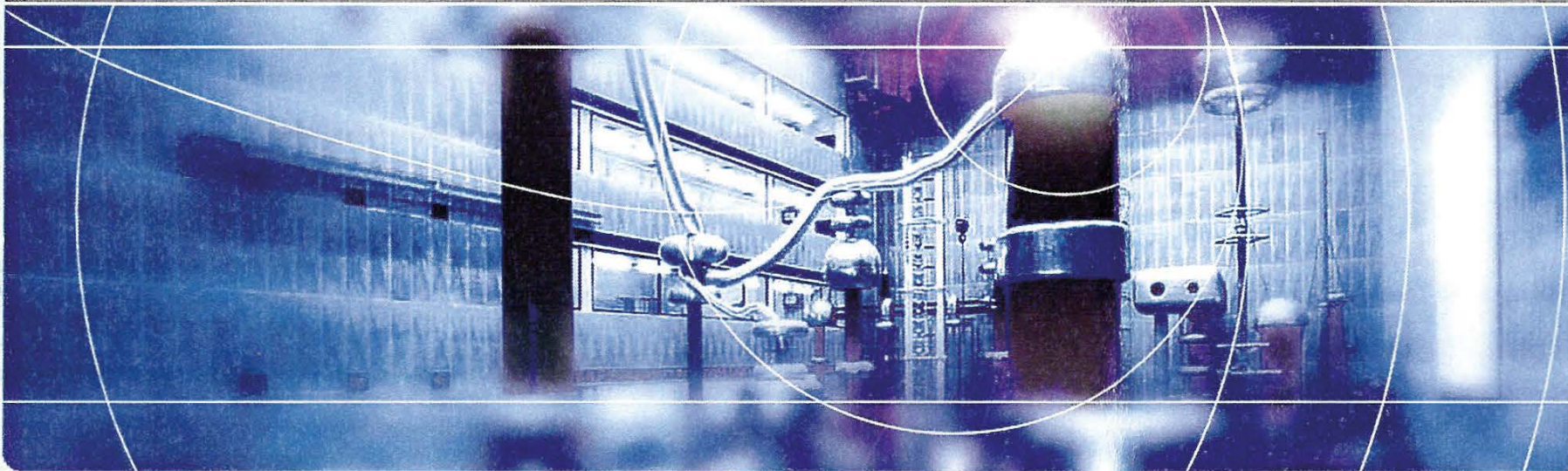


Erzeugung elektrischer Energie

Dr.-Ing. Bernd Hoferer

INSTITUT FÜR ELEKTROENERGIESYSTEME UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK (IEH)



Indirekte Nutzung der Sonnenenergie:

- Wasserkraftwerke
- Windenergieanlagen
- Biomasseanlagen

Solarkonstante:

$$S = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

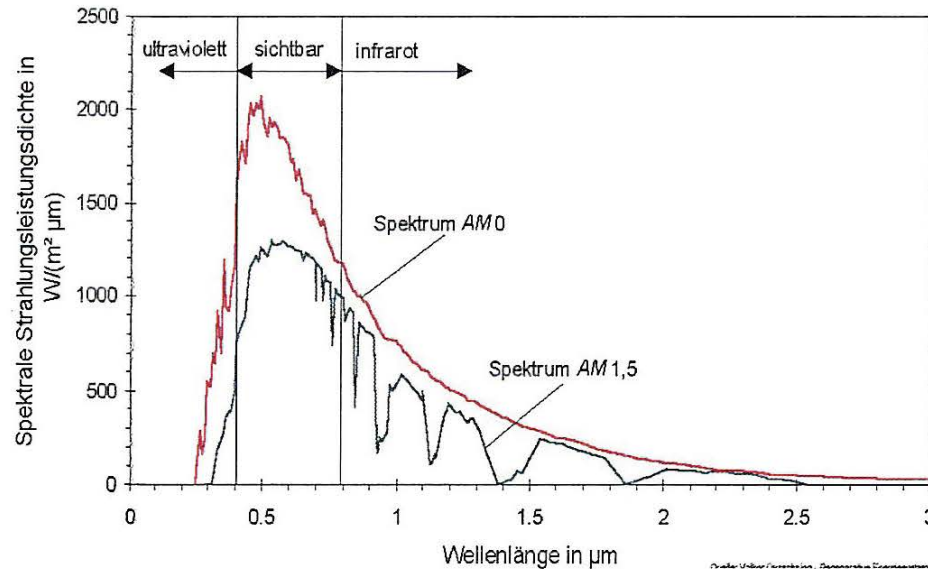
Direkte Nutzung der Sonnenenergie:

- Photovoltaikanlagen
- solarthermische Anlagen

Eingestrahlte Sonnenenergie: direkte Strahlung
reflektierte (diffuse) Strahlung } Globalstrahlung (50 %)
Reflexionen an Wolken, Luft, Oberflächen (30 %)
Absorption durch Wolken, Staub, Ozon (20 %)

In Deutschland: mittlere Jahressumme der Globalstrahlung: 1000 kWh/(m²·a)
im Sommer: 5-fache Einstrahlung im Vergleich zum Winter
durchschnittliche Sonnenstunden (d. h. >0,2kW/m²) pro Jahr: 1300 – 1900 h
Anteil der diffusen Strahlung an der Globalstrahlung ca. 60 – 70 %

Spektrum des eingestrahlteten Sonnenlichts



Spektrum des eingestrahlteten Sonnenlichts

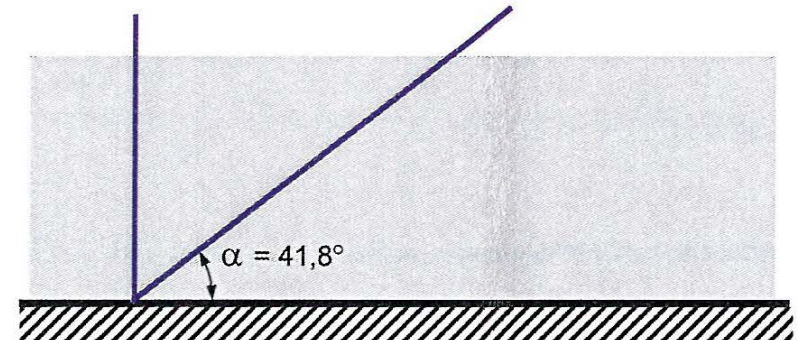
$$AM = \frac{1}{\sin \alpha}$$

AM 0
(Weltall)

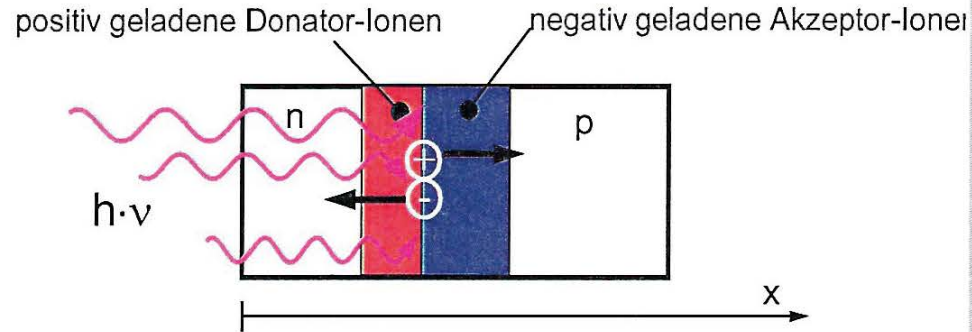
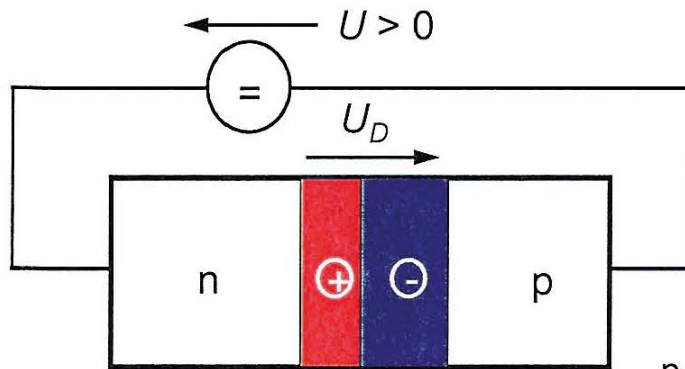


AM 1

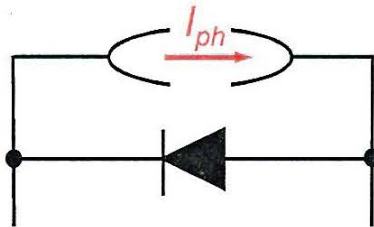
AM 1,5



Solarzellen: Ersatzschaltbilder

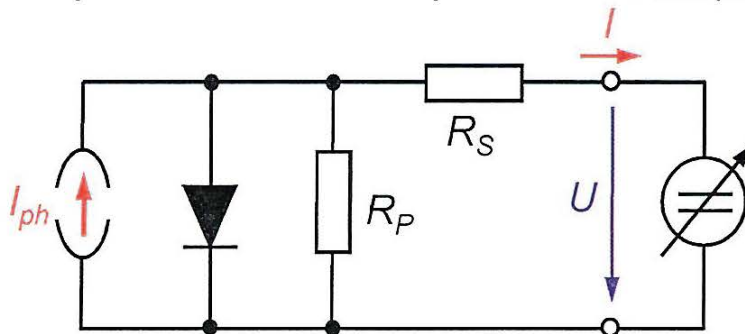


n-Gebiet: dotiert mit 5-wertigen Atomen, dadurch Elektronenüberschuss
p-Gebiet: dotiert mit 3-wertigen Atomen, dadurch Löcherüberschuss

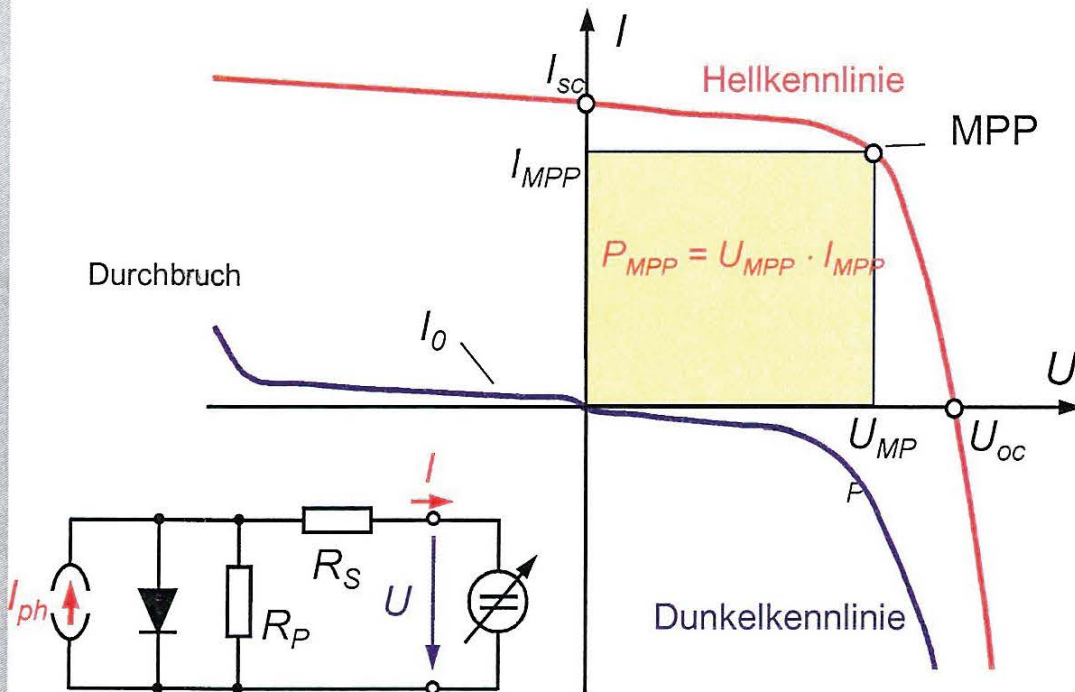


In der RLZ rekombinieren Löcher und Elektronen und es bleiben

- Donator-Ionen, denen ein Elektron fehlt
- Akzeptor-Ionen, denen ein Loch fehlt.



I_{ph} modelliert die Erzeugung von Ladungsträgern,
die Diode repräsentiert den pn-Übergang
 R_S durch Widerstände der Kontaktbahnen
 R_P durch ungleiches Aufwachsen der Kristalle
bei Dünnschichtsolarzellen
„Durchkontaktierungen“



Leerlaufspannung

$$U_{oc} = \frac{AkT}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \approx \frac{AkT}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right)$$

ohne R_p und R_s

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{e \cdot U}{AkT}} - 1\right)$$

mit R_p und R_s

$$I = \frac{R_p}{R_p + R_s} \cdot \left[I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{e \cdot (U + R_s \cdot I)}{AkT}} - 1\right) - \frac{U}{R_p} \right]$$

Füllfaktor und Wirkungsgrad

$$FF = \frac{P_{max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{U_{max} \cdot I_{max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} < 1$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_S} = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{P_S}$$

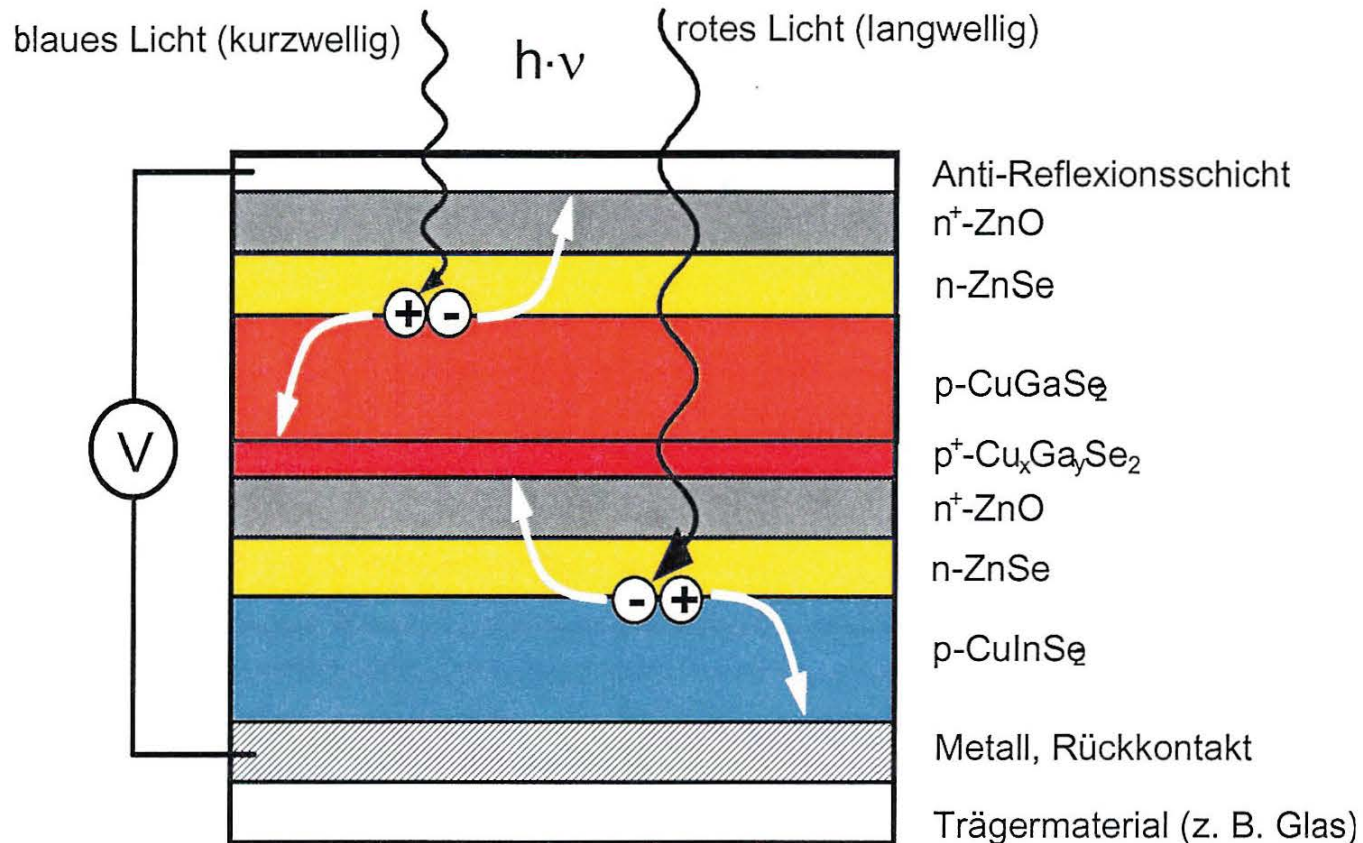
Konventionelle Solarzellen (Wafertechnologie)

- Monokristalline Zellen
 - hohe Wirkungsgrade (24% im Labor, bis 17% in der Massenfertigung), Grundstoff sind Wafer aus einkristallinem Silizium, Herstellprozeß teuer,
 - Technologie hat hohes Potential, Schichtdicken von heute 300 µm auf 70 µm reduzieren
- polykristalline Zellen
 - Silizium wird gegossen, beim Erkalten bilden sich unterschiedliche Kristallstrukturen, getrennt durch Korngrenzen $\Rightarrow$ Verluste $\Rightarrow$ geringerer Wirkungsgrad
 - Wirkungsgrade 18 % im Labor, 13-15% in der Massenfertigung

Dünnschichtsolarzellen

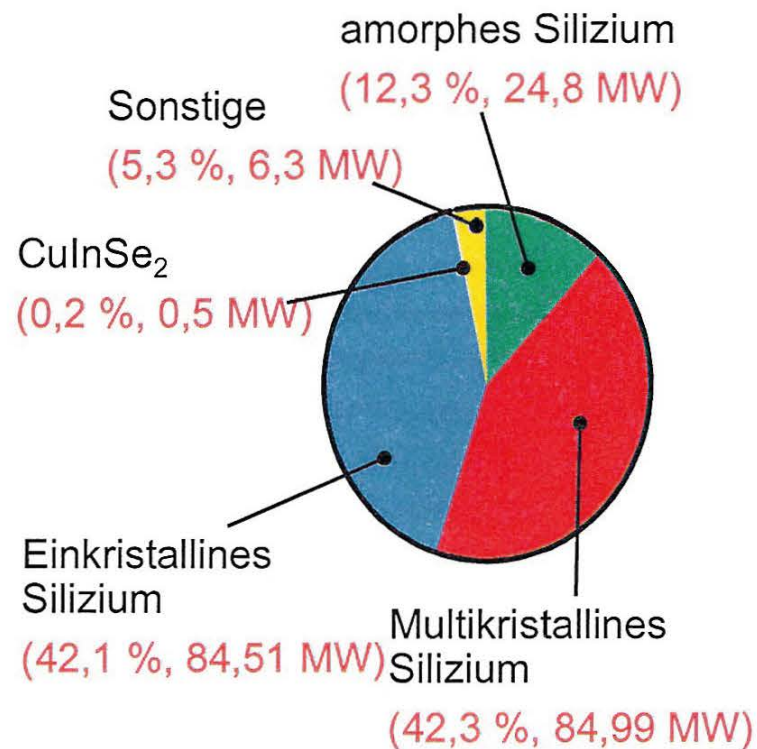
- amorphe Siliziumzellen
 - Silizium auf Glassubstrat aufgedampft, billig in der Herstellung, Degradation durch Sonnenlicht
 - Wirkungsgrade 13 % im Labor, 6-8% in der Massenfertigung
- Cu(In,Ga)Se_2
 - einfache Herstellung, 15-19 % im Labor
- CdTe hohe Modulwirkungsgrade (12%) bereits erzielt

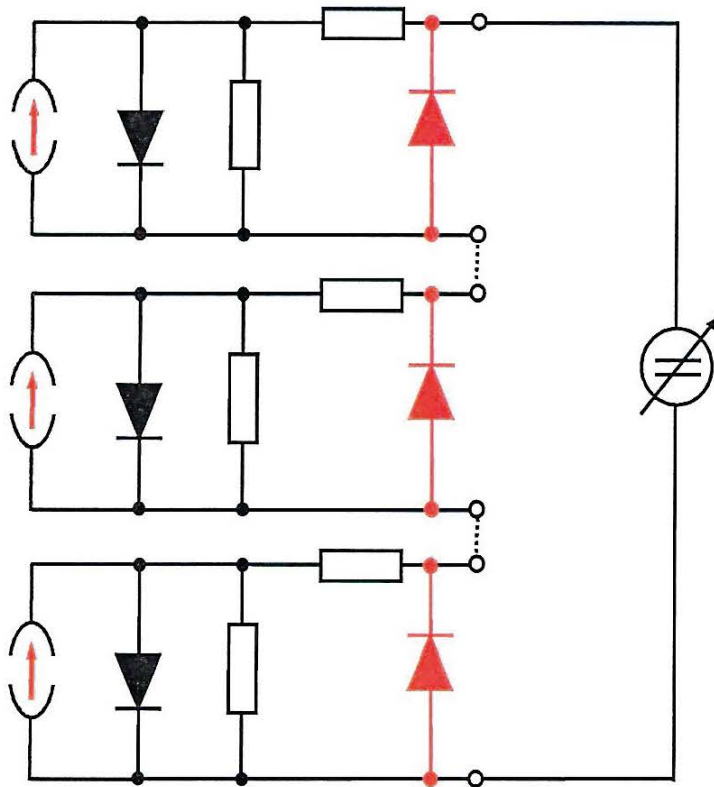
Tandem (Stapel)-Solarzellen: bessere Ausnutzung der Energie des Lichtes



- Photonen (Lichtquanten), deren Energie kleiner als der Bandabstand des Halbleitermaterial ist ($h \cdot \nu < E_g$), tragen nicht zur Ladungsträgererzeugung bei.
- Bei Photonen (Lichtquanten), deren Energie größer als der Bandabstand des Halbleitermaterials ist ($h \cdot \nu > E_g$), trägt die Überschussenergie ($h \cdot \nu - E_g$) zur Erwärmung der Zelle bei.
- Optische Verluste durch Abschattung durch Kontaktbahnen und Lichtreflexionen an der Zellenoberfläche.
- Ohmsche Verluste durch den Bahnwiderstand des Halbleitermaterialien und der Kontaktbahnen und Anschlußleitungen.
- Materialverunreinigungen, Oberflächeneffekte und Kristalldefekte.

Anteile der Solarzellenarten
an der Weltproduktion





Zusammenschaltung vieler Solarzellen zu Modulen durch Reihen-/Parallelschaltungen

Problem: Abschattung oder Ausfall einzelner Zellen bei Reihenschaltung, eine Zelle liefert einen reduzierten Strom, aufgrund der Reihenschaltung liefert dann das gesamte Modul diesen reduzierten Strom

Abhilfe: Diode antiparallel zu jeder größeren Einheit

Hauptbestandteile einer solarthermischen Anlage sind

- die Solarkollektoren (Flachkollektoren oder konzentrierende Kollektoren),
- der Wärmeträger und
- der Wärmespeicher.

Funktionsweise

Sonnenstrahlung wird absorbiert und erwärmt in den Rohren eine Wärmeträgerflüssigkeit. Die Wärmeträgerflüssigkeit überträgt die Wärmeenergie zu den Verbrauchern. Ein Wärmespeicher überbrückt die Zeiten mit geringer oder keiner Sonnenstrahlung.

Solarthermische Kraftwerke: Parabolrinnenkraftwerk

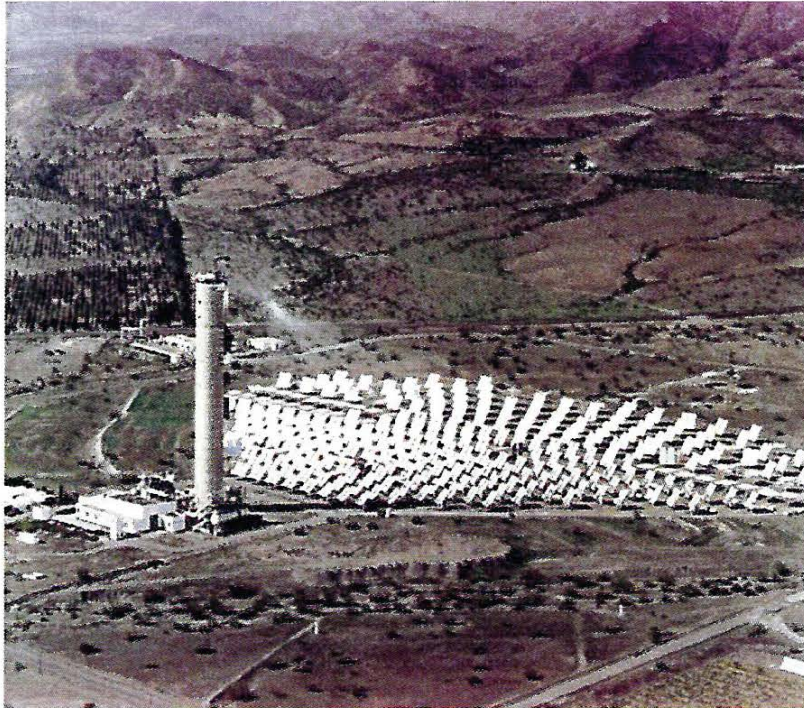


Große Spiegel konzentrieren die Sonnenstrahlung auf eine Brennlinie, 80-fache Konzentration des Lichtes auf das Absorberrohr, spezielles Thermoöl wird auf ca. 400 °C aufgeheizt

Kalifornien: 9 Anlagen speisen ca. 354 MW ins Netz

Pauschal gilt: 1km Parabolrinnenlänge ergibt 1MW elektrische Leistung

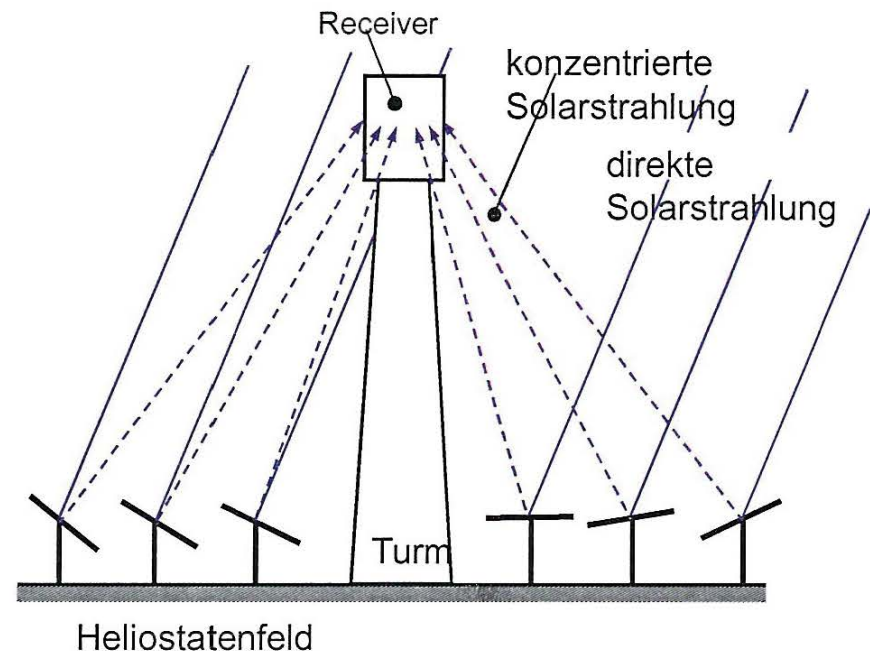
Solarthermische Kraftwerke: Turm-Solarkraftwerke



Sowohl Parabolrinnen- als auch Turmkraftwerk sind erprobt, bisher jedoch noch keine wesentliche Verbreitung, Hauptnachteil ist, daß nur sehr sonnenreiche Gegenden der Erde in Frage kommen

Ziel: konstante Dampfzustände

- dazu
- Wärmespeicher als Puffer
 - Zusatzfeuerung, z. B. mit einem fossilen Energieträger



Solarthermische Kraftwerke: Hybridkraftwerke

