

# 4. KAPITEL: ENERGIEZUKUNFT ERNEUERBARE ENERGIE

## Die direkte Nutzung der Sonneneinstrahlung

### 5.3 Techniken zur Bereitstellung von solarem Strom

#### 5.3.1 Photovoltaik

**GESCHICHTE:** Der photoelektrische Effekt wurde bereits im Jahre 1839 vom französischen Physiker Alexandre Edmond Becquerel entdeckt. Die Entwicklung ging schleppend voran; erst der Einsatz in der Raumfahrt brachte den notwendigen Entwicklungssprung in Richtung des täglichen Einsatzes. 1958 flog der zweite Satellit der USA mit einer chemischen Batterie und Photovoltaikzellen zum Betrieb eines Senders an Bord ins All. Entgegen den Erwartungen der Militärs konnten die Signale des Senders noch bis Mai 1964 empfangen werden. Aufgrund der langen Messdauer konnte anhand der Flugbahn des kleinen Satelliten festgestellt werden, dass die Erde nicht exakt kugelförmig ist. Der Erfolg dieses Satelliten legte den Grundstein für die erste sinnvolle Verwendung der bis dahin noch nahezu unbekannt und vor allem sehr teuren Solarzellen.

Für viele Jahre wurden in der Folge Solarzellen vorwiegend für Raumfahrtzwecke weiterentwickelt, da sie sich als ideale Stromversorgung für Satelliten und Raumsonden (bis Marsentfernung von der Sonne, rund 230 Mio. km) erwiesen. Die dadurch gegenüber dem Batteriebetrieb verlängerte Nutzungsdauer der Raumflugkörper überwog den immer noch hohen Preis der Solarzellen bei weitem. Darüber hinaus sind Solarzellen billiger und risikoärmer als Radioisotopen-Generatoren, die ähnlich lange Einsatzzeiten erlauben. Die meisten Raumflugkörper wurden und werden daher zur Energieversorgung mit Solarzellen ausgestattet. Die Raumsonde Juno, die im August 2011 gestartet ist, soll erstmals sogar in einer Umlaufbahn um den Planeten Jupiter ihre Energie aus besonders effizienten und strahlungsresistenten Solarzellen beziehen. Fast alle der rund 1.000 Satelliten, die weltweit im Einsatz sind, erhalten ihre Stromversorgung anhand von Photovoltaik.

**PRÄSENTATION 84: Funktion der Photovoltaik (42 Folien)**



ABBILDUNG 251: Raumstation ISS, 120 kW aus 4.500m<sup>2</sup> Solarzellenfläche  
BILD: NASA

**TECHNOLOGIE:** Das Prinzip der Photovoltaik ist einfach erklärt: Solarzellen wandeln die Sonnenstrahlen direkt in elektrischen Strom um. Nach Installation der Solarzellen fließt der aus Sonnenkraft gewonnene Strom bei minimalem Betreuungsaufwand umweltfreundlich für mindestens die nächsten 25 Jahre vom Dach, wodurch man zum eigenen Stromversorger werden kann. Solarzellen bestehen vorwiegend aus dem Halbleitermetall Silizium, dem zweithäufigsten Element auf unserer Erde. Halbleiter sind Stoffe, die unter Zufuhr von Licht elektrisch leitfähig werden. Jede Zelle besteht aus einer positiv und negativ geladenen Schicht des Halbleitermaterials. Trifft das Sonnenlicht auf die Zelle, entsteht zwischen den Schichten eine elektrische Gleichspannung. Die aufgebaute Spannung wird über Metallkontakte an der Oberfläche der Solarzelle abgeführt. Es fließt elektrischer Gleichstrom – wie bei einer Batterie.

Die Sonne liefert uns jährlich mehr als das 10.000-fache der weltweit verbrauchten Energiemenge. Die Intensität, mit der wir die Sonnenenergie für die Stromproduktion nutzen können, ist je nach Region sehr unterschiedlich. In unseren Breiten erzeugt eine Photovoltaik-Anlage auf einer Fläche von 10 m<sup>2</sup> ungefähr 1.000 kWh Strom pro Jahr. Eine Fläche von 65 m<sup>2</sup> ist ausreichend, um in etwa den jährlichen Strom- und Mobilitätsbedarf eines österreichischen Haushaltes zu decken.

**LEISTUNG:** Die Leistung von Solarmodulen wird in Watt peak (Wp) oder Kilowatt peak (kWp) angegeben. Der Index „p“ definiert einen Spitzenwert unter standardisierten Testbedingungen im Prüflabor: Einstrahlung 1.000 Watt/m<sup>2</sup>, Zelltemperatur 25 °C und Luftmasse (AM) 1,5. Die Laborbedingungen sind am Dach nur an bestimmten Tagen pro Jahr anzutreffen, sodass die angegebene Spitzenleistung der Solarmodule in der Praxis nur selten erreicht wird. Wer wissen möchte, wie hoch die tatsächliche Ertragskraft seiner Photovoltaik-Anlage ist, muss den spezifischen

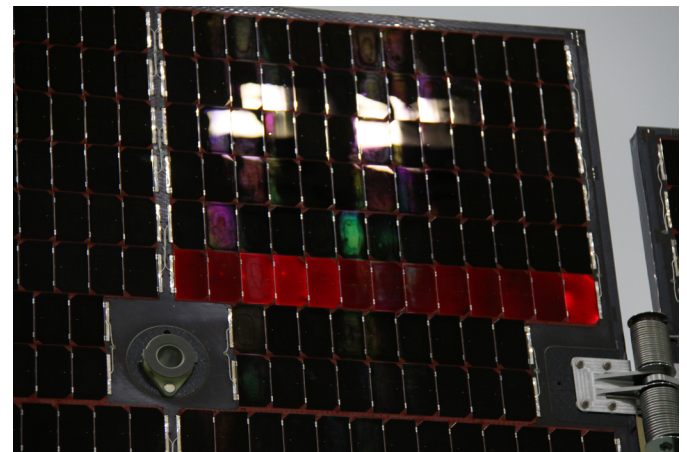


ABBILDUNG 252: Solarpanel der Raumsonde Juno, die sich auf dem Weg zum Planeten Jupiter befindet - BILD: NASA

# 4. KAPITEL: ENERGIEZUKUNFT ERNEUERBARE ENERGIE

## Die direkte Nutzung der Sonneneinstrahlung

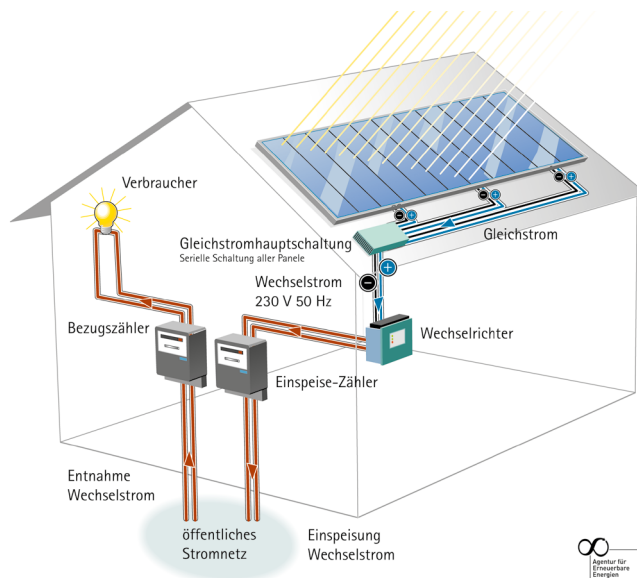
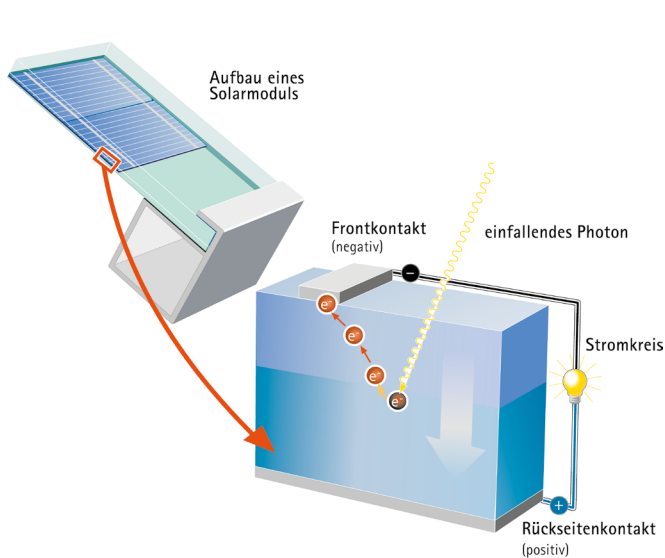


ABBILDUNG 253: Schema einer privaten PV-Anlage - QUELLE: Agentur für Erneuerbare Energie: [www.unendlich-viel-energie.de](http://www.unendlich-viel-energie.de)

Stromertrag mithilfe eines Simulationsprogrammes ermitteln. Dieser wird in kWh/kWp angegeben und gibt Auskunft über die Strommenge, die 1 kWp unter realen klimatologischen Bedingungen vor Ort erzeugt.

**AUFBAU:** Eine Photovoltaik-Anlage besteht aus Solarmodulen, Wechselrichtern sowie Zähl- und Sicherheitseinrichtungen zur elektrischen Absicherung vor Blitzen und Überspannung. Die Solarmodule werden auf einer stabilen Unterkonstruktion befestigt und elektrisch miteinander verbunden. Der von den Solarzellen in den Solarmodulen produzierte Gleichstrom wird über die Verkabelung gesammelt, in Batterien gespeichert und zum Wechselrichter geleitet. Dieser wandelt den Gleichstrom in netzkonformen Wechselstrom um. Der Wechselrichter ist das Herz und Hirn der Photovoltaik-Anlage, indem er bei ständig schwankenden Einstrahlungsverhältnissen den optimalen Arbeitspunkt sucht. Ein Wechselrichter mit schlechtem Wirkungsgrad macht die Leistung der besten Solarmodule zunichte.

**NUTZUNG DES SONNENSSTROMS:** Grundsätzlich unterscheidet man zwischen netzgekoppelten Anlagen und Inselanlagen. Netzgekoppelte Anlagen sind mit dem örtlichen Stromnetz verbunden, während Inselanlagen völlig autark betrieben werden. Inselanlagen kommen in netzfernen Objekten wie z. B. Berghütten, Parkscheinautomaten, Weidezaungeräten oder bei mobilen Bewässerungssystemen zur Anwendung. Ihre Planung und Ausführung ist ungleich schwieriger als bei netzgekoppelten Anlagen.

Ein Batterie-System gleicht die Schwankungen zwischen Stromangebot und Stromnachfrage aus. Netzgekoppelte Systeme unterscheiden sich in Anlagen zur Voll- und Überschusseinspeisung. Bei der Volleinspeisung wird der gesamte produzierte Sonnenstrom in das öffentliche Netz eingespeist. Wird der Sonnenstrom hingegen zuerst direkt im eigenen Betrieb genutzt, spricht man von einer Überschusseinspeisung. Nur der nicht selbst benötigte Strom – der Überschuss – wird in diesem Fall in das Netz abgegeben.

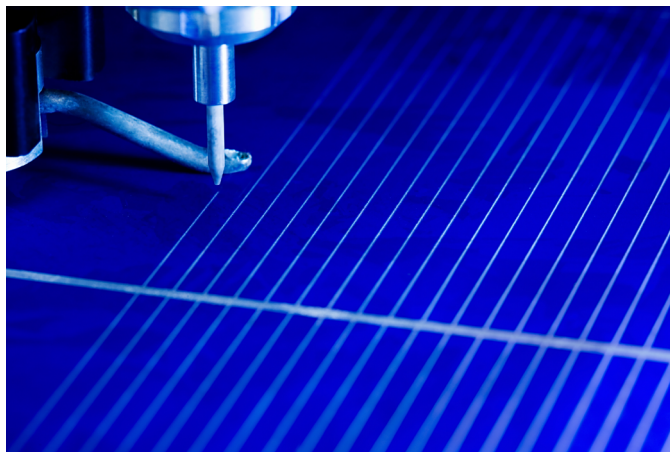


ABBILDUNG 254: Texturierung für die hochaufgelöste Abscheidung metallischer Leitfinger - BILD: IKTS Fraunhofer Gesellschaft

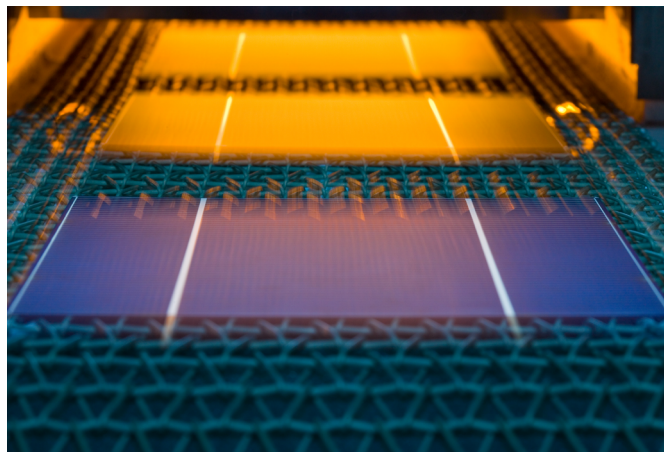


ABBILDUNG 255: Ultra-Fine-Line-Drucktechnologie mit anschließendem Druckpastainbrand als metallischer Leitfinger - BILD: IKTS Fraunhofer Gesellschaft

# 4. KAPITEL: ENERGIEZUKUNFT ERNEUERBARE ENERGIE

## Die direkte Nutzung der Sonneneinstrahlung



ABBILDUNG 256: 2013 größter PV-Park der Welt mit 290 MW Leistung auf 970 Hektar in Arizona, USA - BILD: Solarwatt, NRG Energy

In Photovoltaik-Anlagen werden Module einzeln in Serie geschaltet. Ein Modul leistet üblicherweise etwa 200 Watt. Strom aus Photovoltaik kommt dezentral aus kleinen Anlagen mit einer Leistung bis 20 kW. Zentrale Stromerzeugung durch Photovoltaik erfolgt z. B. in Anlagen wie dem Solarpark Waldpolenz bei Leipzig/Deutschland, der auf einem alten Militärflughafen errichtet worden ist. Hier werden 700.000 Module auf einer Fläche von 220 Hektar vereint. Dieses Solarkraftwerk leistet 52 MW und versorgt 20.000 deutsche Haushalte mit Strom.

Modultyp	Dachfläche für 1 kWp	Modulwirkungsgrad
Monokristalline Module	5-8 m <sup>2</sup>	16-20 %
Polykristalline Module	6-9 m <sup>2</sup>	12-16 %
Amorphe Siliziummodule	12-24 m <sup>2</sup>	6-8 %
CIS-Module	9-11 m <sup>2</sup>	8-10 %
CedT-Module	9-13 m <sup>2</sup>	7-9 %

ABBILDUNG 258: Eigenschaften von Solarmodulen - QUELLE: LK Steiermark

Der weltweit größte Photovoltaik-Park ist Agua Caliente in Arizona, USA. Seit ihrer Fertigstellung im Mai 2014 verfügt die Anlage über eine Leistung von 290 MW. 5.200.000 Module können den Strombedarf von 100.000 US-amerikanischen Haushalten decken. Das führt zu einer jährlichen CO<sub>2</sub>-Reduktion

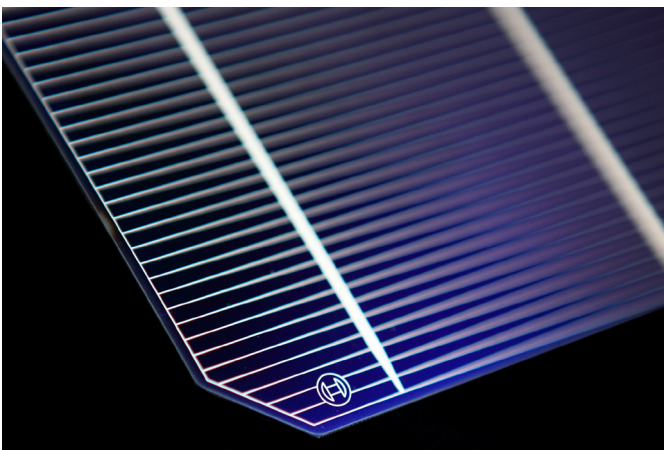


ABBILDUNG 259: Monokristalline Solarzelle - BILD: BOSCH Pressebilder

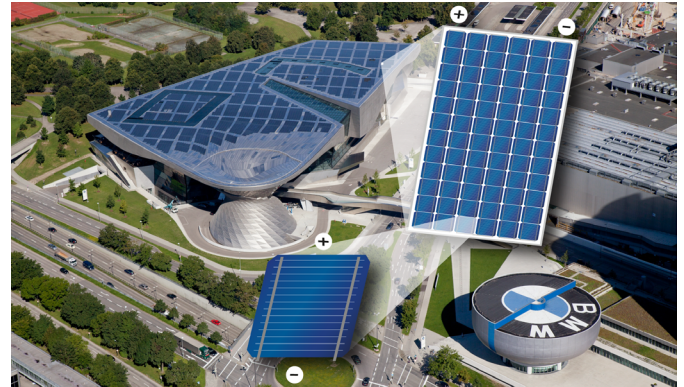


ABBILDUNG 257: PV-Anlage BMW in München. Solarstrings bestehen aus Solarmodulen die sich aus einzelnen Solarzellen zusammensetzen - BILD: Solarwatt

von 220.000 Tonnen (entspricht jährlicher CO<sub>2</sub>-Belastung durch 40.000 Fahrzeuge).

### PRÄSENTATION 85: Die größten Solarparks (8 Folien)

**SOLARZELLEN UND SOLARMODULE:** Die im Inneren eines Solarmoduls bläulich bis schwarz schimmernden Solarzellen sind die eigentlichen Stromproduktionsmaschinen. Die hauchdünnen Zellen sind extrem bruch- und feuchtigkeitsempfindlich und müssen im Solarmodul bestmöglich über Jahrzehnte vor Wind und Wetter geschützt werden. Die Leistungsfähigkeit eines Solarmoduls wird von der Anzahl der Zellen sowie deren Zelltyp bestimmt, wobei mehrere elektrisch verschaltete Module einen Modulstring bilden. Die einzelnen Strings werden mit dem Wechselrichter verbunden. Die Anzahl der Solarmodule im String sowie die Menge an Strings ergeben sich aus dem Anlagenkonzept und den Vorgaben des Modul- und Wechselrichterherstellers.

**MODULARTEN AM MARKT:** Es gibt verschiedene Modul-Technologien, die sich hinsichtlich Verwendungszweck und Wirkungsgrad voneinander unterscheiden. Die größte Bedeutung kommt den kristallinen Modulen zu. Darüber hinaus wird an einer Vielzahl organischer Zellen und Farbstoffzellen geforscht, die in den nächsten Jahren auf den Markt kommen sollen und



ABBILDUNG 260: Struktur von polykristallinem Silizium - BILD: Armin Kübelbeck

# 4. KAPITEL: ENERGIEZUKUNFT ERNEUERBARE ENERGIE

## Die direkte Nutzung der Sonneneinstrahlung

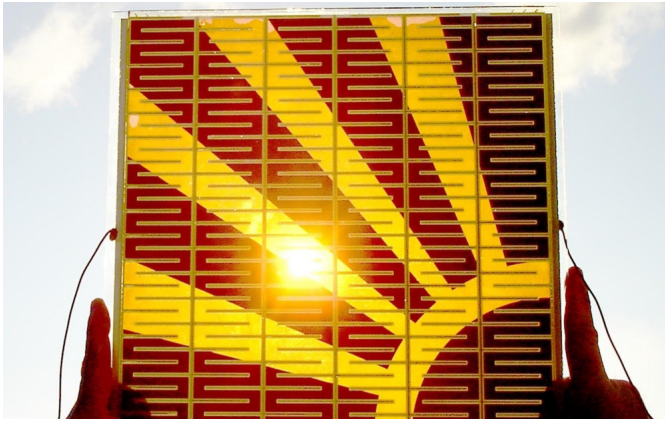


ABBILDUNG 261: PV-Farbstoffzelle - BILD: ISE Fraunhofer

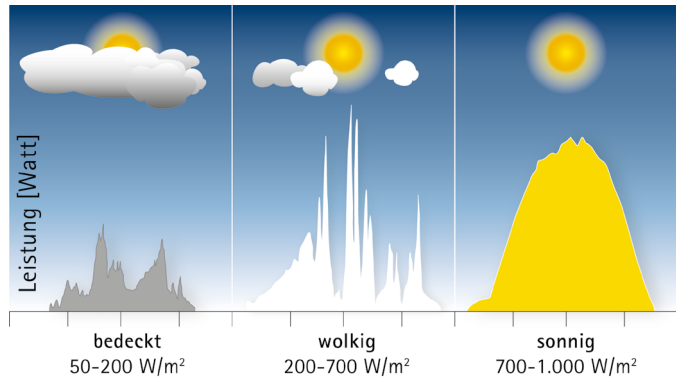


ABBILDUNG 262: Stromproduktion in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung - QUELLE: LK Steiermark

hohe Kostensenkungspotenziale versprechen. Monokristalline Module besitzen den höchsten Wirkungsgrad und damit den geringsten Flächenbedarf pro kWp installierter Leistung. Die Zellen bestehen aus einem einzigen Siliziumkristall mit regelmäßiger Gitterstruktur. Erkennungsmerkmal ist die einheitliche, meist dunkelblaue bis schwarze Farbgebung. Polykristalline Module stellen den am häufigsten verwendeten Modultyp dar. Die Zellen bestehen aus mehreren Kristallen und haben einen um rund 2 % geringeren Wirkungsgrad als monokristalline Zellen. Dieser Nachteil wird jedoch durch die günstigeren Herstellungskosten kompensiert. Die ungleichmäßige Siliziumstruktur lässt die Zellen meist bläulich bis eisblumenähnlich in der Sonne schimmern. Bei der Dünnschichttechnik wird der Halbleiter als hauchdünne Schicht auf Glas, Kunststoff oder Metallfolien aufgebracht. Je nach verwendetem Halbleitermaterial gibt es drei verschiedene Technologien: amorphes Silizium, Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) und Cadmiumtellurid (CdTe). Der Wirkungsgrad ist deutlich geringer als bei der kristallinen Technik, wodurch bei gleicher Leistung wesentlich mehr Dachfläche benötigt wird.

**WAHL DER TECHNOLOGIE:** Bei mehr als 90 % der verbauten Module handelt es sich um kristalline Module. Mono- und polykristalline Module unterscheiden sich nur geringfügig in ihrer Leistung. Die Wahl ist oftmals reine Geschmackssache. Monokristalline Module finden sich bevorzugt auf Dachflächen, auf denen eine maximale Leistung bei geringem Platzangebot

montiert werden muss oder das optische Erscheinungsbild im Vordergrund steht. Mit den dunkelschwarzen Modulen lassen sich ästhetisch anspruchsvollere Projekte verwirklichen. Dünnschichtmodule brauchen mehr Platz, nutzen aber diffuses Licht besser aus und sind weniger empfindlich gegen Verschattungen. Dank dieser Eigenschaften wird die Technik bei Standorten mit hoher Verschattung sowie geringer Sonneneinstrahlung verwendet, wie z. B. Fassadenflächen oder flachen Nord-Dächern.

**ERTRAG:** Solarzellen erzeugen Strom aus dem einfallenden Sonnenlicht. Dieses schwankt aber nach Jahreszeit und Wetter. Die produzierte Strommenge ergibt sich aus der Intensität und Dauer der eintreffenden Sonneneinstrahlung. Solarzellen wandeln direktes und diffuses Sonnenlicht in Strom um. Daher verrichtet die Photovoltaik-Anlage ihre Arbeit nicht nur bei klarem Himmel, sondern auch bei Regen, Nebel und starker Bewölkung. Das Schwachlichtverhalten eines Solarmoduls gibt Auskunft darüber, wie viel Strom es bei Dämmerung, Bewölkung oder Nebel produziert. Für Österreich kommt dem Schwachlichtverhalten besondere Bedeutung zu, da 60 % der jährlichen Sonneneinstrahlung aus diffusem Licht bestehen. Der Stromertrag an einem wolkenlosen Sommertag ist aber 20-mal höher als an einem bedeckten Wintertag. Innerhalb eines Jahres werden 75 % des gesamten Stromertrags in den Monaten März bis September produziert. In den sonnenarmen Monaten von November bis Februar werden hingegen nur 10 % des Jahresstromertrags erzeugt.

### 5.3.2 Concentrated Solar Power (CSP): Technologien der solaren Stromerzeugung

In den letzten Jahrzehnten hat sich neben der Photovoltaik auch die Technik zur Stromerzeugung aus solarer Wärme entwickelt. Die gängigen Techniken sollen hier beschrieben werden.

Für diese Kraftwerkstypen eignen sich nur Standorte mit einer Einstrahlung ab 2.000 kWh pro Quadratmeter und Jahr, wie beispielsweise in Spanien. Will man höhere Temperaturen erreichen, um wie bei einem konventionellen Kraftwerk mit Dampfturbinen Strom zu erzeugen, so muss die Sonnenenergie konzentriert werden. Dies geschieht durch Spiegel oder Linsen, durch welche die Sonnenstrahlen auf einen Absorber oder Receiver gelenkt wer-

den. Die dabei erzeugten Temperaturen können weit über 1.000 °C betragen. Solarkraftwerke, die Sonnenstrahlen konzentrieren, werden Concentrated-Solar-Power (CSP)-Kraftwerke genannt. Bei Rinnenkraftwerken wird die Sonnenstrahlung durch gebogene Spiegel in einem Absorberrohr konzentriert, das sich im Brennpunkt des Spiegels befindet. Die am meisten verbreitete Form ist die der Parabolrinnen. Die Rinnen sind entlang der Nord-Süd-Achse ausgerichtet und können von Osten nach Westen dem Sonnenstand nachgeführt werden. Das Trägermedium ist meist ein spezielles Thermoöl oder ein Salzgemisch. Es strömt durch die Absorberröhren und wird auf etwa 400 °C erhitzt. Mit-