung 278
- Kirchhoffsche Gesetz 137
- Klärwirkung 465
- Klassierung 465
- Klassifikation, Windkraftanlagen 293

- Kleinwasserkraft 352
- Kleinwasserkraftanlagen
 - klassisch 352
 - nicht klassisch 352
- Kleinwechselrichter 233, 240
- Klimagasemissionen 21
- Klirrfaktor 237
- Kluftaquifere 505
- Koaleszenz 84
- Koaxialbrunnen 418
- Koaxialsonde 412
- Koaxialwärmeübertrager 163, 421
- Kohlebefeuerte Kraftwerke 27
- Kohlefaser 297
- Kohlenstoffdioxid 43
- Kohlenwasserstoffe 515
- Kokille 217
- Kolben-Expansionsmaschine 510
- Kollektor
 - Abdeckung 145, 146
 - Absorber 145
 - Bauteile 145
 - Definition 145
 - Gehäuse 145, 147
 - Montage 147
 - sonstige Anwendungen 176
 - strahlungskonzentrierend 151
 - Wärmedämmung 145
- Kollektorabsorptionskoeffizient 151
- Kollektorbauarten 145, 148
- Kollektorbestandteile 145
- Kollektorboden 637
- Kollektorgleichung 152
- Kollektorkosten 180
- Kollektorkühlkreislauf 633
- Kollektorstillstand 160
- Kollektorverschaltung 153
- Kollektorwirkungsgrad 151
- Kollisionsrisiko 342
- Kompakter Erdwärmekollektor 411
- Kompensationswanderungen 384
- Komplettierungsmaßnahmen 459
- Komponenten, Wasserkraftanlagen 351
- Kompressionswärmepumpe 399, 492
- Kompressorantrieb 400
- Kondensator 209, 399, 401, 512
- Kondensatorteller 605
- Konduktiver Wärmestromanteil 111
- Konsumeranwendungen 251
- Kontaktfinger 212
- Kontaktsystem 207
- Kontinuitätsbedingung 279
- Kontinuitätsgleichung 278
- Kontrolldrahtsysteme 467
- Konvektionsverluste 140
- Konvektiver Wärmestromanteil 111
- Konvergenzzone 66
- Konzentrationsausgleich 205
- Konzentrationsverhältnis 150
- Konzentrator 610, 611, 621, 622
- Konzentrator-Systeme 214
- Konzentrator-Zellen 228
- Kopfspeicher 96, 356
- Korrosionsbeständigkeit 469
- Korrosionsschutz 466
- Korrosionsschutzmittel 162
- Korrosionsschutzsystem 459
- Korrosionsverlauf 466
- Koslogubsk 598
- Ko-Verdampfung 225
- Krafthaus 361
- Kraftwerkskette 356, 384
- Kreiselpumpe 463
- Kreisprozess 515
- Kristallbaufehler 217
- Kristalline Gesteine 502, 506
- Krümmungsradius 611
- Krypton 44
- Kühlbedarf 429
- Künettenkollektor 410
- Kunststoffdach 636
- Kunststofffolie 146, 611
- Kunststoffmediumrohre 469
- Kunststoffplatte 146
- Kupferbereitstellung 25
- Kupfer-Indium-Di-Selenid 223
- Kurzschlussstrom 207, 209
- Kurzzeitspeicher 159

- Laderegler 250, 252
- Ladungsträgerdichte 202
- Ladungstrennung 207
- Lagerverluste 350
- Laichplätze 385
- Laichwanderungen 384
- Lammellenrohr-Wärmeübertr. 405, 421
- Landschaftbild, Beeinträchtigung 340
- Landwinde 68
- Langsamläufer 293, 315
- Langzeitbetrieb 507
- Langzeitwärmespeicherung 174
- Lärmbelästigung 339, 525
- Lärmemissionen 338, 498
- Lärmwirkung 483
- Lastabwurfschaltung 250
- Latentwärmespeicher 158
- Läufer 301
- Läuferkreis 303
- Läufermagnetfeld 302
- Läuferwicklung 302
- Läuferwiderstände 303
- Laufkäfer 385
- Laufrad 366
- Laufradschaufel 362, 364
- Laufwasserkraftanlagen 352
- Lebenszyklusanalyse
 - Definition 19
 - geoth. Stromerz. 524
 - hydroth. Erdwärme 477
 - konv. Wärmesysteme 36
 - Kraftwerke 31
 - Photovoltaik 269
 - Solarthermie 186
 - Solarthermie 189
 - Strombereitstellung 553
 - tiefe Sonde 496
 - Vergleich 553, 578
 - Wärmebereitstellung 578
 - Wärmepumpe 443
 - Wasserkraft 379
 - Windenergie 336
- Leckageüberwachung 466
- Leckströme 209
- LED-Lichtleitplatten 255
- Leerlaufspannung 207, 209, 231
- Legionellen 174, 192
- Leistung, Wind 277
- Leistungsbeiwert 282, 283, 291, 315
- Leistungsbeschränkung 317
- Leistungsentnahme 283
- Leistungsentzug, Wind 277
- Leistungsfaktor 237
- Leistungskennlinie
 - Aufwindkraftwerk 639
 - Dish/Stirling-Systeme 630
 - Phase I/Windkraftanlage 316
 - Phase II/Windkraftanlage 317
 - Phase III/Windkraftanlage 317
 - Phase IV/Windkraftanlage 319
 - Photovoltaik 261
 - Solarfarm 634
 - Solarturm 628
- Leistungskonvertierung 292
- Leistungsplan 373
- Leistungsregelung 320
- Leistungszahl 402, 434
- Leitapparat 364, 365
- Leiter 198
- Leitfähigkeit 198, 199
- Leitungen, Solaranlage 162
- Leitungsband 198, 199
- Leitungssystem 469
- Leuchtboje 594
- lg p - h -Diagramm 398
- Lichtatmung 100
- Lichtdurchlässigkeit 117
- Lichtkompensationspunkt 101
- Lichtreaktion 98
- Lichtreflexe 339
- Lifttechnologie 462
- Light-trapping 225
- Lilienthal'sche Polare 286
- Linienpotenzial 388
- Lithiumbromid 400
- Lithium-Ionen-Akku 245
- Lithosphärenplatte 110
- Löcherleitung 200

- Los Alamos-Konzept 507
- Loslöseenergie 211
- Lösungsmittelkreislauf 400
- Lösungsmittelpumpe 400
- Low ε -Beschichtungen 121
- Low-Flow-Prinzip 153
- LS-3 Kollektor 632
- Luft, Zusammensetzung 43
- Luftballons 605
- Luftbrunnen 419
- Luftdurchsatz 405
- Luft-Erdregister 419
- Luftkammer 595
- Luftkanäle 613
- Luftkollektor
 - nichtstrahlungskonzentrierend 150
 - strahlungskonzentrierend 150
- Luftkompression 594
- Luftmassenstrom 72
- Luftreceiver 612, 613, 619
- Luftturbine 594
- Luftvorheizung 418
- Luftvorkühlung 419
- Luftvorwärmung 419
- Luftwiderstandsbeiwert 290
- Luftzirkulationssysteme
 - global 66
 - lokale 67
- Magmavorkommen 114
- Majoritätsträger 201
- Malm 118
- Malmkarst 457, 504
- Mantelturbine 293
- Mantelung 638
- Manzanares 637
- Maschennetz 468
- Maschinenhaus 299, 304
- Massenanziehungskraft 42
- Massendurchsatz 281
- Massenerhaltung 278, 280
- Massenstrom 278
- Massivabsorber 407
- Master-Slave-Verfahren 236
- Materialabtrag 466
- Materialauswahl 466
- Materialien, Rotorblatt 297
- Materiestrahlung 37, 38
- Maxau 95
- Maximum Power Point 209
- Maximum Power Point Tracking 241
- Mechanische Verluste 316
- Meeresniveau 592
- Meeresstrom 603
- Meeresströmung 602
- Meeresströmungskraftwerke 603
- Meereswärmekraftwerke 601
- Mega-Power-Tower 605
- Mehnjahresspeicher 357
- Mehrstufige Verdichtung 423
- Membran-Heliostat 611
- Mesosphäre 43
- Messeinrichtungen 159
- Messina 603
- Messung, Fließgeschwindigkeit 89
- Messung, Tracerkonzentration 90
- Metal-Insulator-Semiconductor 220
- Metallmembran 611
- Metallmembran-Konstruktion 622
- Metallurgisches Silicium 215
- Michelson-Marten-Aktinometer 54
- Mie-Streuung 48, 49
- Migrationsbewegung 384
- Mikroseismizität 526
- Mindestabflüsse 386
- Mindestdurchfluss 373
- Mindest-Eintauchtiefe 463
- Mindestenergiemenge 198
- Mindestwasserabfluss 353
- Mindestwasserabgabe 386
- Mindestwasserregelung 386
- Mindestwindgeschwindigkeit 316
- Minoritätsträger 201
- MIS-Inversionsschicht-Solarzelle 220
- Mismatch-Verluste 239
- Mitteldruckanlagen 352, 356
- Mittelspannungs-Drehstromverb. 328
- Mittelspannungs-Gleichstromverb. 328
- Mittelspannungsschaltanlage 310

- Mittelwertmesser 73
- Modellauswahl 461
- Modellierungstiefe 460
- Modernisierung, Wasserkraftanlagen 393
- Modulintegrierte Wechselrichter 240
- Molassebecken 118, 487
- Moll-Gorcynsky-Pyranometer 54
- Molybdänrückkontakt 224
- Momentanwertmesser 73
- Momentenlagerung 299
- Monatssummen, Globalstrahlung 58
- Monopile 306
- Monopile-Gründungstechnik 307
- Monopropylenglykol 411
- Monovalente Betriebsweise 430
- Montage, Kollektor 148
- MOS-Feldeffekttransistor 233
- MOS-Fets 238
- MPP 209
- MPPT-Algorithmen 241
- MPP-Verbindungsline 210
- Mühle 352
- Nabenbauarten 298
- Nabenmaterial 298
- Nachfragepotenziale
 - geoth. Stromerz. 529
 - hydroth. Erdwärme 488
 - oberfl. Erdwärme 454
 - Photovoltaik 277
 - Solarthermie 194
 - Strombereitstellung 560
 - tiefe Sonde 501
 - Umgebungsluft 452
 - Vergleich 560, 586
 - Wärmebereitstellung 586
 - Wärmepumpe 452
 - Wasserkraft 389
 - Windenergie 347
- Nachführeinheit 610
- Nachführung
 - einachs.ig 244
 - passive 244
 - zweiachs.ig 244
- Nachregeln, Windkraftanlage 324
- Nahwärmenetz 468, 492
- Nanoporöses Titanoxid 228
- Nassdampfvorkommen 114
- Nassjahr 94
- Natrium-Rohrreceiver 615
- Naturumlaufanlagen 167
- Naturumlaufsystem 168
- n-Dotierung 202
- Nebenbetriebsanlagen 352, 357
- Neigungswinkel 51, 243
- Nennwindgeschwindigkeit 317
- Neon 44
- Nettobiomassegewinn 100
- Nettophotosynthese 101
- Netzabwurf 369
- Netzanbindung 310, 328
- Netzbetrieb 370
- Netzferne Anwendungen 251
- Netzfremde Anwendungen 251
- Netzgeführte Wechselrichter 238
- Netzgekoppelte Anwendungen 257
- Netzimpedanz 241
- Netzkommutierte Wechselrichter 238
- Netzkoppelstelle 310
- Netzkopplung 258, 308
- Netzkurzschlussleistung 310
- Netzurückwirkung 328
- Netzunabhängige Anwendungen 251
- Netzwechselrichter 237, 240
- Neubau, Wasserkraftanlagen 392
- Neubrandenburg 459
- Neustadt-Glewe 459, 489
- Nichtleiter 199
- Nickel-Cadmium-Akkumulator 245
- Nickel-Metall-Hydrid-Akkumulator 245
- Niederdruckanlagen 352, 353
- Niederdruckseite 397
- Niederdruck-Turbine 513, 593
- Niederschlag 84
- Niederschlagsaufkommen 87
- Niederschlagsflächenpotenzial 387
- Niederschlagshöhen 86, 91
- Niederschlagsjahressummen 92
- Niederschlagsmessung 89

- Niederschlagsmonatssummen 92
- Niederschlagsschreiber 89
- Niederschlagsvariationen 91
- Niederschlagsverteilung 91
- Niedertemperatur-Fußbodenheizung 428
- Niedertemperaturkessel 33
- Niederungstyp 79
- Niedrigwasseraufhöhung 357
- Nieselregen 84
- Norddeutsches Becken 118, 486
- Nordostpassate 67
- Nord-Süd-Ausrichtung 632
- Notenergieversorgung 311
- Notverstellungssystem 299, 300
- NT-Kessel 33
- Nutzenergie 3
- Nutzenergieverbrauch, Deutschland 10
- Nutzhorizont 504
- Nutzung
 - Definition 24
 - geoth. Stromerz. 532
 - hydro. Erdwärme 489
 - passive Sonnenenergienutzung 138
 - Photovoltaik 279
 - Solarthermie 198
 - Strombereitstellung 562
 - tiefe Sonde 501
 - Vergleich 562, 587
 - Wärmebereitstellung 587
 - Wärmepumpe 454
 - Wasserkraft 390
 - Windenergie 348
- Nutzungsgrad 15
- Oberfl. Erdwärme 116
 - Definition 396
 - Geschlossene Systeme 409
 - Offene Systeme 416
 - Sonstige Systeme 418
- Oberlichter 130
- Obertheingraben 118, 457, 487
- Oberwasserspiegel 374
- Oberwellen 238
- ODP-Wert 447
- Offene Luftreceiver 612
- Offene Naturumlaufsysteme 167
- Offene Systeme, Solaranlage 167
- Offene Verdichter 422
- Offene Zwangsumlaufsysteme 169
- Offener Receiver 612
- off-grade-Material 216
- Offshore-Aufstellung 311
- Offshore-Betrieb 310
- Offshore-Flächenpotenziale 346
- Offshore-Stromerzeugungspot. 346
- Offshore-Windenergieanlage 311
- Offshore-Windpark 327
- Ökobilanz 19
- Ölbrenner 34
- Olivin 109
- Ölpressen 649
- Onshore-Windpark 327
- Opak 117
- Open-Hole-Komplettierung 458
- Optische Fenster 47
- ORC-Prozess 514, 601, 642
- Organic Rankine Cycle 514
- Orografie 71
- Ortbetonpfähle 416
- Ost-West-Ausrichtung 632
- Oszillationsspielraum 595
- Oszillierende Wassersäule 594
- OTEC 601
- OWC-Boje 594
- OWC-Brandungsenergiekraftwerke 595
- OWC-System 594
- OWC-Wellenkraftwerke 595
- Ozon 44
- Ozonabbau Potenzial 425
- Parabolkonzentrator 621
- Parabolrinnen 631
- Parabolrinnen-Kraftwerke 631
- Parallaktische Nachführung 622
- Parallelwiderstand 209
- Parkwirkungsgrad 327
- Partikelabsorption 48, 49
- Passate 67
- Passive Solarenergienutzung 115
- Passive Systeme 115

- Passivierung 213
- Passivierungsmaßnahmen 217
- Pauli-Prinzip 197
- p-Dotierung 202
- Peak-Leistung 213
- Peltonturbine 365
- Pendelnabe 298
- Peridotit 109
- Perihel 39
- Pfahllänge 416
- Pfeilerkraftwerk 355
- Pflanze
 - Aufbau 97
 - Zusammensetzung 97
- Pflanzenbauliche Maßnahmen 104
- Pflegemaßnahmen 105
- Phasenwechsel 158
- Phoebus-Anlage 614, 619
- Phosphorglas 218
- Photoeffekt 203
- Photolithographie 220
- Photostrom 210, 211
- Photosynthese 98
- Photosyntheseaktivität 102
- Photosyntheseprozess 99
- Photosynthetisch fixierte Energie 97
- Photosynthetische Effizienz 99
- Photovoltaikmodul 229
- Photovoltaischer Effekt 204, 206
- Physikalisch-chemische Umwandlung 649
- Phytomasse 645
- p-i-n-Struktur 222
- p-i-n-Übergang 222
- Pitch-Regelung 322
- Planck'schen Wirkungsquantum 203
- Planetarische Grenzschicht 67
- Planetengetriebe 300
- Planetengravitation und -bewegung 42
- Plasmaätzen 217
- Plattentektonik 109
- Plattenwärmeübertrager 163, 420, 465
- Pluviografen 89
- PME 649
- p-n-Grenzfläche 204
- p-n-Photoeffekt 206
- p-n-Übergang 204, 205
- Polare 288
- Polare Nachführung 622
- Poly-Silicium 215, 216
- Potenzialbarriere 206, 211
- Potenziale
 - Definition 22
 - geoth. Stromerz. 527
 - hydroth. Erdwärme 486
 - passive Sonnenenergienutzung 138
 - Photovoltaik 276
 - Solarthermie 193
 - Strombereitstellung 557
 - tiefe Sonde 500
 - Vergleich 557, 583
 - Wärmebereitstellung 583
 - Windenergie 344
- Potenzielle Leistung 279
- Powerline 240
- Prandtl-Schicht 69
- Präparationsschritt 227
- Prenzlau 501
- Primärenergiequellen 45
- Primärenergieträger 2
- Primärenergieverbrauch
 - Deutschland 8
 - Welt 5
- Primärprodukte 645
- Produktivitätssteigerung 504, 505
- Profilanstellwinkel 286
- Profildicke 286
- Profilsymmetrie 287
- Propellerturbinen 363
- Propylenglykol 162
- Protektor 463
- Prozesskettenanalyse 19
- PS10-System 619
- Pulsmuster 235
- Pulsweitenmodul. Wechselrichter 235
- Pumpe 164, 462, 463, 492
- Pumpenantrieb 164
- Pumpenauslegung 464
- Pumpeneinlauf 463

- Pumpenleistung 492
- Pumpensteigleitung 463
- Pumpenwirkungsgrade 164
- Pumpspeicherkraftwerke 357
- Punkt maximaler Leistung 209
- PWM-Wechselrichter 235
- Pyranometer 55
- Pyrheliometer 54
- Pyrolyse 648
- Pyrolysereaktor 215
- Quarzglasfenster 623
- Quasi-Sinus-Wechselrichter 234
- Quasizentrale Systeme 259
- Radialmaschinen 423
- Radstube 368
- Rampfpfähle 416
- Rankine-Prozess 514, 601, 641
- Rauigkeit 69
- Rauigkeitsexponent 70
- Rauigkeitslänge 69, 305
- Raumheizung 432
- Raumkühlung 429, 433
- Raumladungsdichte 205
- Raumladungszone 205, 206
- Rayleigh-Streuung 48, 49
- Rayleigh-Verteilung 81
- Reaktionsturbinen 361
- Reaktivierung, Wasserkraftanlagen 393
- Reale Gase 397
- Receiver 610, 612, 622
- Receiverwirkungsgrade 614
- Rechen 360
- Rechteckwechselrichter 233, 235
- Recycling, Solarmodule 275
- Redoxpotenzial 417
- Redoxpotenzial-Veränderung 464
- Referenzanlagen
 - Definition 16
 - geoth. Stromerz. 518
 - hydroth. Erdwärme 471
 - konv. Wärmesysteme 34
 - Kraftwerke 28
 - Photovoltaik 263
 - Solarthermie 177
 - tiefe Sonde 493
 - Vergleich 547, 573
 - Wärmepumpe 436
 - Wasserkraft 374
 - Windenergie 329
- Reflektierte Strahlung 50
- Reflektivität 630
- Reflexion 138
- Reflexionsgrad 632
- Reflexionskoeffizient 101, 138, 139
- Reflexionsstrahlung auf geneigte,
 - ausgerichtete Flächen 53
- Reflexionsverhalten, Solarzellen 273
- Reflexionsverluste 140, 207, 212
- Refrigerant 425
- Regeleinrichtungen 159
- Regelkreis 234
- Regelung, Wasserkraftanlage 369
- Regen 84
- Reibungsdruckverluste 463
- Reibungsfaktor 349
- Reibungsverluste 290
- Reif 85
- Reinitialisierung 313
- Reinjektion 464
- Reinjektionswasser 464
 - Filtration 465
 - Verunreinigung 465
- Rekombination 200, 201
- Rekombinationsprozess 206
- Rekombinationszentren 217
- Rekuperator 516, 627
- Reprogrammierung 313
- Reservoirtyp 504, 505
- Resonanz 595
- Ressourcennutzung 511, 513, 515, 516
- Restdurchlässigkeit 509
- Retention 85
- Rhein 93
- Richtbohrtechnik 505
- Riemenantriebe 368
- Riementransmission 368
- Riftsysteme 502
- Ringgenerator 301

- Ringnetz 468
- Ringraum 490
- Rippenrohrwärmeübertrager 163
- Rissausbreitung 506, 509
- Risserzeugung 508
- Rissfläche 506
- Rissgeometrie 509
- Risslänge 504
- Rissorientierung 509
- Rissrauigkeit 509
- Rissspuren 509
- Risssysteme 506
- Rissverschneidung 509
- Risszone 507
- Rockenau 95
- Rohrbündel 405
- Rohrbündelwärmeübertr. 163, 420, 642
- Rohrleitung 349
- Rohrleitungsnetz 163
- Rohrreceiver 612
- Rohrregister 409
- Rohrreibung 349
- Rohrturbinen 363
- Rohrwandung 490
- Rollladen 125
- Rotary-Bohrverfahren 458
- Rotliegende 504
- Rotor 295
- Rotorblätter 295
- Rotorblattlagerung 299
- Rotorblattmaterialien 297
- Rotorblattverwindung 286
- Rotorblattzahl 289
- Rotordrehzahl 295
- Rotorflächen 298
- Rotornabe 295, 298
- Rubidium-Farbstoff 228
- Rückkühlung 512
- Rücklauftemperatur 470
- Rückseitenkontakt 220
- Rückstrahlverluste 612
- Rundsteuersignal 241
- Sägeprozesse 217
- Saisonale Wärmespeicher 159
- Salter-Wellenenergiewandler 596
- Salz-Filmreceiver 615
- Salzgehalt 641
- Salzgehaltsunterschiede 604
- Salzkonzentration 641
- Salzreceiver 614
- Salz-Rohrreceiver 615
- Salzschmelze 614
- Salzwasser 604
- Sammelbecken 592
- Sandkontroll-Maßnahmen 459
- Sandwichelemente 629
- Sauerstoffeintrag 466
- Saugrohr 350, 368, 417
- Saugrohraustritt 350
- Säulenelement 307
- Säurebehandlung 504, 506
- Säureinjektion 504
- Savonius-Rotor 599
- Schadstoffanreicherung 383
- Schadstoffeinträge 446
- Schalenaufbau, Erde 108
- Schalenkreuz-Anemometer 73
- Schallabstrahlung 342, 448
- Schallcharakteristik 310
- Schallemissionen 300, 448
- Schallquelle 338
- Schaltungsbeispiele, Photovoltaik 229
- Schattenwurf 339
- Scheibenverschmutzung 123
- Scheibenzwischenräume 120
- Schichtfolge 222
- Schichtgase 465
- Schichtladeeinheit 157
- Schichttemperatur 458
- Schichtungsstabilität 70
- Schicht-Wasseraquifer 505
- Schieber 360
- Schiffahrtsbetrieb 354
- Schiffahrtswasserstraße 354
- Schiffsschraube 362
- Schlaggelenknabe 298
- Schlauchwehr 358, 359
- Schleifringe 301

- Schleuse 598
- Schleusenbetrieb 354
- Schlingenausbau 353
- Schluckbrunnen 416, 417
- Schluckvermögen 374
- Schlupf 302
- Schmelzelektrolyse 215
- Schmiermittel 420, 424
- Schneeausstecher 89
- Schneegriesel 85
- Schnellläufer 284, 315
- Schnelllaufzahl 283, 315
- Schrauben-Expansionsmaschine 510
- Schraubenverdichter 422
- Schutzgassysteme 465
- Schutzoxidation 220
- Schwächung der Solarstrahlung 60
- Schwächungseffekte 49
- Schwebstoffe 383
- Schwemmgut 360
- Schwenkgelenknahe 298
- Schwingungssystem 595
- Scroll-Verdichter 422
- Seefallschirmen 603
- Seekabel 328
- Seewinde 68
- SEGS-Kraftwerke 631, 634
- Seismo-akustische Verfahren 510
- Seitenkanalausbau 353
- Sekundärbiotope 385
- Sekundäre Wärmeabgabe 118
- Sekundär-Konzentrator 614
- Sekundärprodukte 645
- Selbstkommutierte Wechselrichter 238
- Selbstüberwachungssystem 242
- Selektive Schichten 138
- Selenisierung 225
- Semiconductor-Grade Silicium 215
- Semi-passive Systeme 134
- Separator 513
- Serienverschaltung 227
- Shuntwiderstand 209
- Sicherheitssysteme 299
- Sicherungen 250
- Siebdruck 224
- Siemens-Prozess 215
- Silicium-Doppelschicht 220
- Silicium-Dünnsolarzelle 226
- Silicium-Dünnschicht 225
- Silicium-Rohre 217
- Silicium-Scheibe 216
- Silicium-Solarzelle 207
- Silicium-Stange 216
- Silikagel 158
- Single Flash-Prozess 512
- Sinterschritt 218
- Sinuswechselrichter 233, 235
- Skalierungsfaktor 81
- Slinkykollektor 410
- Slopsystem 467
- Slopwässer 467
- SO₂-Äquivalente
 - geoth. Stromerz. 524
 - hydroth. Erdwärme 478
 - Photovoltaik 270
 - Solarthermie 188, 190
 - Strombereitstellung 556
 - tiefe Sonde 496
 - Vergleich 556, 582
 - Wärmebereitstellung 582
 - Wärmepumpe 444
 - Wasserkraft 380
 - Windenergie 337
- Sohlerosion 383
- Sohlmaterial 383
- Solar Home Systeme 256
- Solar One 616
- Solar Tres 620
- Solar Two 617
- Solaranlage ohne Umlauf 167
- Solare Aperturfläche 117
- Solare Brauchwarmwasserbereitung 171
- Solare Freibadbeheizung 169
- Solare Nahwärmesystem 174
- Solarer Deckungsgrad 144
- Solares Kombisystem 171
- Solargenerator 229, 252
- Solarkonstante 39

- Solarmodul 229
- Solar-Receiver 623
- Solar-Silicium 216
- Solarstrahlung 47
- Solarteich 640, 641
- Solarthermische Kraftwerke 607
- Solarwafer 275
- Solarwandsysteme 131
- Solarwechselrichter 238
- Solarzelle 207, 230
- Solarzellenwirkungsgrad 211, 213
- Sole 411, 642
- Solebäder 490
- Solezwischenkreis 409
- Solgate 620
- Sollfrequenz 241
- Sollwert 610
- Sondenspeicher 159
- Sonne 37
- Sonnendeklination 52
- Sonnenscheinautographen nach Campbell-Stokes 55
- Sonnenschutzvorrichtung 125
- Sonnensensor 632
- Sonnenstand 59, 60
- Sonnenweg-Diagramm 62, 124
- Sorben 158
- Sorptions-Speicher 158
- Sorptionswärmepumpe 399, 400
- Soultz-Konzept 507
- Spannungsbedingung 506
- Spannungsripple 241
- Speed-Up 71
- Speicher 127, 359, 633
- Speicherbauteil 131
- Speicherbecken 358, 593, 598
- Speicherbewirtschaftung 356
- Speicherkapazität 157
- Speicherkollektor 149, 167
- Speicherkosten 181
- Speichermasse 116, 128
- Speicher-Schläuche 638
- Speichersee 96, 356
- Speichertemperatur 160
- Speicherung von Wasser 96
- Speicherverluste 144
- Speichervolumen 157, 159
- Speicherwand 132
- Speicherwasserkraftanlagen 352
- Speicherzone 642
- Spektralverteilung 211
- Spektrum der Sonnenstrahlung 49
- Sperrdiode 232
- Sperrschichtkapazität 209
- Spiegel 610
- Spiegelabsenkung 383, 458
- Spiegelfehler 622
- Spiegelsegmente 622
- Spin 197
- Spinnen 386
- Spiralkollektor 410
- Spitzenlastkesselanlage 470
- Spitzen-Leistung 213
- Split-Aufstellung 406
- Spülbohrverfahren 415
- Spülungszusätze 446, 498
- Spurennährelemente 104
- St. Malo 598
- Stabilitätsproblem 328
- Stäbler-Wronski-Effekt 222
- Stahlbetonelemente 593
- Stahlbetonturm 638
- Stahldrahtgestrick 612
- Stahlfachwerk 307
- Stahlmediumrohre 469
- Stahlrahmenbauweise 306
- Stahlsonde 412
- Stall-Effekt 288, 321, 322
- Stall-Regelung 321
- Standardgenerator 369
- Standardspektrum 591
- Standardtestbedingungen 213
- Stand-by-Verbrauch 236
- Standing Column Wells 418
- Starre Nabe 298
- Statischer Stall 322
- Stator 301
- Staubauwerk 358

- Staubereich 356
- Staudruckmesser 73
- Staukraftanlagen 356
- Staumauer 358
- Stauration 358
- STC-Bedingungen 213
- Stefan-Boltzmann-Konstante 142
- Stefan-Boltzmann Strahlungsgesetz 142
- Steigleitung 463, 491
- Steigrohr 157
- Steilküste 595
- Steindamm 358
- Stellmotor 610
- Steuerung, Windkraftanlage 310
- Stiller Verdampfer 406
- Stimulation 526
- Stirling-Erhitzer 624
- Stirling-Maschine 621, 625
 - doppelt wirkend 626
 - einfach wirkend 626
- Stirnradgetriebe 300
- Stochastik, Solarstrahlung 61
- Störfallpotenzial, Photovoltaik 275
- Störstellen 212
- Störstellenleitung 200
- Störungzone 502, 505
- Straflo-Turbine 363
- Strahlennetz 468
- Strahlung
 - deterministischer Anteil 61
 - stochastischer Anteil 61
- Strahlungsangebot 55, 56
- Strahlungseinfallswinkel 53
- Strahlungsempfänger 614
- Strahlungsleistung, Sonne 38
- Strahlungsmessung 54
- Strahlungsschwächung 48
- Strahlungsspektrum 49
- Strahlungstransmissionsgrad 117
- Strahlungsundurchlässigkeit 138
- Strahlungsverteilung 55
- Strangreguliertventil 154
- Stratosphäre 43
- Stretched Membrane Facette 629
- Stretched Membrane Heliostat 611
- Stretched Membrane Technologie 622
- Streuung 48
- Strohballen 647
- Stromausbau 354
- Stromerzeugungsscharak., Vergleich 545
- Stromerzeugungspotenziale
 - geoth. Stromerz. 530
 - Photovoltaik 277
 - Vergleich 555
 - Wasserkraft 388
 - Windenergie 344
- Stromerzeugungssysteme
 - geschlossene 514
 - kombinierte 518
 - offene 511
- Stromgestehungskosten
 - geoth. Stromerz. 520
 - Photovoltaik 266
 - Vergleich 548
 - Wasserkraft 378
 - Windenergie 333
- Stromröhre 280
- Strom-Spannungs-Kennlinie
 - Zelle 209, 210
 - Modul 231
- Stromtransport 199
- Strömungsablösung 322
- Strömungsabriss 321, 322, 323
- Strömungsumlenkung 287
- Strömungsverluste 350
- Strömungswiderstandsmessung 90
- Strukturierung 212
- Strukturierungsmöglichkeit 227
- Strukturierungsschritt 227
- Stufenzahl 463
- S-Turbinen 363
- Stützmittel 504, 508
- Stützwände 416
- Subherzynyen Senke 487
- Sublimations-Kondensationsverf. 224
- Substrat 226
- Substrattechnologie 222
- Süddeutschen Senke 487

- Südostpassate 67
- Sulfidausfällung 465
- Sumpf 467
- SunDish System 630
- Superstrat 226
- Superstratstruktur 223
- Superstrat-Technologie 222
- Süßwasser 604
- Svec-Kollektor 411
- Synchrongenerator 301, 369
- Syphonprinzip 462
- Systemelemente, Wasserkraftanlage 351
- Systemnutzungsgrad
 - Photovoltaik 260
 - Solaranlage 165
 - Vergleich 540, 570
 - Wasserkraft 371
- TA Lärm 339
- Tagesgang
 - Solarstrahlung 58
 - Windgeschwindigkeit 79
- Tageslichtsysteme 130
- Tagesspeicher 159, 357
- Tageszeitliche Rhythmus 106
- Talwinde 68
- Tandemsolarzellen 222
- Tandemstruktur 228
- Tangentialkraft 286, 290
- Tankmaterial 156
- TAPCHAN-Anlage 593
- Tau 85
- Tauchgenerator 357
- Teichkollektor 641
- Teilabschattung 239
- Teilbeaufschlagung 363
- Teilverschattungsfaktor 124
- Temperatur, oberflächennah, Erdreich 116
- Temperaturabsenkung, Wärmepumpe 447
- Temperatur-Entropie-Diagramm 398
- Temperaturgleichgewicht 112
- Temperaturgradient 110, 641
- Temperaturmesssignale 160
- Temperaturoptimum 102
- Temperaturprofil 110, 156
- Temperaturverteilung
 - flacher Untergrund 115
 - tiefer Untergrund 117
- Terrestrische Wärmestromdichte 111
- Teste 459
- Testhorizont 460
- Theoretische Potenziale
 - geoth. Stromerz. 527
 - hydroth. Erdwärme 486
 - oberfl. Erdwärme 451
 - Photovoltaik 276
 - Solarthermie 193
 - Strombereitstellung 557
 - tiefe Sonde 500
 - Umgebungsluft 450
 - Vergleich 557, 583
 - Wärmebereitstellung 583
 - Wärmepumpe 450
 - Wasserkraft 388
 - Windenergie 344
- Theoretisches Stromerzeugungspotenzial
 - Photovoltaik 276
 - Windenergie 344
- Thermal Response Test 413
- Thermalfluid 515
- Thermalwasserförderung 462
- Thermalwasserkreislauf 459
 - übertägig 462
 - untertägig 457
- Thermalwasserreinjektion 467
- Thermalwasser-Volumenstrom 458
- Thermische Anemometer 73
- Thermischer Verdichter 402
- Thermo-chemische Umwandlung 648
- Thermoöl 632
- Thermosphäre 43
- Thermostatische Expansionsventile 423
- Thermosyphon-Speicher 156
- Thermosyphon-System 167
- Thüringer Becken 487
- Thyristor-Geräte 237
- Thyristorwechselrichter 238
- Tichelmann Verschaltung 154
- Tidenhub 597

- Tideströmung 603
- Tiefe Sonde 490
- Tiefentladung 250
- Tiefenwasser 601
- Tiefgründung 305
- Tiefwasserwellen 591
- Tirolerwehr 359
- Toftestallen 593
- Tomografie 510
- Torf 645
- Torsionsrohr 610
- TOUGH 461
- Tragflügeltheorie 284
- Transfertechnik 226
- Transformator 239, 310, 369
- Transistor 233
- Transluzent 117
- Transmission 138
- Transmissionsfaktor 49
- Transmissionskoeffizient 117, 138
- Transmissionsverluste 119
- Transparente Abdeckung 119
- Transparente Wärmedämmstoffe 121
- Transparente Wärmedämmung 131
- Transpirationskoeffizient 102
- Trapezwechselrichter 233, 234
- Trassenführungssysteme 469
- Trassierung 468
- Treibhauseffekt 636
- Treibhauspotenzial 425
- Trichlor-Silan 215
- Triebstrang 300, 304
- Triebwasser 353, 360
- Triebwasserkanal 353, 360
- Triebwasserleitung 353
- Triebwerkskanal 360
- Trinkwarmwasserdruckspeicher 173
- Tripelsolarzellen 222
- Tripod 307
- Tripod-Gründung 307
- Trockendampfvorkommen 114
- Trockenjahr 94
- Trockenverdampfung 421
- Tropfenabscheidung 511
- Troposphäre 42, 43
- TSA-System 619
- T-s-Diagramm 398
- T-Typ Heliostat 610
- Tubingstrang 490
- Tunnelbauwerk 419
- Tunnelwassernutzung 418
- Turbine 349, 361
- Turbine 603, 637, 638
 - einfach durchströmbar 596
 - wechselnd durchströmbar 596
- Turbinenaustrittsverluste 362
- Turbinenhaus 354
- Turbinenlebensdauer 639
- Turbinenpumpe 463
- Turbinenwirkungsgrad 349, 362
- Turbokompressoren 423
- Turboverdichter 423
- Turm 304
- Turmauslegung 304
- Turmfuß 638
- Turmhöhe 305, 638
- Turmkopflager 304
- Turmkraftwerk 609
- Turmmaterialien 305
- Turmrohre 636, 637
- Turmschaft 638
- Turm-Solarkraftwerk 609
- TWD-Wand 132
- Überdruckturbinen 361, 364
- Überflutungsverdampfer 421
- Übergangstyp 80
- Überspannung 242
- Überspannungsüberwachungsrelais 250
- Überströmtes Kraftwerk 355
- Übertageteil 462
- Umbau, Wasserkraftanlagen 393
- Umesterung 649
- Umgebungsluft 396
- Umrechnungsfaktoren 635
- Umrichter 303
- Umwälzpumpe 154, 160, 492
- Unterdruck 467
- Untergrundeigenschaften 413

- Unterspannungsüberwachungsrelais 250
- Untertagefilter 463
- Untertageteil 457
- Unterwasser-Motorpumpe 507
- Unterwasserspiegel 374
- Ursprungswärme 40, 111
- U*-Wert 118
- Vakuum-Flachkollektor 149
- Vakuumniveau 203
- Vakuumpumpe 611
- Valenzband 198, 199
- VAL-Verfahren 510
- Venturi-Rohr 90
- Verbindungskanal 598
- Verdampfer 399, 420, 421
- Verdampferdruck 515
- Verdampferrohre 407
- Verdampfung im Pumpenbetrieb 421
- Verdampfungsvorgang 397
- Verdichter 399, 420, 422
- Verdrängermaschine 422
- Verdunstungsverluste 637
- Veredelungsprozesse 647
- Verflüssiger 399, 400, 420, 421
- Vergasung 648
- Verglasung
 - Elektrochrome 127
 - Holografische 127
 - Thermotrope 126
- Vergleich
 - Stromerzeugung 533
 - Wärmebereitstellung 564
 - Zusammenfassung 533
- Verkohlung 649
- Verlegemuster 409, 410
- Verlegeverfahren 469
- Verluste
 - aerodynamische 315
 - elektrische 316
 - mechanische 316
 - Photovoltaik 260
 - Solaranlage 165
 - Wasserkraft 371
 - Windenergie 314
- Verlustenergiehöhe 347
- Verockerung, Schluckbrunnen 417
- Verschaltungsvarianten, Kollektoren 153
- Verschattung 124
- Verschattungseinrichtung 123, 125, 131
- Verschattungselemente 123
- Verschattungsfaktor 124
- Verschlussorgane 360
- Versorgungskette 645
- Verspiegelte Folie 622
- Verstellgetriebe, Gondel 304
- Vertikalachsenmaschine 293
- Vertikaldruck 508
- Vertikale Erdsreichwärmeübertrager 411
- Vielblattrotoren 293
- Vier-Leiter-Netze 174
- Vierleitersystem 468
- Vogelschlagwahrscheinlichkeit 341
- Vollhermetische Verdichter 422
- Volumetrische Verluste 350
- Volumetrischer Receiver 613, 624
- Vorderseitenmembran 611
- Vorlauftemperatur 470
- Vorsätze 635
- Vorsatzzeichen 635
- Wanderfische 384
- Wandlungsmöglichkeiten, Biomasse 647
- Waren/Müritz 459, 489
- Wärmebereitstellungscharak., Vergl. 572
- Wärmebilanz, Erdoberfläche 112
- Wärmedämmmaterial 155
- Wärmedämmstoffe 132
- Wärmedefizit 435
- Wärmedurchgangskoeffizient 118, 142
- Wärmeentzug 413
 - Bodenart 413
 - Erdsreich 411
 - Wärmepumpe 448
- Wärmefluss 128
- Wärmegestehungskosten
 - hydroth. Erdwärme 475
 - Solarthermie 184
 - tiefe Sonde 495
 - Vergleich 574

- Wärmepumpe 440
- Wärmekapazität 116, 141, 155
- Wärme-Kraft-Maschine 625, 642
- Wärmeleistungen, Erdwärmekollektor 410
- Wärmeleitfähigkeit, Gestein 111
- Wärmeleitung 115
- Wärmeleitungsverluste 140
- Wärmeleitzahl 143
- Wärmelieferung, Untergrund 435
- Wärmeproduktion, radiogene 112
- Wärmeproduktionsrate 112
- Wärmepumpe 404, 420, 470, 492
 - Definition 396, 398
 - Energiebilanz 402
 - Grundprinzip 398
 - Systemelemente 420
 - technische Umsetzung 420
- Wärmepumpen-Arbeitsmittel 425
- Wärmepumpen-Heizungsanlage 427, 428
- Wärmepumpenkaskade 423
- Wärmepumpenkreislauf 400
- Wärmepumpenprozess 397
- Wärmepumpensysteme 428
- Wärmepumpenverdampfer 405, 411
- Wärmepumpenverdichter 422
- Wärmequellenanlage 404
 - Definition 396
 - geschlossene Systeme 408
 - offene Systeme 408
 - sonstige Systeme 408
 - Varianten 408
- Wärmeregime 435
- Wärmerohr 149
- Wärmerohrreceiver 623
- Wärmeschutzverglasungen 121
- Wärmesenke 396
- Wärmespeicher 154
- Wärmespeicherkapazität 637
- Wärmespeichermedium 155
- Wärmespeicherungsart 155
- Wärmespeichervermögen 637
- Wärmestrom 112, 141
- Wärmestromdichte 111
- Wärmeträgermedium 161, 411, 490
- Wärmeträgerumlauf 492
- Wärmeträgerzwischenkreislauf 400
- Wärmetransport 411
- Wärmeüberschuss 435
- Wärmeübertrager 156, 163, 420, 466
 - externer 163
 - interner 163
- Wärmeübertragerfläche 406
- Wärmeübertragerpfähle 415
- Wärmeübertragerrohre 407
- Wärmeverluste 115, 139, 142, 151
- Wärmevork., oberste Erdschichten 113
- Wärmegewinne 115
- Warmwasservorkommen 114
- Wasserangebotsunterschiede 94
- Wasseraufbereitung 417
- Wasser-Dampf-Gemisch 511
- Wasserfrac-Technik 506
- Wasserhaushaltsgleichung 85
- Wasserkraftanlage, Systemaufbau 348
- Wasserkreislauf 82, 83, 604
- Wasserräder 361, 367
 - mittelschlächtige 367
 - oberschlächtige 367
 - unterschlächtige 367
- Wasserrechte 393
- Wasserschloss 356, 360
- Wasserspeicher 134, 155
- Wasserspiegel 592
- Wasserspiegelabsenkung 463
- Wasserstandsmessung 90
- Wasserstandsregelung 369
- Wassertemperaturunterschiede 600
- Wasserverdunstung 605
- Wasservorräte 82
- Wattenmeer 346
- Wechselrichter 232, 309
- Wechselrichter mit Transformator 239
- Wehr 358
- Wehranlage 354
- Weibull-Verteilung 81
- Weißglasspiegel 632
- Weitere Umwelteffekte
 - geoth. Stromerz. 525

- hydroth. Erdwärme 483
- Photovoltaik 272
- Solarthermie 191
- tiefe Sonde 498
- Wärmepumpe 446
- Wasserkraft 381
- Windenergie 338
- Welkepunkt 102
- Wellenberg 595
- Wellenenergie 591, 592
- Wellenenergiekraftwerk 593
- Wellenenergiewandler 592
- Wellenfront 591
- Wellenhöhe 591
- Wellenkupplung 368
- Wellenperiode 591
- Wellental 595
- Wells-Turbine 594
- Westwindbereich 67
- Wh-Wirkungsgrad 250
- Widerstandsbeiwert 286
- Widerstandskraft 284, 286, 290
- Widerstandsprinzip 290
- Widerstandsverluste 213
- Wind, Höhenabhängigkeit 70
- Winddruck 279
- Winddurchtrittsfläche 277
- Windenergieangebot 64
- Windenergiekonverter 277
- Windentstehung 64
- Windfahnen 73
- Windgeschwindigkeitsmessung 73
- Windgeschwindigkeitsreduktion 280
- Windgeschwindigkeitsverteilung 75
- Windkraftanlagen, Aufstellanord. 325
- Windleistung 72, 73
- Windpark 310
- Windparkaufstellung 325
- Windparkwirkungsgrad 327
- Windprofil 70
- Windrichtungsmessung 73, 304
- Windrichtungsnachführung 304
- Windverteilung 73
- Winkelfaktor 123
- Wintergarten 135
- Winterniederschläge 93
- Wintersonnenwende 40
- Wirkungsgrade
 - aerodynamischer 295
 - Kalina-Prozess 516
 - Kollektor 143
 - ORC-Prozess 516
 - Photovoltaiksystem 261
 - Receiver 614
 - Solarzelle 213
 - Solarzellen 212
 - Turbinen 362
 - Vergleich 540, 570
 - Wärmepumpe 402
 - Wechselrichter 236
 - Zelle 261
- Wirkungsgradgleichung 152
- Wirkungsgradkennlinie, Kollektor 152
- Wirkungsgradverlauf 152
- Wochenspeicher 357
- Wölbung 287
- Xenon 44
- Zähler 250
- Zahnradantriebe 299, 368
- Zapfenlagerung 299
- Zellstreifen 227
- Zentrale Systeme, Photovoltaik 259
- Zentraler Wechselrichter 239
- Zentrifugalkraft 66
- Zerfall radioaktiver Isotope 40, 111
- Zirkulationsfließrate 506
- Zirkumpazifischer Vulkangürtel 502
- Zonenschmelz-Verfahren 217
- Zoomasse 645
- Zusatzheizung 633
- Zwangsumlaufanlagen 167
- Zwei-Becken-System 598
- Zweiblattrotor 296
- Zweigeteiltes Kraftwerk 355
- Zwei-Leiter-Netze 174
- Zweileitersystem 468
- Zweiphasenströmung 612
- Zweischalige Wand 134

Zweischicht-Verfahren 462
Zweischichtschaltung 173
Zweistoffgemisch 400, 516

Zwischenspeicher 356
Zyklone 67