

Seminar Zukunftsenergien Thema: Solarthermie

Kai Klinkhammer, Oguzhan Paksoy,
Prof. Dr.-Ing. Gregor Krause
SS 2010

Inhaltsverzeichnis

Einführung	3
Grundlagen der Sonnenstrahlung	3
Globalstrahlung	4
Nicht konzentrierende Solarthermie.....	6
Solare Meerwasserentsalzungsanlage	6
Thermische Solarkollektoren.....	6
Prinzip des thermischen Sonnenkollektors	7
Aufbauschema.....	7
Anwendungsgebiet.....	8
Wirtschaftliche Betrachtung.....	9
Solarthermische Kraftwerke.....	10
Konzentrierende Solarthermie – Parabolrinnenkraftwerke.....	10
Wirtschaftlichkeit am Beispiel von Andasol1	12
Dynamisches Kostenrechnen der Andasol1	13
Konzentrierende Solarthermie - Solar-Stirling Anlagen	14
Konzentrierende Solarthermie - Solarturmkraftwerke	15
Aufwindkraftwerk.....	16
Funktionsprinzip	17
Wirkungsgrad/Ertrag	18
Modifikationen	18
Aktuelle Projekte	19
Aussichten	19
Desertec.....	19
Konzept.....	19
Kritik.....	20

Einführung

Der Menge nach größter Nutzungsbereich der Sonnenenergie ist die Erwärmung der Erde, so dass im oberflächennahen Bereich biologische Existenz in den bekannten Formen möglich ist, gefolgt von der Photosynthese der Pflanzen. Die meisten Organismen, die Menschen eingeschlossen, sind entweder direkt oder indirekt von der Sonnenenergie abhängig. Brennstoff und Baumaterial stammen ebenfalls daraus. Die Sonnenenergie ist weiterhin dafür verantwortlich, dass es in der Atmosphäre zu Luftdruckunterschieden kommt, die zu Wind führen. Auch der Wasserkreislauf der Erde wird von der Sonnenenergie angetrieben.

Neben diesen 'natürlichen' Effekten gibt es zunehmend eine technische Nutzung vor allem im Bereich Energieversorgung.

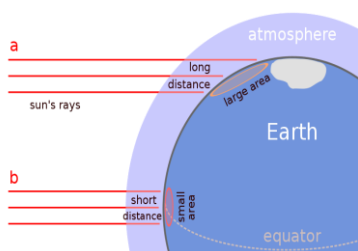
Sonnenwärmekraftwerke erzeugen mit Hilfe von Wärme und Wasserdampf elektrischen Strom

Die Sonnenenergie ist regenerative Energie, ihre Nutzung wird in vielen Ländern gefördert, in Deutschland beispielsweise durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG).

Zudem ist diese Energiequelle unerschöpflich, kostenlos und umweltfreundlich.

Grundlagen der Sonnenstrahlung

Die Sonne erzeugt durch die in ihrem Inneren ablaufende Kernfusion eine Leistung von ca. Watt. Über die Zeit integriert ergibt sich daraus die in der Sonne erzeugte Sonnenenergie. Diese Sonnenstrahlung wird durch die Erdatmosphäre gedämpft. Die gesamte Strahlungsleistung der Sonne, die pro Quadratmeter auf die Erde einfällt, wird durch die Solarkonstante beschrieben. Sie beträgt im Mittel $E_0=1367\text{W/m}^2$, wenn die Strahlung auf eine flache Scheibe, senkrecht ausgerichtet auf die Sonne im Vakuum im Abstand Erde - Sonne einwirkt.



Da die Erde aber Kugelförmig ist (die Fläche einer Kugel ist 4-mal so groß wie die einer runden Scheibe mit gleichem Durchmesser) beträgt die mittlere Strahlungsleistung nur 1/4 der Leistung bezogen auf die Scheibe:

Also:

$$E_0 = \frac{1367 \text{ W}}{4 \text{ m}^2} = 341,75 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

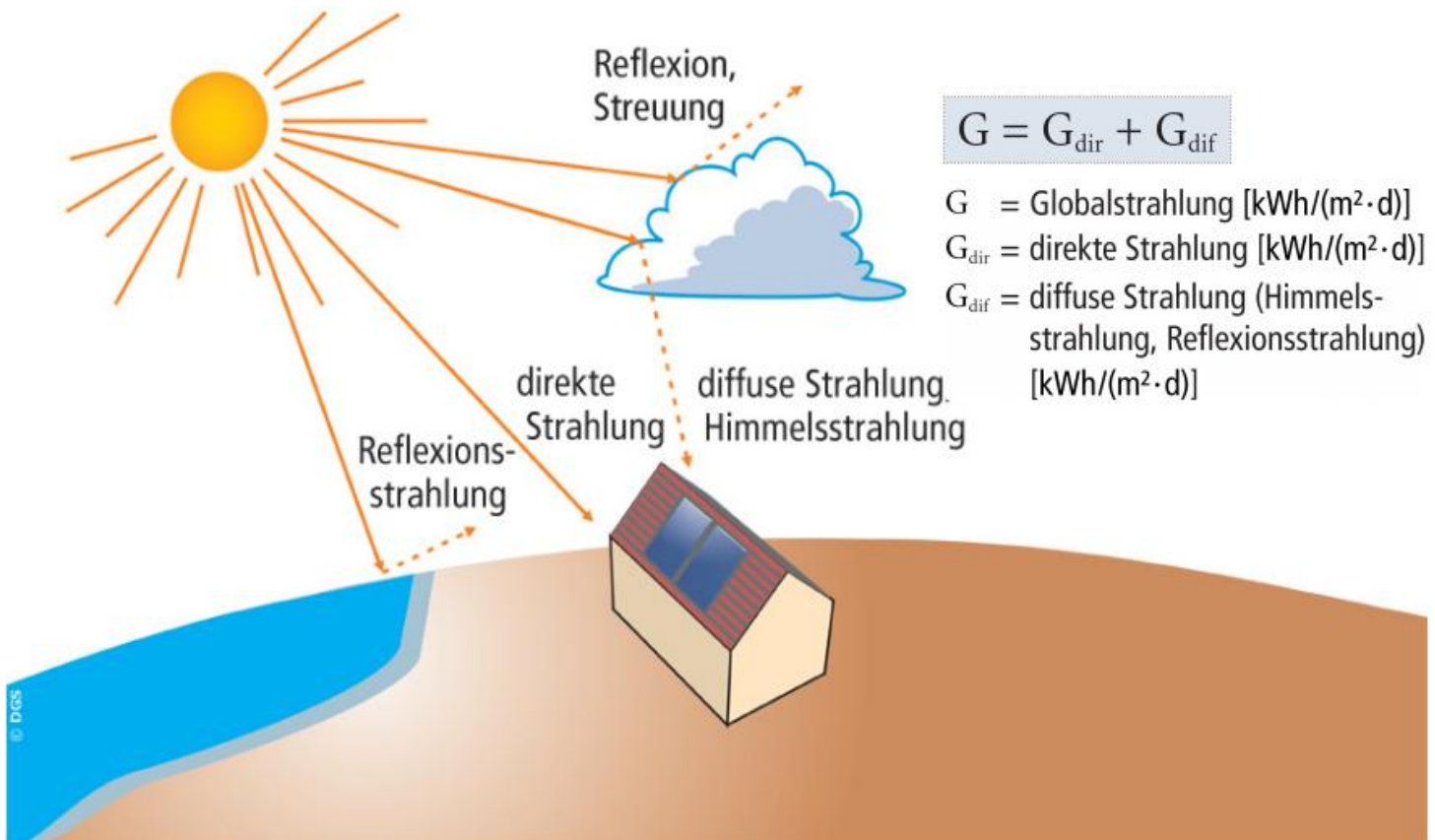
Durch Reflexion und Absorption an Wolken, Aerosolen und Gasen wird dieser Wert durch die Atmosphäre beträchtlich reduziert. Da je nach Breitengrad die Strahlung einen längeren Weg durch die Atmosphäre zurücklegen muss, ergibt sich je nach Aufenthaltsort auf der Erde eine unterschiedliche Strahlungsleistung. In Deutschland können im Mittel höchstens $\sim 1000\text{W/m}^2$ genutzt werden.

Durch Summierung der eingestrahlt Energie über bestimmte Zeiträume, beispielsweise Stunden, Tage oder Jahre, ergibt sich ein Energieeintrag (gemessen in kWh/m²), der auf den aufsummierten Zeitraum zu beziehen ist. Tageseinträge werden in kWh/(m² · d) angegeben, Jahreseinträge in kWh/(m² · a) (gesprochen meist: kWh je m² und Jahr). In der Klimatologie wird der Jahreseintrag auch durch die über das ganze Jahr

(Tag und Nacht, in Gemeinjahren also 8.760 Stunden) gemittelte Einstrahlleistung beschrieben. Ein Jahreseintrag von beispielsweise $1200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ entspricht einer über das Jahr gemittelten Einstrahlleistung von $137 \text{ W}/\text{m}^2$.

Globalstrahlung

Unter Globalstrahlung versteht man die gesamte an der Erdoberfläche auf eine horizontale Empfangsfläche auftreffende Solarstrahlung. Sie setzt sich zusammen aus der auf direktem Weg eintreffenden Solarstrahlung, der Direktstrahlung, und der Strahlung, die über Streuung an Wolken, Wasser- und Staubeilchen die Erdoberfläche erreicht, der Diffusstrahlung.



Die Momentanwerte der Globalstrahlung unterliegen wetterbedingt starken Schwankungen (Bewölkung, atmosphärische Trübung). Wegen des veränderlichen Einfallswinkels des Direktstrahlungsanteils ist die Globalstrahlung mittags stärker als morgens und abends, und im Sommer stärker als im Winter. Die Jahreseinträge liegen wegen des steileren Einfallswinkels umso höher, je mehr man sich dem Äquator (siehe Ekliptik) nähert. Auch die Höhe über dem Meeresspiegel, also die Dicke der Atmosphäre, die die Sonne durchdringen muss, beeinflusst diesen Wert systematisch.

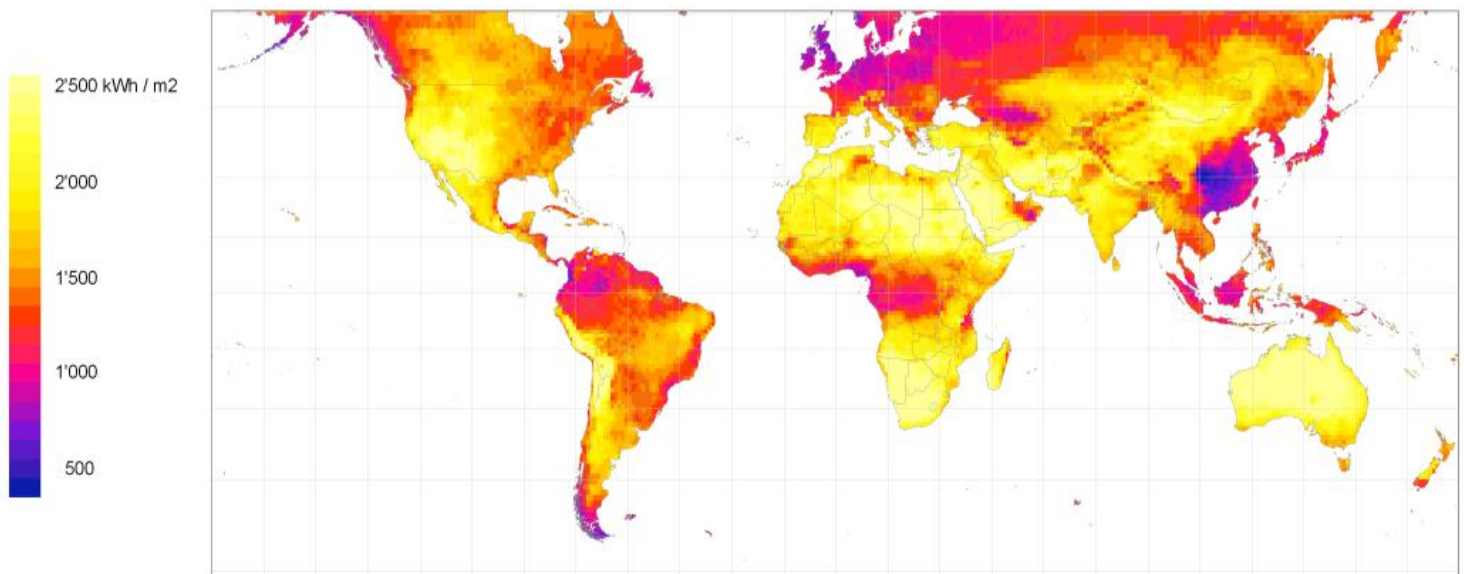
Der Momentanwert der Globalstrahlung erreicht in Mitteleuropa an einem Sommermittag bei wolkenlosem Himmel etwa $900 \text{ W}/\text{m}^2$. Bei leichter Bewölkung (aber praktisch ungehinderter Direktstrahlung) kann sie wegen der von den weißen Wolken gelieferten Diffusstrahlung kurzzeitig deutlich über $1.000 \text{ W}/\text{m}^2$ ansteigen. Bei trübem, wolkigem Wetter besteht sie nur aus dem Diffusstrahlungsanteil und sinkt auf Werte um oder sogar unter $100 \text{ W}/\text{m}^2$.

Die Jahressumme der Globalstrahlung liegt in Deutschland zwischen 900 und 1.200 kWh pro m² und Jahr auf eine horizontale Fläche, das entspricht im Durchschnitt ca. 100 bis 135 W/m². In Spanien beträgt die Globalstrahlung etwa 2.000 kWh/(m² · a) (230 W/m²), in der Sahara 2.500 kWh/(m² · a) (285 W/m²).

Die Veränderung des Direktstrahlungsanteils hängt von der Veränderung des Einfallswinkels ab, welche sich aus dem Sonnenstand und dem Neigungswinkel der Fläche ergibt.

Auf der folgenden Weltkarte kann man die Bestrahlungsdichte der jeweiligen Region sehen:

Yearly sum of direct normal irradiance



Source: Meteonorm 6.0 (www.meteonorm.com); uncertainty 15%
Period: 1981 - 2000; grid cell size: 1°

June 2008 

Nicht konzentrierende Solarthermie

Solare Meerwasserentsalzungsanlage

In einem flachen, schwarzen (PE, PC) Becken mit einer Isolationsschicht als Wärmedämmung (z. B. Sand) und einer zeltförmigen, transparenten Abdeckung aus Fensterglas verdunstet durch die Absorption der Sonneneinstrahlung das Meer- oder Brackwasser. Der Wasserdampf schlägt sich an der Innenseite der windgekühlten Abdeckung nieder. Das Kondensat wird mittels Auffangrinnen zur weiteren Aufbereitung (Verschnitt mit Salzwasser) abgeleitet. Einfache Solardestillen nach diesem Prinzip wurden bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts zur Meerwasserentsalzung eingesetzt.[1] Bei Anlagen in Küstennähe wird das nach dem Verdunstungsprozess übrig gebliebene Meerwasser (Sole) wieder ins Meer zurückgepumpt. Die mittlere Produktionsleistung einer einfachen solaren Meerwasserentsalzungsanlage nach dem Gewächshausprinzip liegt im Sommer durchschnittlich bei bis zu $6 \text{ l/m}^2 \cdot \text{d}$ und ca. $1,2 \text{ l/m}^2 \cdot \text{d}$ Trinkwasser im Winter. Dies gilt für Jahreseinstrahlungsleistungen von 1500 bis 2000 kWh/m^2 (Mittelmeerraum) und einem Anlagenwirkungsgrad von 40 %. Daher sind sie sehr flächenintensiv, wenn große Wassermengen gewonnen werden sollen.

Vorteile: Der Aufbau der Anlage ist einfach und kann ohne tiefgehende Spezialkenntnisse dezentral gebaut und angewendet werden. Bei Anlagen auf Meereshöhe ist keine elektrische Versorgung notwendig, da keine Pumpen eingesetzt werden müssen. Dadurch ist ein Einsatz in Regionen ohne Infrastruktur möglich.

Nachteile: Die Leistung der Anlage je Fläche vergleichsweise gering, da die Kondensation an der Glasfläche erfolgt und die Kondensationsenergie nicht zurückgewonnen und für eine Voraufheizung des Meerwassers genutzt werden kann.

Thermische Solarkollektoren



Ein Sonnenkollektor oder auch Solarkollektor ist eine Vorrichtung zur Sammlung der im Sonnenlicht enthaltenen Energie. Traditionell steht die Bezeichnung für einen thermischen Solarkollektor, der mit der „eingefangenen“ Sonnenenergie ein Übertragungsmedium (Heizwasser) aufheizt, wobei nahezu das gesamte Strahlungsspektrum des Sonnenlichtes in thermischen Solaranlagen mit relativ hohem Wirkungsgrad ausgenutzt wird. Vorrichtungen

zur Gewinnung von elektrischer Energie in Photovoltaikanlagen werden dagegen als Solarmodule bezeichnet.

Während man früher ausschließlich fest aufgestellte bzw. verankerte Kollektoren verwendete, gibt es nun auch Systeme, die der Richtung zur Sonne nachgeführt werden.



Prinzip des thermischen Sonnenkollektors

Thermische Sonnenkollektoren erreichen bei der Verwertung der Sonnenstrahlung relativ hohe Wirkungsgrade - typischerweise zwischen 60 und 75 %. In Europa fallen bei Sonnenschein je nach Jahreszeit und Sonnenstand zwischen 200 und 1000 W/m² ein.

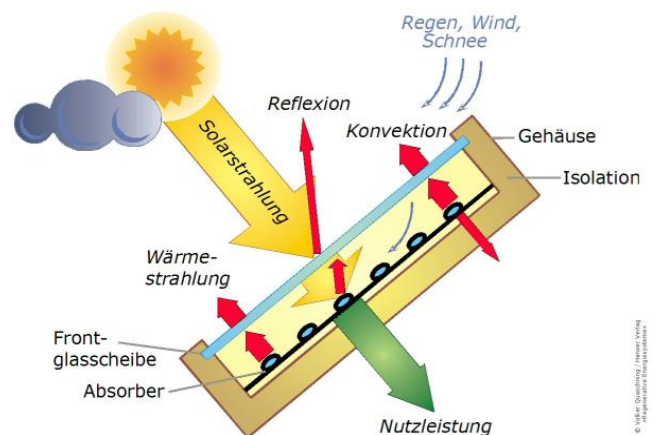
Zentraler Bestandteil des Kollektors ist der Solarabsorber, der Lichtenergie der Sonne in Wärme umwandelt und diese an einen ihn durchfließenden Wärmeträger abgibt. Mit Hilfe dieses Wärmeträgers wird die Wärme aus dem Kollektor abgeführt (z.B. über Wärmeübertrager) und anschließend direkt verwendet oder gespeichert.

Um die unvermeidlichen Wärmeverluste zu reduzieren, ist eine gute Wärmedämmung des Absorbers gegenüber der Umgebung notwendig. Nach der Dämmtechnik unterscheidet man

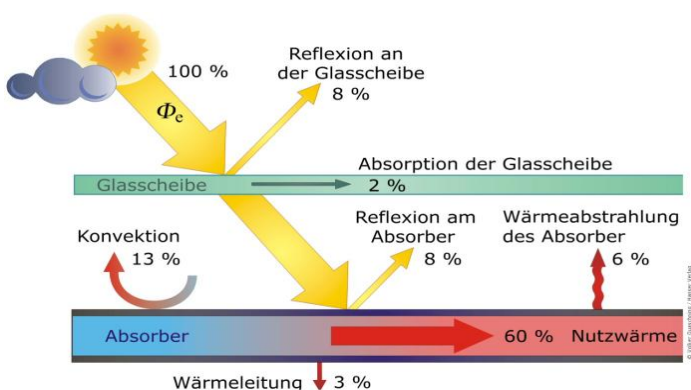
Flachkollektoren, die herkömmliches Dämmmaterial verwenden - Vakuumröhrenkollektoren, die die Dämmung durch ein Vakuum erreichen, aber teurer in der Anschaffung sind und Vakuum-Flachkollektoren, d. h. flache Bauform, gutes Brutto/Netto-Flächenverhältnis und Vakuum-Dämmung.

Aufbauschema

Das Schema zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Flachkollektors mit den wichtigsten Bauteilen. Die durch eine Glasplatte einfallenden Sonnenstrahlen treffen auf einen Solarabsorber. Beim Auftreffen der Sonnenstrahlen wird nahezu der gesamte Spektralbereich des Lichtes absorbiert. Die dabei freiwerdende Wärme soll nicht verloren gehen, weshalb der Kollektor allseitig wärmegeädmt ist. Die konvektive Wärmeabgabe nach vorn wird durch eine oder zwei Glasscheiben verringert. Bei Vakuumkollektoren ist sie ganz unterbunden.



Wärme, die aufgrund der Eigentemperatur des Absorbers von diesem durch Emission wieder abgestrahlt wird, kann größtenteils ebenfalls durch die Glasscheibe zurückgehalten werden, da Glas für die höhere Wellenlänge nicht transparent ist. Sie ist somit im Kollektor gefangen - das Strahlungsgleichgewicht führt zu einer höheren Temperatur als ohne Scheibe. Dies ist der Effekt, der oft mit Wärmefalle oder Treibhauseffekt (besser: Glashauseffekt) beschrieben wird. Bei modernen thermischen Solarkollektoren wird spezielles Solarglas verwendet.



Der Absorber kann insbesondere bei Vakuumkollektoren eine wellenlängenselektive Absorption aufweisen, so dass einerseits eine hohe Absorption für Sonnenlicht besteht und andererseits im Nahen Infrarot ein geringer Emissionsgrad vorliegt und dafür sorgt, dass weniger Wärmestrahlung emittiert wird.

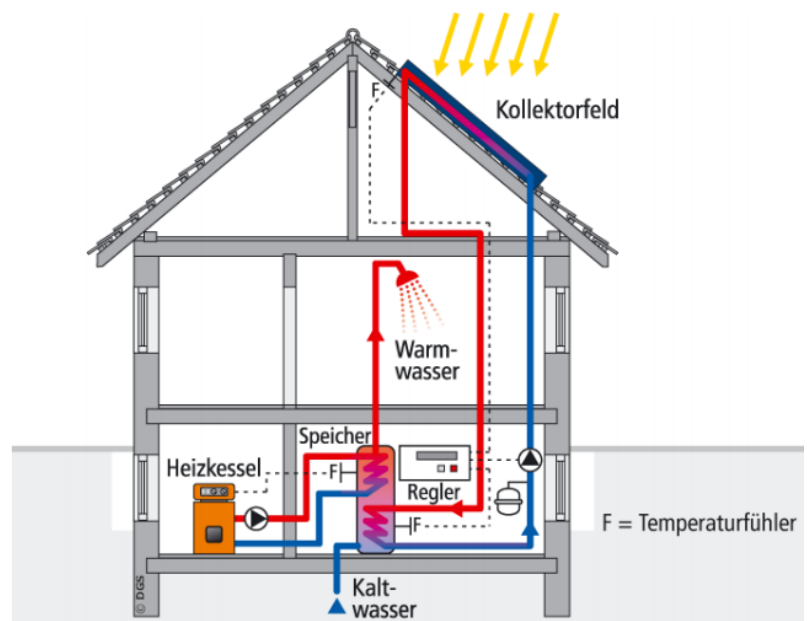
Der erhitzte Absorber überträgt die Wärme auf die in fest mit dem Absorber verbundenen Kupfer- oder Aluminiumrohren fließende Wärmeträgerflüssigkeit. Sie transportiert die Wärmeleistung zu einem Verbraucher oder einem Wärmespeicher. Es gibt Solaranlagen mit offenem Flüssigkeitskreislauf, bei denen der Absorber direkt vom zu erwärmenden Wasser durchströmt wird (vor allem bei Thermosiphonanlagen). In Regionen mit größerer Frostgefahr werden jedoch in der Regel getrennte Flüssigkeitskreisläufe verwendet. Dem in sich geschlossenen Solarkreislauf, auch als Primärkreislauf bezeichnet, wird dabei ein Stoff beigemischt, der den Gefrierpunkt herabsetzt. Die Wärme wird dann über einen Wärmeübertrager auf das Wasser übertragen.

Vakuumröhrenkollektor In Vakuumröhrenkollektoren wird die Wärmedämmung durch einen evakuierten Raum innerhalb des Glases verbessert; wie in einer Thermoskanne kann Wärmeenergie nur durch Strahlung, nicht aber durch Konvektion oder Leitung wieder an die kältere Umgebung abgegeben werden. Um den Druckkräften standzuhalten, werden runde Glasröhren verwendet.

Daneben gibt es noch einen halbkugelförmigen Solarkollektor, der, anders als Flachkollektoren, die Sonnenstrahlung während ihres gesamten Umlaufs gut nutzen kann. Diese Bauform hat sich aber noch nicht am Markt etabliert.

Anwendungsgebiet

Die bekannteste und häufigste Anwendung der aus Sonnenenergie gewonnenen Hitze ist die Warmwasserbereitung im Haushalt. Bei geeigneter Auslegung von Kollektorfläche und Speichervolumen reicht sie in Mitteleuropa während des gesamten Sommerhalbjahres zum Waschen und Baden. Theoretisch kann die Solarwärme auch das ganze Jahr über den Bedarf eines Haushalts decken, allerdings wird dann die Anlage sehr viel größer und liefert im Sommer sehr viel mehr Wärme, als genutzt werden kann. Der Wirkungsgrad solch einer Anlage wird dadurch erheblich verschlechtert, und die hohen Investitionskosten für diese Überdimensionierung werden selten durch das eingesparte Gas, Öl oder Strom kompensiert - soll heißen: eine solche Anlage wäre unrentabel. Wirtschaftlich ausgelegte Anlagen können allerdings im Winterhalbjahr die zusätzliche konventionelle Wärmequelle ergänzen. Der Anteil einer solchen Anlage an der Warmwasserbereitstellung liegt über das Jahr gesehen zwischen 50 und 60 %. Was ca. 14% des Heizenergiebedarfs entspricht.



Bindet man die Solarwärme nicht nur im Warmwasser- sondern auch im Raumheizungsbedarf ein, so sind größere Kollektoranlagen sinnvoll. Bei Standardheizungen kann sie im Jahresschnitt durchaus zweistellige Prozentsätze zur Heizenergie beitragen und daher die Heizkosten merklich senken. Setzt man auch einen Saisonwärmespeicher ein, ist es sogar möglich, im Sommerhalbjahr so viel Wärme zu speichern, dass der Heizenergiebedarf das ganze Jahr über gedeckt werden kann. Einschränkungen ergeben sich nur bei zu niedriger montierbarer Kollektorfläche im Verhältnis zum Jahres-Heizenergiebedarf, etwa bei mehrgeschossigen Häusern. Saisonwärmespeicher bestehen im einfachsten Fall aus einer ausreichend großen Menge Wasser oder passiver Wärmemasse. Häuser mit passiv solarer Bauweise oder Sonnenkollektoren und Saisonwärmespeicher werden auch unter dem Begriff Sonnenhaus vermarktet.

Um auch an bewölkten und regnerischen Tagen genügend Warmwasser sicherzustellen, ist in der Thermischen Solaranlage ein spezieller Warmwasserspeicher mit Wärmetauscherfunktion eingebaut, der für einzelne Haushalte - je nach Personenanzahl (Familiengröße) und Nutzungsverhalten - von etwa 300 bis 1500 Liter Wasserfüllung reicht. Bei größeren Wohneinheiten, Krankenhäusern, Hotels etc., die wegen der Größe und der deutlich kontinuierlicheren Nutzung relativ günstige Amortisationszeiträume haben können, kommen oft angepasste Industriespeicher zum Einsatz. In üblichen Speichern heizt der Solarkreislauf nur die untere Hälfte des Boilers auf, der dann aber wegen der Konvektion vollständig bis auf die maximal zulässige Temperatur (bis 95 °C) erwärmt wird. Um einen höheren Wärmebedarf oder bei bedecktem Himmel mangelnde Wärme aus dem Kollektor zu kompensieren, ist im Warmwasserspeicher entweder eine zusätzliche stromgespeiste Wärmequelle (Heizstab) integriert, oder der Speicher ist über einen weiteren eingebauten Wärmetauscher mit dem Heizkessel des Hauses verbunden.

Wirtschaftliche Betrachtung

Sonnenkollektorsysteme sind generell vor allem hinsichtlich der niedrigen Betriebskosten attraktiv, da sie durch den nicht vorhandenen Brennstoffbedarf kaum laufende Kosten verursachen. Die regelmäßigen Kosten beschränken sich auf geringe Stromkosten von etwa 8 € pro Jahr für den Betrieb der elektrischen Umwälzpumpe bei 7W Stromverbrauch und 5300 laufenden Betriebsstunden pro Jahr, bezogen auf ein durchschnittliches Einfamilienhaus und einen Ökostrompreis von 21,5 Cent pro kWh. Darüber hinaus fällt alle zwei Jahre eine (nicht zwingend nötige) Wartungsüberprüfung an.

Da der Heizenergiebedarf aber schon durch die Gebäudedämmung beeinflusst werden kann, ist eine ausschlaggebende Frage erstmal, ob man verfügbare Mittel generell in eine größer bemessene Heizung oder stattdessen in bessere Wärmedämmung investiert. Die Antwort hängt von der vorhandenen Dämmung sowie den baulichen Möglichkeiten zur Anbringung einer größeren Kollektorfläche bzw. dem Einsatz anderer Heizungsformen ab, einschließlich dem vollständigen Verzicht auf eine Heizung bei Neubauten mit passiver Solararchitektur.

Bei der Auslegung einer Heizung muss man zwischen dem alleinigen Einsatz mit bestimmten Saisonwärmespeichern, und dem kombinierten Einsatz mit einer anderen (bestenfalls ökologisch ebenfalls neutralen) Heizungsform unterscheiden. Die Wahl der Technologie für die saisonale Zwischenspeicherung ist mitbestimmend für die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems. Die klassische Beschränkung eines Kollektorsystems auf "Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung" kann grundlegend falsch sein, sofern die Anschaffungskosten für den Saisonwärmespeicher nur gering genug sind. Hier muss man von dem

konkreten Produktpreis für das jeweilige Gesamtsystem ausgehen, sowie Lebensdauer und laufende Kosten berücksichtigen. Oft lässt sich gerade durch die technisch vergleichsweise einfache saisonale Zwischenspeicherung der Wärme, etwa mit weitgehend verlustfreien thermochemischen Wärmespeichern, großen oder zumindest gut isolierten Puffer-Wärmespeichern, oder ebenfalls verlustarmen Latentwärmespeichern niedrige Gesamtkosten erreichen. Auch eine mögliche Nachführung der Kollektoren, oder eine Änderung des Aufstellwinkels zum Winter hin, kann das Preis-Leistungs-Verhältnis beeinflussen.

Bei der Entscheidung für oder wider ein Sonnenkollektorsystem spielt aber auch die Förderung unterschiedlicher Technologien eine Rolle. Eine Entscheidung für die bei Solarthermie eigentlich sehr kostengünstige ganzjährige Stromerzeugung (z. B. per Stirling-Generator) wird z. B. oft zu Gunsten der höher geförderten Photovoltaik verzerrt (vergleiche 5,11 Cent Aufschlag pro kWh gemäß KWKG-Gesetz zzgl. des üblichen Marktpreises von 3 bis 8 Cent, gegenüber 43,01 Cent Einspeisevergütung im Jahre 2009 gemäß EEG bei Photovoltaik).

Solarthermische Kraftwerke

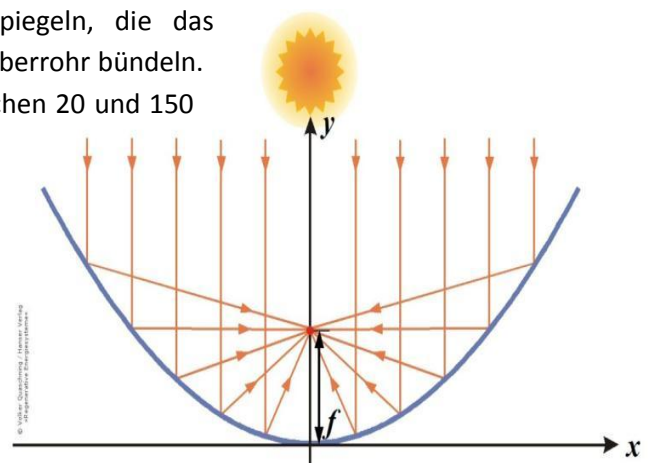
Ein Sonnenwärmekraftwerk oder Solarwärmekraftwerk ist ein Solarkraftwerk, das die Wärme der Sonne über Absorber als primäre Energiequelle verwendet. Daher sind daneben die Bezeichnungen solarthermisches Kraftwerk oder thermisches Solarkraftwerk üblich.

Sonnenwärmekraftwerke erreichen je nach Bauart höhere Wirkungsgrade und meist niedrigere spezifische Investitionen als Photovoltaikanlagen, haben jedoch höhere Betriebs- und Wartungskosten und erfordern eine bestimmte Mindestgröße. Sie sind nur in besonders sonnenreichen Regionen wirtschaftlich einsetzbar, also nur zwischen Äquator und 35 ° nördlicher bzw. südlicher Breite.

Es gibt verschiedene Konzepte für die Nutzung der Sonnenwärme zur Energiegewinnung, die sich in zwei Kategorien einteilen lassen: Kraftwerke, welche die Direktstrahlung der Sonne mit Reflektoren auf einen Solarabsorber bündeln, und solche, die ohne konzentrierende Reflektoren arbeiten und die gesamte Globalstrahlung (Direkt- und Diffusstrahlung) nutzbar machen.

Konzentrierende Solarthermie – Parabolrinnenkraftwerke

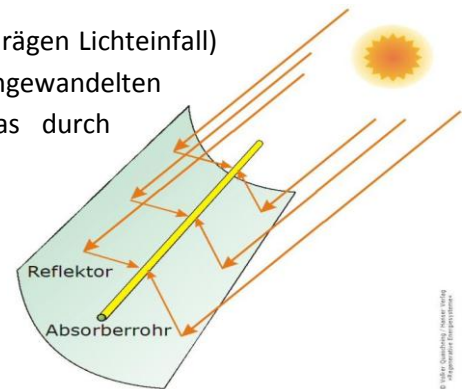
Parabolrinnenkollektoren bestehen aus gewölbten Spiegeln, die das Sonnenlicht auf ein in der Brennpunktlinie verlaufendes Absorberrohr bündeln. Die Länge solcher Kollektoren liegt je nach Bautyp zwischen 20 und 150 Metern. In den Absorberrohren wird die konzentrierte Sonnenstrahlung (die Konzentration liegt bei 100) in Wärme umgesetzt und an ein zirkulierendes Wärmeträgermedium abgegeben. Die Parabolrinnen werden aus Kostengründen meist nur einachsig der Sonne nachgeführt. Sie sind deshalb in Nord-Süd-Richtung angeordnet und werden der Sonne im



Tagesverlauf von Ost nach West nachgeführt. Ziel ist somit ein gezieltes Absorbieren möglichst aller auf dem Kollektor auftreffenden Sonnenergie.

Probleme stellen die Reflexionen der Strahlung (kompliziert durch schrägen Lichteinfall) durch Materialien und Techniken dar. Zudem muss ein Verlust der umgewandelten Wärmeenergie im Übertragungsmedium unterdrückt werden, was durch Dämmung oder Vakuum erreicht werden kann.

Der Quotient aus der gewonnenen Wärmeenergie und der auf dem Kollektor eintreffenden Strahlungsenergie ist der Wirkungsgrad. Dieser beträgt bei aktuellem Stand der Forschung zwischen 60 und 75 % (nur der Kollektor).

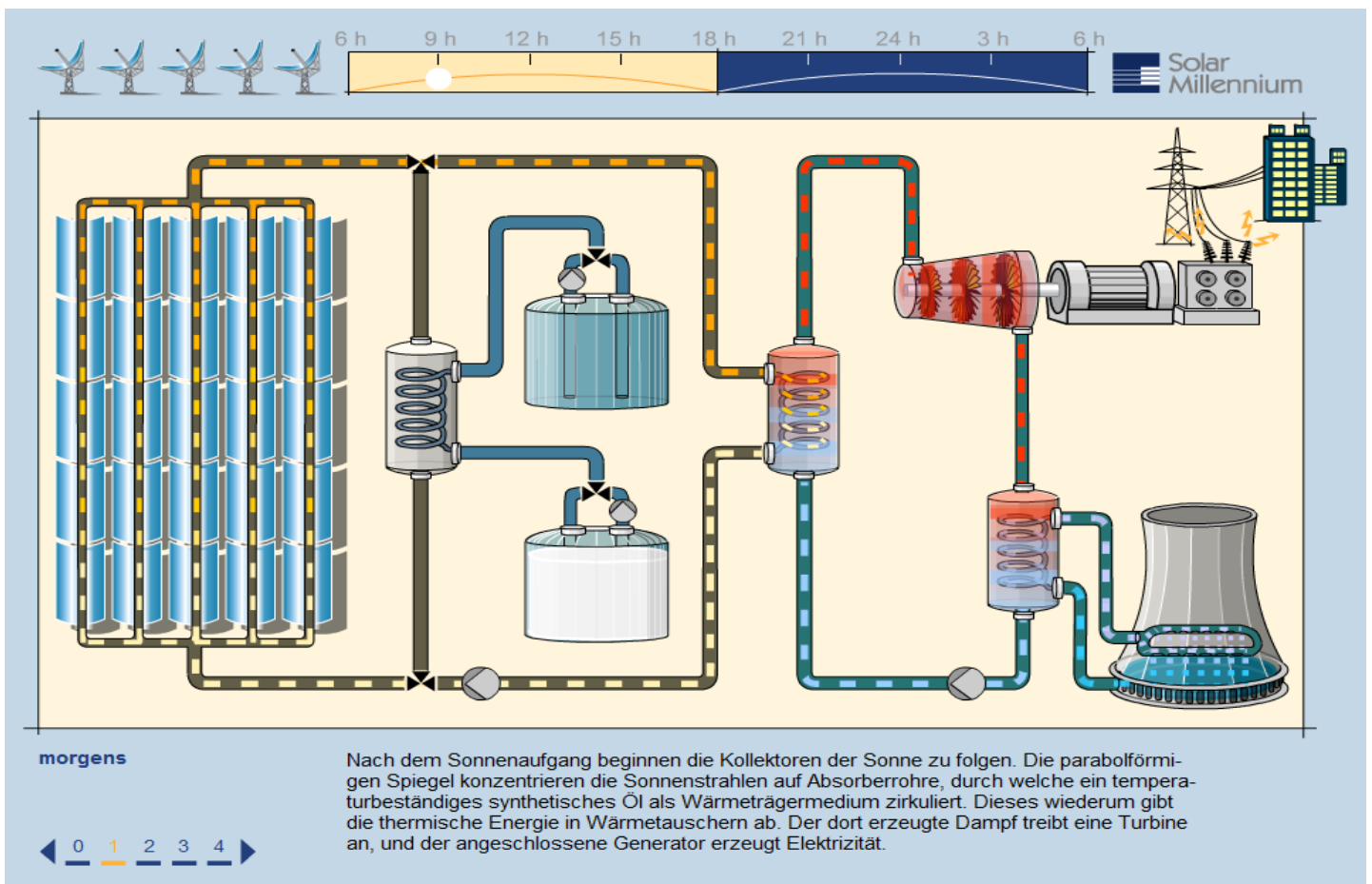


Das Kollektorfeld eines Solarfarmkraftwerkes besteht aus vielen parallel geschalteten Parabolrinnen – Kollektoren. Im Kollektorfeld wird ein Wärmeträgermedium erhitzt, entweder Thermoöl oder überhitzter Wasserdampf. Bei Thermoölanlagen sind Temperaturen von bis zu 390 °C erreichbar, die in einem Wärmeübertrager zur Dampferzeugung genutzt werden. Die Direktampferzeugung kommt ohne solche Wärmeübertrager aus, da der überhitzte Wasserdampf direkt in den Absorberrohren erzeugt wird. Damit sind Temperaturen von über 500 °C möglich.

Der Wasserdampf wird anschließend wie in einem Dampfkraftwerk einer zentral angeordneten Dampfturbine zugeführt, die an einen Generator gekoppelt ist. Die heute verwendeten Turbinen sind speziell auf die besonderen Einsatzbedingungen in Sonnenwärmekraftwerken angepasst. Ein möglichst hoher Wirkungsgrad ermöglicht ein kleineres Solarfeld bei gleichbleibender Leistung des Kraftwerks. Das senkt die Investitionskosten und macht so den erzeugten Strom rentabler. Der Tag-/ Nachtzyklus und wechselnde Wetterverhältnisse erfordern zudem sehr kurze Anfahrzeiten der Dampfturbine. Aus diesen Gründen werden in Sonnenwärmekraftwerken meist zweigehäusige Dampfturbinen mit Zwischenüberhitzung eingesetzt. Dabei wird der Abdampf der Hochdruckturbine vor dem Eintritt in die nachgeschaltete Niederdruckturbine bei konstantem Druck in einen Zwischenüberhitzer im Dampfkessel geleitet, wo er erneut überhitzt wird. Der Dampfkreislauf arbeitet auf diese Weise mit einer höheren Durchschnittstemperatur als ein nicht zwischenüberhitzter Kreislauf. Das erhöht den Wirkungsgrad, denn die Turbine erbringt bei gleicher Wärmezufuhr im Kessel eine höhere Leistung. Ebenso verringern sich der Feuchtigkeitsgehalt in der Niederdruckturbine und die sonst übliche, durch Wassertropfen verursachte Korrosion. Die Zwischenüberhitzung des Dampfes erhöht so Wirkungsgrad und Lebensdauer der Turbine. Ein spezielles Gehäusedesign schützt die Dampfturbine vor zu starkem Auskühlen bei Nacht und trägt neben dem geringen Gewicht des Rotors zu einer kurzen Anfahrzeit bei. Damit die Dampfturbine effektiv arbeiten kann, muss der Dampf gekühlt werden. Der höchste Wirkungsgrad wird mit Hilfe von Wasserkühlung erreicht, wie z. B. im Falle von Andasol. Für den Fall, dass – wie in vielen Wüstengebieten – kein Kühlwasser in ausreichenden Mengen zur Verfügung steht, können auf Kosten des Wirkungsgrades Trockenkühlssysteme eingesetzt werden.

Der besondere Vorteil dieses Kraftwerkstyps ist die konventionelle, relativ leicht verfügbare Technik. Aufgrund der steigenden Energiekosten wächst auch das Interesse an kleineren Anlagen, die eine dezentrale Versorgung ermöglichen. Durch die Kopplung von Strom-, Prozesswärme-, Kälteerzeugung und Speichertechnologien könnten auch solche Systeme wirtschaftlich arbeiten.

Aufbauschema eines Parabolrinnenkraftwerkes mit Flüssigsalz als Zwischenspeicher:



Wirtschaftlichkeit am Beispiel von Andasol1

Kostenrechnungen mit Kapitalverzinsung (dynamisch)

Grundsatz:

Investor in eine Solaranlage erwartet eine gleiche Verzinsung, wie wenn er sein Kapital zu üblichen Konditionen am Markt angelegt hätte.

$$k_n = A_0 \cdot q^n$$

Kapital k_n nach einer Anlagedauer von n Jahren bei einem Anfangskapital A_0 und (jährlichem) Zinssatz p

$$q = 1 + p$$

Muss der Investor zusätzlich in den verschiedenen Jahren i jeweils Zahlungen A_i für Wartung, Reparaturen, Betrieb etc. leisten, muss auch der Kapitaleinsatz A_i in den folgenden Jahren, d.h. über $n - i$ Jahre, verzinst werden:

$$k_n = A_0 \cdot q^n + \sum_{i=1}^n A_i \cdot q^{n-i}$$

Sind die jährlichen Zahlungen (zusätzlich zur Anfangsinvestition A_0) gleich groß, so erhält man durch Auswertung der geometrischen Reihe die **Sparkassenformel**:

$$k_n = A_0 \cdot q^n + A \cdot \frac{q^n - 1}{q - 1}$$

Abzinsung:

Zahlung A_i im Jahre $i > 0$ wird möglich durch Geldanlage $A_i,0 = A_i / q^i$

am Anfang ($i = 0$)

und Verzinsung über i Jahre.

Um die Zahlungen A_i leisten zu können, wäre also als Anfangskapital k_0 erforderlich:

$$\begin{aligned} k_0 &= A_0 + \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{q^i} \\ &= A_0 + A \cdot \frac{q^n - 1}{(q - 1) \cdot q^n} \quad \text{falls } A_i = A \quad \forall i \end{aligned}$$

Am Ende der Nutzungsdauer wird die Solaranlage in der Regel wertlos sein. Bis dahin muss der Investor sein eingesetztes Kapital inklusive Zinsen zurückerhalten, und zwar in der Regel durch jährliche Rückzahlungen Z_i , die wie die Zahlungen A_i jeweils am Jahresende erfolgen. Zinst man $Z_i - A_i$ auf den Investitionsbeginn zurück, so beträgt der sog. **Kapitalwert K in der Gegenwart, der einzusetzen ist**:

$$a = \frac{q - 1}{1 - q^{-n}}$$

$Z = K_0 \cdot \text{annuitätsfaktor } a$

a Annuitätsfaktor abhängig vom Zinssatz p und der Nutzungsdauer n

Dynamisches Kostenrechnen der Andasol1

$K_{\text{inv}} = A_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ €}$

$K_{\text{var}} = A_i = 3\% \text{ des } K_{\text{inv}} \text{ jedes Jahr}$

$N = 25 \text{ Jahre}$

$E_a = 158 \cdot 10^6 \text{ kWhel/a}$

Zinssatz = 8 %

Kapital zum Zeitpunkt Null K_0

Stromgestehungskosten K_e

Annuitätsfaktor in 25 Jahre und bei 8% Zinssatz ist 0,0937

Jährliche Rückzahlung Z

$$\begin{aligned} K_0 &= 3 \cdot 10^8 \text{ €} + 9 \cdot 10^6 \text{ €} \cdot \frac{(1,08^{25}-1)}{(1,08-1)} \\ &= 3 \cdot 10^8 \text{ €} + 9 \cdot 10^6 \text{ €} \cdot 10,67 \\ &= 3,96 \cdot 10^8 \text{ €} \end{aligned}$$

Annuitätsfaktor $a = 0,0937$

$$\begin{aligned} Z &= 3,96 \cdot 10^8 \text{ €} \cdot 0,0937 \\ &= 37,1 \cdot 10^6 \text{ €} \text{ Jährliche Rückzahlung} \end{aligned}$$

$K_e = Z/E_a$

$$\begin{aligned} K_e &= 37,1 \cdot 10^6 \text{ €} / 158 \cdot 10^6 \text{ kWhel/a} \\ &= \mathbf{0,234 \text{ € / kWhel}} \end{aligned}$$

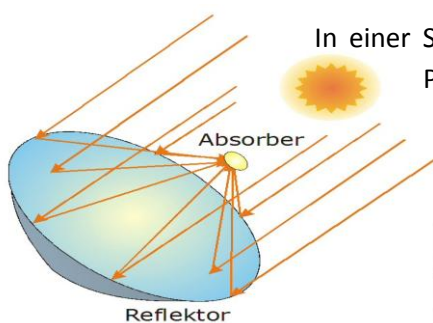
Versprochnener Kaufpreis der Stadt: $0,27 \text{ € / kWhel}$

$$\begin{aligned} \text{Gewinn} &= 0,27 \text{ € / kWhel} - 0,234 \text{ € / kWhel} \\ &= 0,036 \text{ € / kWhel} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jährlicher Gewinn} &= 0,036 \text{ € / kWhel} \cdot 158 \cdot 10^6 \text{ kWhel/a} \\ &= \mathbf{5,688 \cdot 10^6 \text{ €}} \end{aligned}$$

$$\text{Gewinn in 25 Jahren} = 142,2 \cdot 10^6 \text{ €}$$

Konzentrierende Solarthermie - Solar-Stirling Anlagen



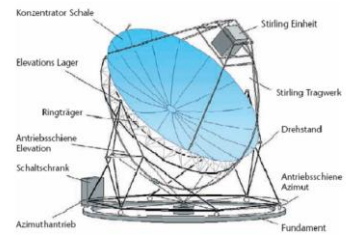
In einer Solar-Stirling Anlage konzentriert ein zweiachsig der Sonne nach geführter Parabolspiegel die Sonnenenergie direkt auf einen Absorber, der im Brennpunkt des Spiegels installiert ist. Das Arbeitsgas (Helium, Luft) darin erhitzt sich auf bis zu 900 °C und treibt einen Stirlingmotor oder eine Gasturbine neben dem Absorber an. Der Stirling-Motor setzt die

© VDE-Quantum / Peter Wieg
-degenerativ Energieformen

thermische Energie direkt in mechanische Arbeit um. Damit wird in der Regel in einem direkt angekoppelten Generator elektrische Energie erzeugt.

Solar-Stirling-Anlagen – wegen des schüsselförmigen Spiegels auch Dish-Stirling-Anlagen genannt – erreichen mit einem elektrischen Generator einen Wirkungsgrad von etwa 30 %.

Stirling Energy Systems baut deswegen zurzeit in San Bernardino County in der amerikanischen Mojave-Wüste an ihrem Projekt Solar One, einer Anlage mit vorerst 20.000 Stirling Solar Dish Einheiten mit einer Leistung von insgesamt 500 Megawatt. Später soll die Anlage auf 34.000 Einheiten mit einer Gesamtleistung von 850 Megawatt erweitert werden.

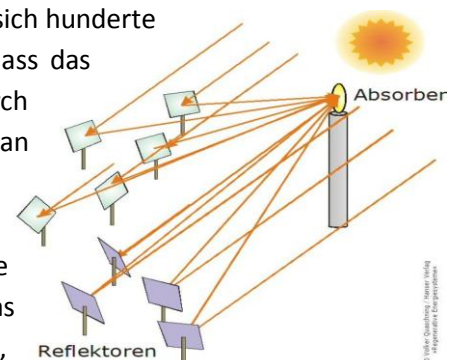


Solar-Stirling-Anlagen können auch bei Bewölkung oder nachts betrieben werden, wenn eine andere Wärmequelle, wie zum Beispiel die Verbrennung eines Energieträgers wie Erdgas, eingesetzt wird. Weitere Anwendungen von Solar-Stirling-Anlagen könnten solare Kühlung oder Meerwasserentsalzung oder der Antrieb von Pumpen sein.

Auch Mischformen zwischen Dish-Stirling-Anlagen und konventionellen photovoltaischen Anlagen („PV-Dish-Anlagen“) existieren. Dabei wird der Parabolspiegel beibehalten, der Stirlingmotor und der Generator werden jedoch durch eine Solarzelle ersetzt. Da diese nur so groß wie die Fläche des Brennpunktes sein muss (also nur einen sehr kleinen Bruchteil so groß wie normale Solarzellen, die für die gleiche Leistung erforderlich wären), können extrem effiziente Solarzellen verwendet werden, die für eine konventionelle Anwendung viel zu teuer wären. Eine Wasserkühlung der Solarzellen ist bei dieser Verwendung unabdingbar; das dabei anfallende heiße Wasser kann einfach zum Heizen oder zum Waschen genutzt werden. Strom und Heizleistung zusammengerechnet, können diese Anlagen laut Hersteller einen Gesamtnutzungsgrad von mehr als 75% erreichen.

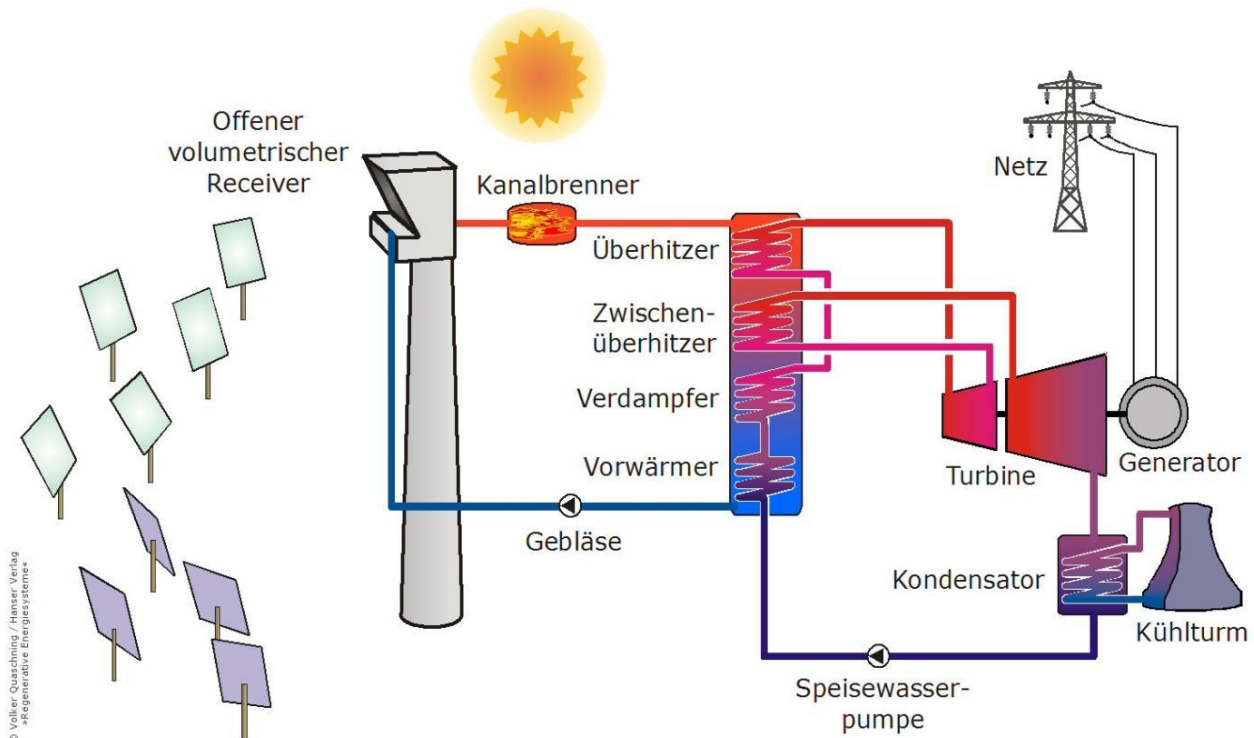
Konzentrierende Solarthermie - Solarturmkraftwerke

Beim Solarturmkraftwerk, auch Zentralreceiverkraftwerke genannt, handelt es sich zumeist um Dampfkraftwerke mit solarer Dampferzeugung. Bei Sonnenschein richten sich hunderte bis tausende automatisch positionierende Spiegel (Heliostate) so aus, dass das Sonnenlicht auf den zentralen Absorber (Receiver) reflektiert wird. Durch starke Konzentration der Sonneneinstrahlung (bis zu 2000fach) entstehen an der Spitze des Turms Temperaturen bis zu mehreren 1.000 °C. Die technisch sinnvoll handhabbaren Temperaturen liegen bei rund 1.300 °C. Die Temperaturwerte und der damit erreichbare thermodynamische Wirkungsgrad sind somit deutlich höher als bei Solarfarmkraftwerken. Das verwendete Wärmeträgermedium ist entweder flüssiges Nitratsalz, Wasserdampf oder Heißluft.



Meistens wird die im Absorber entstehende Wärme jedoch über ein Dampfturbine und Gasturbine zur Stromerzeugung genutzt. Dafür wird im Receiver das Wärmeträgermedium auf bis zu 1000 °C erhitzt und anschließend zur Dampferzeugung genutzt. Dieser treibt eine Turbine an. Damit diese effizient arbeiten kann, muss der Dampf wie bei einem Solarfarmkraftwerk gekühlt werden. Zur Kühlung kann bei

ausreichendem Vorhandensein Wasser eingesetzt werden. Da dies in Wüstengebieten oft nicht der Fall ist, kommen unter Herabsetzung des Wirkungsgrades auch Trockenkühlanlagen zum Einsatz.[9] Der erzeugte Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist. Neben dem Parabolrinnenkraftwerk ist das Solarturmkraftwerk inzwischen ein weiterer, gut entwickelter Anlagentyp, der – wenn auch noch verbunden mit öffentlichen Förderprogrammen – Solarstrom wirtschaftlich zu Verfügung stellen kann.



In Deutschland wurde im Juli 2006 mit dem Bau eines solarthermischen Demonstrations- und Versuchskraftwerks in Jülich begonnen, das im Januar 2009 den Testbetrieb aufnahm und 1,5 MWel Leistung erbringen soll. Als Wärmeübertragungsmedium dient Luft. Da die Arbeitstemperatur mit 600–800 °C sehr hoch ist, ist es effizienter als andere solarthermische Kraftwerke. Schwankungen im Leistungsangebot der Sonneneinstrahlung sollen bei dieser Anlage mittels eines neuartigen Wärmespeichers aus keramischer Schüttung ausgeglichen werden. Dadurch kann die Stromerzeugung im Kraftwerk relativ unabhängig von der Sonneneinstrahlung und damit verbrauchsorientierter erfolgen. In Zukunft könnte dieses Kraftwerk bei fehlender Sonneneinstrahlung in Überbrückungsphasen konventionell mit Biomasse betrieben werden. Mit Hilfe dieser Turmtechnologie lässt sich auch Wasserstoff durch Sonnenenergie erzeugen. Der Aufbau und die Weiterentwicklungen der Anlage wird vom Solar-Institut Jülich der FH-Aachen und vom DLR betreut.

Aufwindkraftwerk

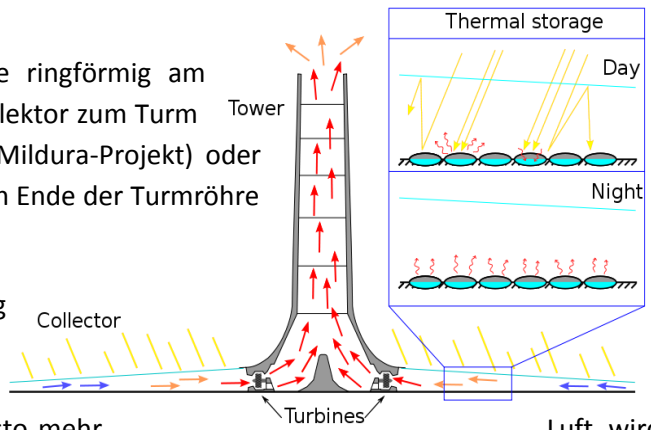
In einem Thermikkraftwerk, auch Aufwindkraftwerk genannt, wird Luft von der Sonne erwärmt und steigt in einem Schornstein auf. Eine oder mehrere Turbinen erzeugen aus dieser Luftströmung elektrischen Strom.

Funktionsprinzip

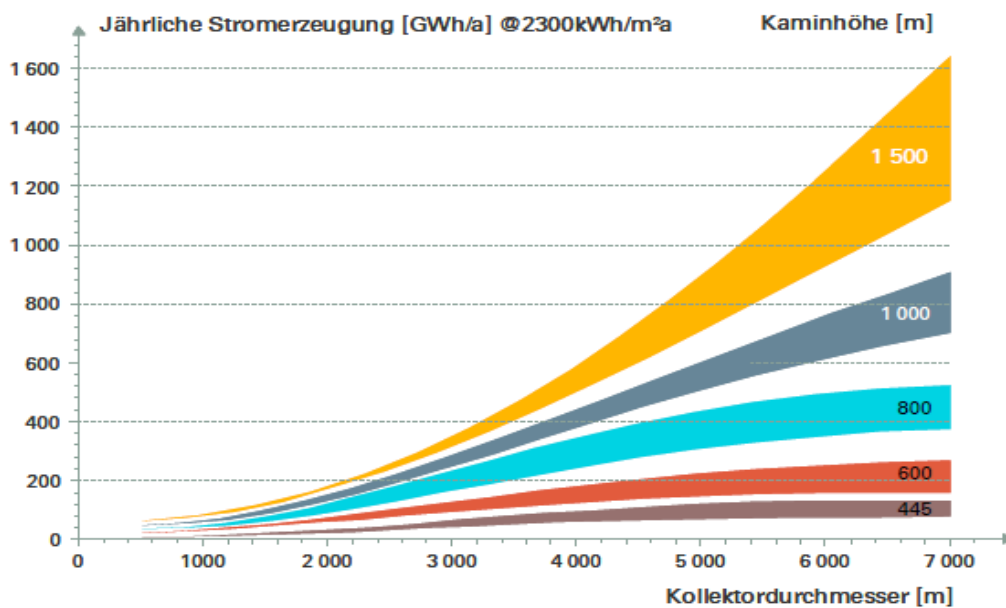
Die Funktionsweise ist sehr einfach. Die Sonne scheint durch ein großes Glas- oder auch ein lichtdurchlässiges Kunststoffdach (Kollektor) und heizt Boden und die Luft darunter wie in einem Treibhaus auf. Die warme Luft steigt nach oben und strömt unter dem Glasdach zu einem Kamin in der Mitte der Anlage. Es entsteht ein Aufwind (Thermik), der mit Hilfe von Turbinen in elektrischen Strom umgewandelt wird.

Es können entweder Horizontalachsenturbinen, die ringförmig am Fuße des Turms, also an der Übergangsstelle vom Kollektor zum Turm auf dem Boden, verwendet werden (geplant beim Mildura-Projekt) oder (wie in Spanien) die Vertikalachsenturbine am unteren Ende der Turmröhre (siehe Zeichnung).

Abgesehen von der Intensität der Sonnenstrahlung hängt die Leistung eines solchen Elektrizitätswerks von zwei Faktoren ab: der Kollektorfläche und der Kaminhöhe. Je größer die überdachte Fläche ist, desto mehr



erwärmt und desto schneller steigt die Luft im Kamin auf (bei gleich bleibendem Kamindurchmesser), und je höher der Kamin ist, desto größer ist der Druckunterschied zum Boden und desto schneller steigt die Luft im Kamin auf (Kamineffekt). Daher führen sowohl eine Vergrößerung der Kollektorfläche als auch der Kaminhöhe zu einer größeren Leistung der Anlage. Ein Aufwindkraftwerk mit einer Leistung von 200 MW benötigt einen Kollektor von 8 km Durchmesser und einen 1000 m hohen Kamin. Derartig große Kraftwerke erfordern jedoch auch hohe Investitionen zum Bau. Die Rentabilität steigt mit der Größe. Während des Betriebes fallen nur Wartungskosten an.



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

Wirkungsgrad/Ertrag

Allgemein besitzt die Thermik in der Natur nur eine geringe Energiedichte. Der Grund liegt im relativ zu anderen thermischen Kraftwerken geringen Temperatur- bzw. Druckgradienten, der den Luftstrom antreibt. Aus diesem Grund ist der auf die von der Sonne eingestrahlte Energie bezogene Wirkungsgrad selbst bei 1000 m Turmhöhe mit ca. 1 % sehr gering. In Thermikkraftwerken wird diese Energie im Kamin gebündelt und durch Antrieb eines, auch mehrerer Rotoren genutzt. Der Wirkungsgrad des Luftstromes (Strömungsleistung/ Leistung an der Welle des Rotors), die den Elektrogenerator treibt, ist dagegen bei einem optimalen Rotor mit max. 59,3 % sehr hoch Betzchen Gesetz. Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich aus 1% und 59,3 % zu lediglich 0,6%. Eine wirtschaftliche Nutzung ist somit kaum möglich und nur in Gebieten mit starker Sonneneinstrahlung denkbar, wo zudem der relativ große Flächenbedarf keine Rolle spielt.

Die Sonnenenergie strahlt zwar mehr als das 10.000-fache Weltenergiebedarfes von 2006 ein, jedoch besteht bei einem Gesamtwirkungsgrad von bestenfalls 0,6% keine Chance, dass sich diese Nutzungsform durchsetzt. Die relativ große zu überbauende Fläche der Thermikkraftwerke und die relativ hohen Baukosten bedingen dies. Vergleiche: Hierbei sind sogar die relativ hohen Stromerzeugungskosten aus Photovoltaikanlagen, die Wirkungsgrade um 15 % erreichen mit 42 Cent/ kWh sehr günstig. Konkurrenzlos günstig ist hierbei Strom aus Land- und Seewind, wo Strom in beiden Fällen zu 4,6 Cent/ kWh erzeugt wird - laut Universität Kassel. Das real umsetzbare elektrische Windpotenzial ist laut der Stanford University jährlich das 40 fache des Weltstromverbrauches von 2006, wenn nur an leicht zugänglichen Stellen Windkraftanlagen erstellt werden.

Thermikkraftwerke können auch nachts elektrische Energie erzeugen, da sich der Boden tagsüber erwärmt. In der Nacht gibt er diese Wärmeenergie wieder ab und kann weiter Luft unter dem Kollektor erwärmen. Wegen der sich gleichzeitig abkühlenden Umgebungsluft entsteht immer noch genügend Auftrieb, um das Kraftwerk zu betreiben. Dabei sinkt die Gesamtleistung, sowie der Wirkungsgrad (Wärmemenge/ Strömungsenergie) von ca. 1% nochmals ab, z.B. auf 0,7. Der Gesamtwirkungsgrad liegt dann nur noch bei ca. 0,3%. Zur Verbesserung können thermische Speicherelemente, beispielsweise geschlossene wassergefüllte Behälter, die mehr Wärme als der Boden speichern können, unter dem Kollektor angebracht werden.

Modifikationen

Louis Michaud forscht an einer besonderen Bauart des Kamins mit dem Namen "Atmospheric Vortex Engine" ("Atmosphärischer Wirbel-Motor"). Dieser hat mit 100 m Höhe und 200 m Durchmesser einen vergleichsweise niedrigen Kamin, der bei Zugabe von Wasserdampf einen Tornado-ähnlichen Wirbel erzeugt. Dieser ist stationär über dem Kamin gebunden und kann durch Vorrichtungen am Kamin gesteuert werden. Der Wirbel wirkt wie ein besonders hoher Kamin der bis in die Tropopause reichen kann. Bei günstigen klimatischen Bedingungen (warme und feuchte Luft) ist auch kein Treibhaus nötig. Laut Michaud können 50 bis 500 MW Leistung erzeugt werden.

Als Wärmequelle muss nicht ein Treibhaus dienen. Es könnte auch die Abwärme eines konventionellen Kraftwerkes genutzt werden. Z.B. könnte mit einer Atmospheric Vortex Engine der Wirkungsgrad eines Wärmekraftwerkes um bis zu 20% erhöht werden.

Eine ähnliche Technologie stellt das Fallwindkraftwerk dar, das ohne Kollektor auskommt und in küstennahen Gebieten besonders wirtschaftlich arbeiten soll.

Thermikkraftwerke müssen für einen effizienten Betrieb sowohl im Kollektorradius als auch in der Kaminhöhe eine entsprechende Größenordnung aufweisen. Dies hat einen großen Landschaftsverbrauch zur Folge. Die Fläche unter der Überdachung steht jedoch zum Großteil für eine weitere Nutzung zur Verfügung. So wird vorgeschlagen, die riesigen Unterglasflächen mit hitzebedürftigen Pflanzen, z.B. tropischen Obst- und Gemüsekulturen, Kaffee-, Kakao- oder Teepflanzungen zu unterpflanzen, wobei bei maschineller Bearbeitung sorgfältig auf die Stützenkonstruktion der Überdachung zu achten wäre. Ein positiver Nebeneffekt wäre die verbesserte Luftqualität infolge der Kohlenstoffdioxid-Fixierung in der Biomasse der Pflanzen.

Es gibt bislang keine Studien zur großtechnischen Anwendung von Thermikkraftwerken, z.B. könnte der Bau von einigen hundert solcher Anlagen die natürlichen Luftschichtungen verändern, mit potenziellen Folgen für das Klima. Andererseits ist das natürliche Vorkommen von Thermik voll integrierter Teil des Wettergeschehens und Klimaprozesses, so dass sich kaum negative Folgen einstellen dürften.

Aktuelle Projekte

Das erste kommerzielle Kraftwerk, das Thermikkraftwerk Buronga, soll in Australien, nahe Mildura errichtet werden. Die Bauarbeiten hätten 2005 beginnen sollen. Tatsächlich laufen noch Vorbereitungen – die Inbetriebnahme soll 2010 erfolgen. Der Kamin wird 1000 m hoch sein, einen Durchmesser von 130 m haben und von einem 38 km² großen Kollektor (7 km Durchmesser) umgeben sein. Die Maximalleistung beträgt 200MW.

Aussichten

Desertec

Die Desertec Foundation ist eine Initiative, die sich für die Übertragung von in Wüstenregionen erzeugtem Solar- und Windstrom nach Europa einsetzt.

Konzept

Das Desertec-Konzept sieht vor, im Nahen Osten (engl. Middle East) und Nord-Afrika (zusammen MENA) mithilfe von solarthermischen Kraftwerken, eventuell auch Photovoltaik und Windparks die Stromerzeugung und eventuell Wasserentsalzung voranzutreiben und den sauberen Strom dann mittels HVDC-Leitungen (High Voltage Direct Current = Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, HGÜ) in diese Länder und ab 2020 (mit insgesamt 10–15 % Übertragungsverlust) bis nach Europa zu leiten.

Da in MENA doppelt so viel Solarenergie gewonnen werden kann wie mit den gleichen Anlagen im nördlicher liegenden Südeuropa, ist Solarstrom aus den Wüsten dank der relativ geringen Übertragungsverluste von insgesamt 10–15 % wirtschaftlich im Vorteil. Die Hochspannungs-Gleichstromübertragung ist hier wesentlich effizienter als Produktion, Transport und erneute Verstromung von Wasserstoff, wie in früheren Konzepten betrachtet.

Solarthermische Kraftwerke werden im Desertec-Konzept deswegen bevorzugt, weil sie 24 Stunden am Tag Strom nach Bedarf liefern können. Photovoltaik ist teurer und benötigt teure Speicher, wie zum Beispiel Pumpspeicherkraftwerke. Müsste man europäische Pumpspeicher mit großen Mengen an fluktuierenden

Stromquellen aus MENA speisen, bräuchte man mehr Leitungen, die nur wenige Stunden am Tag ausgelastet würden.

HGÜ-Leitungen mit Kapazitäten bis 3 GW werden von ABB und Siemens seit vielen Jahren über weite Strecken gebaut.

Aufgrund der höheren Sonneneinstrahlung lassen sich Stromabnahmeverträge an guten Standorten in Amerika oder MENA bereits günstiger realisieren. Werden solarthermische Kraftwerke in den nächsten Jahrzehnten im großen Stil gebaut, ist nach Berechnungen des DLR eine Senkung der Erzeugungskosten auf bis zu 4–5 Eurocent/kWh möglich. Da die Rohstoffpreise für solarthermische Kraftwerke derzeit schwächer steigen als die Preise fossiler Brennstoffe, könnte CSP trotz höherer Kosten bereits früher als errechnet konkurrenzfähig sein. Derzeit verhindern jedoch noch begrenzte Produktionskapazitäten bei weltweit stark steigender Nachfrage sinkende Preise.

Kritik

Das Großprojekt wird kontrovers diskutiert und hat neben zahlreichen Befürwortern auch Kritiker. Einige Kritiker argumentieren, dass der Import von Strom mit einem politischen Risiko behaftet sei, sobald der Anteil einen gewissen Prozentsatz übersteige. Die Energieversorgung eines Staates aus externen Quellen berge die Gefahr politischer Abhängigkeit und – im Fall von Konflikten – Erpressbarkeit. Ferner würden die HGÜ-Verbindungen mögliche Ziele für Terroristen darstellen.