

8. Solarthermische Kraftwerke

8.1 Einleitung

8.2 Konzentration solarer Strahlung

8.3 Grundlagen Wärmetransport

8.4 Absorberrohre

8.5 Parabolrinnenkraftwerke

8.5.1 Speicherung

8.6 Fresnel-Kollektor-Kraftwerke

8.7 Solare Turmkraftwerke

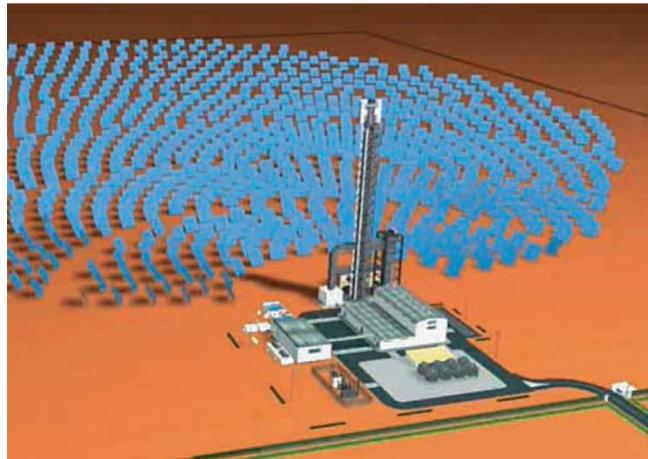
8.8 Dish-Stirling-Systeme

8.9 Aufwindkraftwerke

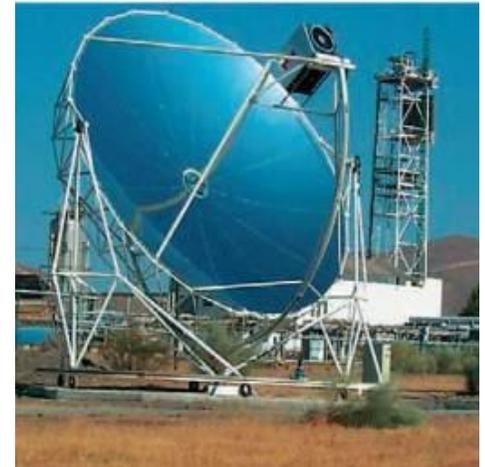
Parabolrinnensysteme



Solarturmkraftwerk



Dish-Stirling-Systeme



-für den effizienten Betrieb einer Wärmekraftmaschine sind Temperaturen $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ erforderlich

- alle solarthermischen Kraftwerke erfordern eine ausreichend starke direkte Sonneneinstrahlung und nachfolgende Konzentration (keine Nutzung der diffusen Strahlung)

- wirtschaftlicher Betrieb nur zwischen Äquator und 35 ° nördlicher (südlicher) Breite

SEGS: Impressionen ...

Solar Electric Generating System 1..9

SEGS: Eine Erfolgsgeschichte in
Südkalifornien



8.3
PV 2016

! SEGS Solar Electric Generating Systems



Parabolrinnenkollektoren konzentrieren die solare Strahlung und erzeugen Hochtemperaturwärme (400 °C). Das Foto zeigt einen Ausschnitt aus dem größten Solar kraftwerk der Welt in Kalifornien.

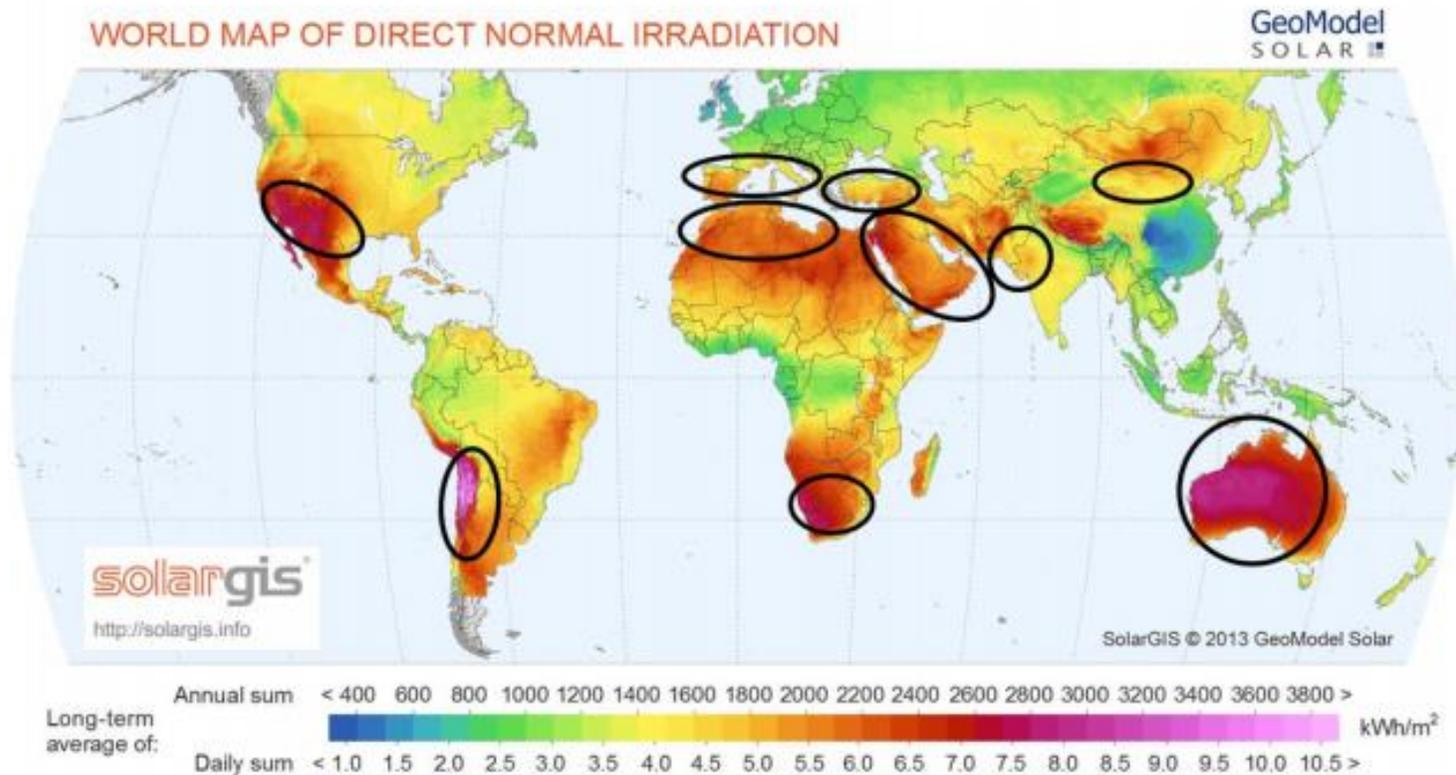
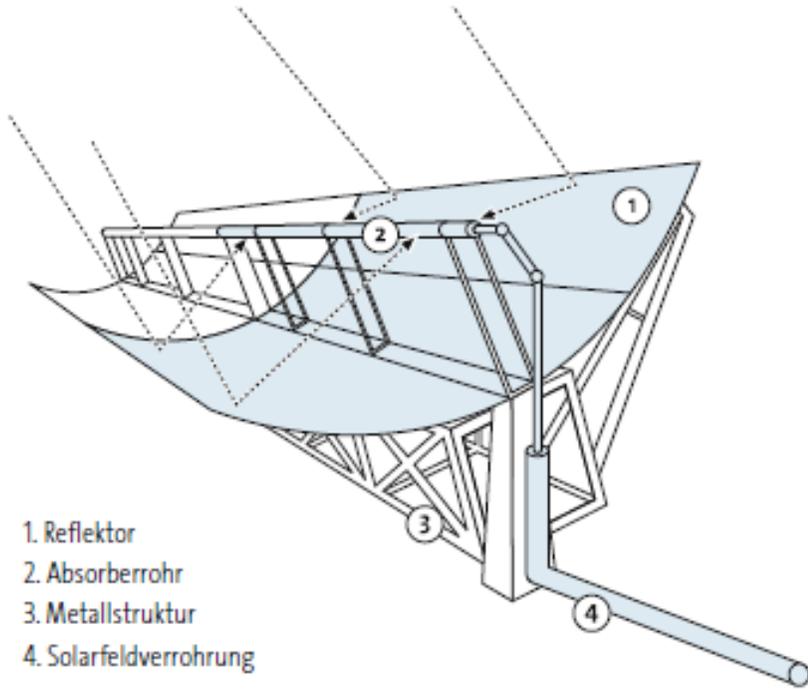
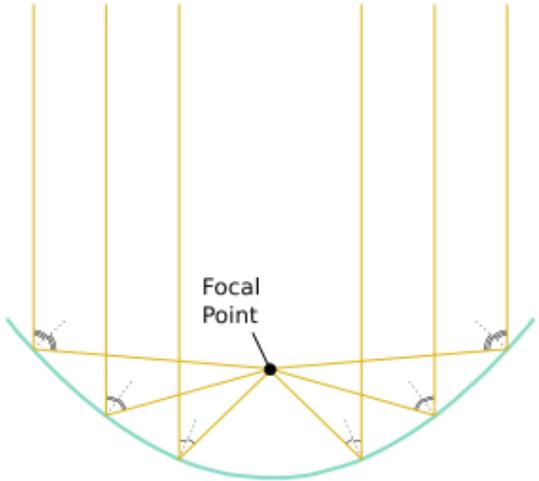
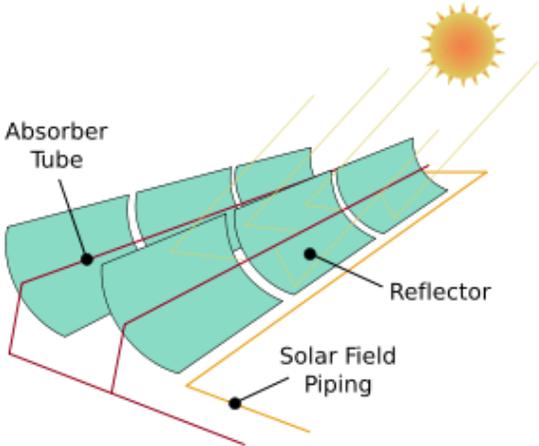


Abbildung 6: Die wichtigsten Zielmärkte für CSP-Technologien¹⁹

Prinzip Parabolrinnenkraftwerk



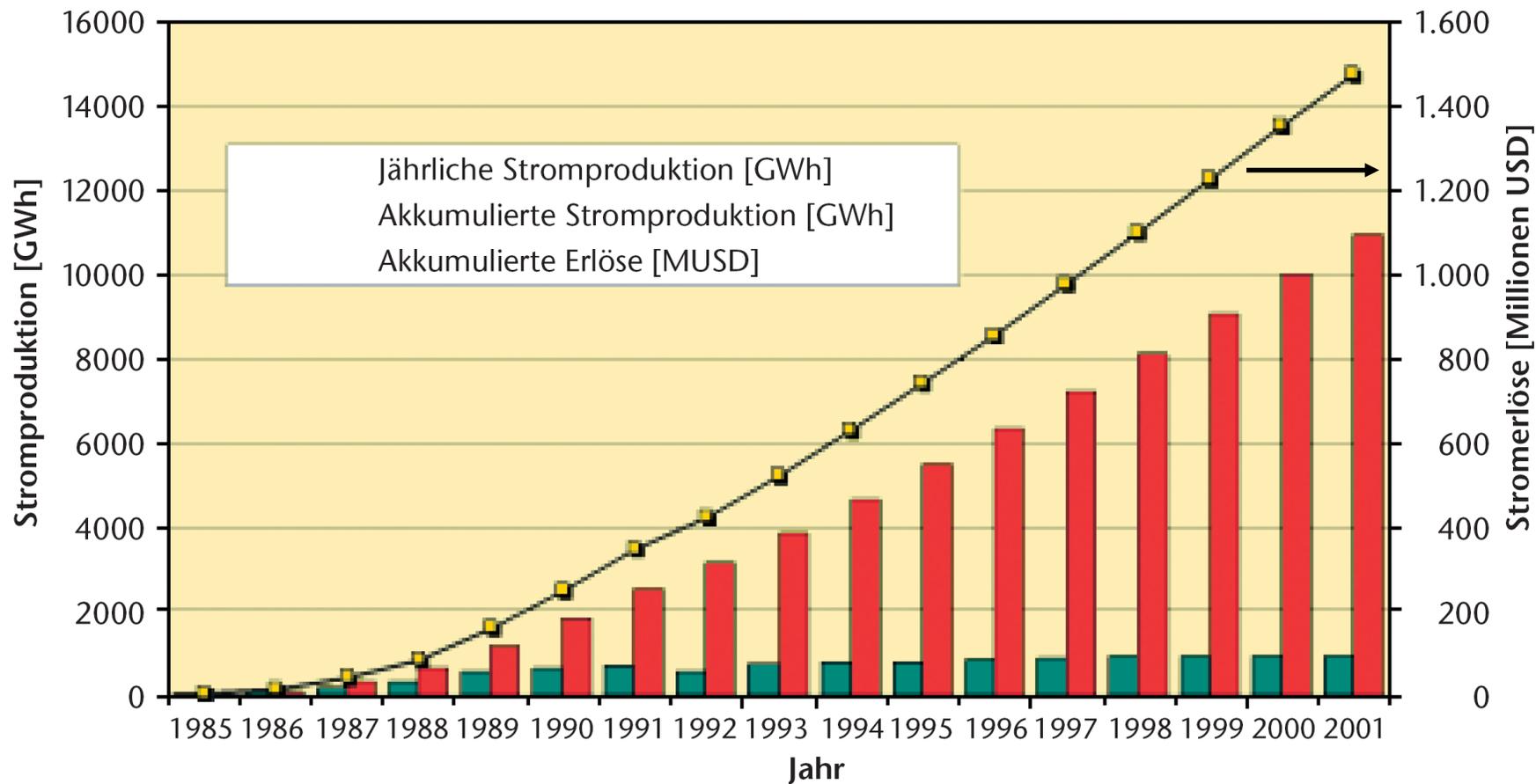
- 1. Reflektor
- 2. Absorberrohr
- 3. Metallstruktur
- 4. Solarfeldverrohrung

SEGS: Fakten...

SEGS Anlage	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Jahr der Inbetriebnahme	1985	1986	1987	1987	1988	1989	1989	1990	1991
Nettoleistung [MW]	13,8	30	30	30	30	30	30	80	80
Aperturfläche Solarfeld [1000m ²]	83	190	230	230	251	188	194	464	484
Solarfeld Auslasstemperatur [°C]	307	321	349	349	349	391	391	391	391
Turbinenwirkungsgrad [%]									
Solar-Betrieb	31,5 ^a	29,4 ^b	30,6	30,6	30,6	37,6 ^c	37,6	37,6	37,6
Gas-Betrieb	-	37,3	37,3 ^d	37,3	37,3	39,5	39,5	37,6 ^e	37,6
Dampfparameter am Turbineneinlass im Solar-Betrieb									
Druck [bar]	35,3	27,2	43,5	43,5	43,5	100	100	100	100
Temperatur [°C]	415 ^a	360	327	327	327	371	371	371	371
Jährliche Betriebsdaten (Auslegung)									
Thermischer Wirkungsgrad Solarfeld [%]	35	43	43	43	43	43	43	53	50
Solar-elektrischer Wirkungsgrad, netto [%]	9,3	10,7	10,2	10,2	10,2	12,4	12,3	14,0	13,6
Stromerzeugung, netto [GWh/a]	30,1	80,5	91,3	91,3	99,2	90,9	92,6	252,8	256,1
Gasverbrauch [10 ⁶ m ³ /a]	4,8	9,5	9,6	9,6	10,5	8,1	8,1	24,8	25,2
Spez. Installationskosten [US\$/kW]	4490	3200	3600	3730	4130	3870	3870	2890	3440
a) Dampferzeugung mit Solarenergie, Überhitzung durch Gas (18% des Energieeinsatzes) b) Im Solarbetrieb wird der Dampf mit Solarenergie erzeugt und überhitzt (SEGS II-IX) c) Turbine mit Zwischenüberhitzung (SEGS VI-IX) d) Im Gasbetrieb sind die Dampfparameter am Turbinenanlass 105 bar/510 °C (SEGS III-VII) e) Der Wärmeträgeröl-Erhitzer wurde eingeführt. Dampfparameter sind im Solar- und Gasbetrieb identisch.									

- installierte SEGS Gesamtleistung: 354 MW
- Stromerzeugung: ca. 500 GWh/a (.. entsprach 2003 noch ungefähr der Netzeinspeisung aller Photovoltaik-Anlagen der Welt !!)
- Stromgestehungskosten ca. 12-15 €/kWh

SEGS-Fakten



8. Solarthermische Kraftwerke

8.1 Einleitung

8.2 Konzentration solarer Strahlung

8.3 Grundlagen Wärmetransport

8.4 Absorberrohre

8.5 Parabolrinnenkraftwerke

8.5.1 Speicherung

8.6 Fresnel-Kollektor-Kraftwerke

8.7 Solare Turmkraftwerke

8.8 Dish-Stirling-Systeme

8.9 Aufwindkraftwerke

Maximale Konzentration (Theorie)

Aperturfläche des Konzentrators

$$A_p = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = \pi \cdot (\rho_R \cdot \sin \phi_R)^2 = \pi \cdot \rho_R^2 \cdot \sin^2 \phi_R$$

Durchmesser des Brennflecks

$$A_B = \frac{\pi}{4} \cdot b_{el}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_s^2 \cdot \alpha_D^2$$

max. 2D Konzentrationsfaktor:

$$k_{2D} = \frac{A_p}{A_B} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \rho_R^2 \cdot \sin^2 \phi_R}{\pi \cdot \rho_s^2 \cdot \alpha_D^2} = \frac{4 \cdot \sin^2 \phi_R}{\alpha_D^2}; \quad k_{max} = \frac{4}{0,00931^2} = 46164$$

max. 1D Konzentrationsfaktor: $k_{1D} = \sqrt{k_{2D}} \approx 215$

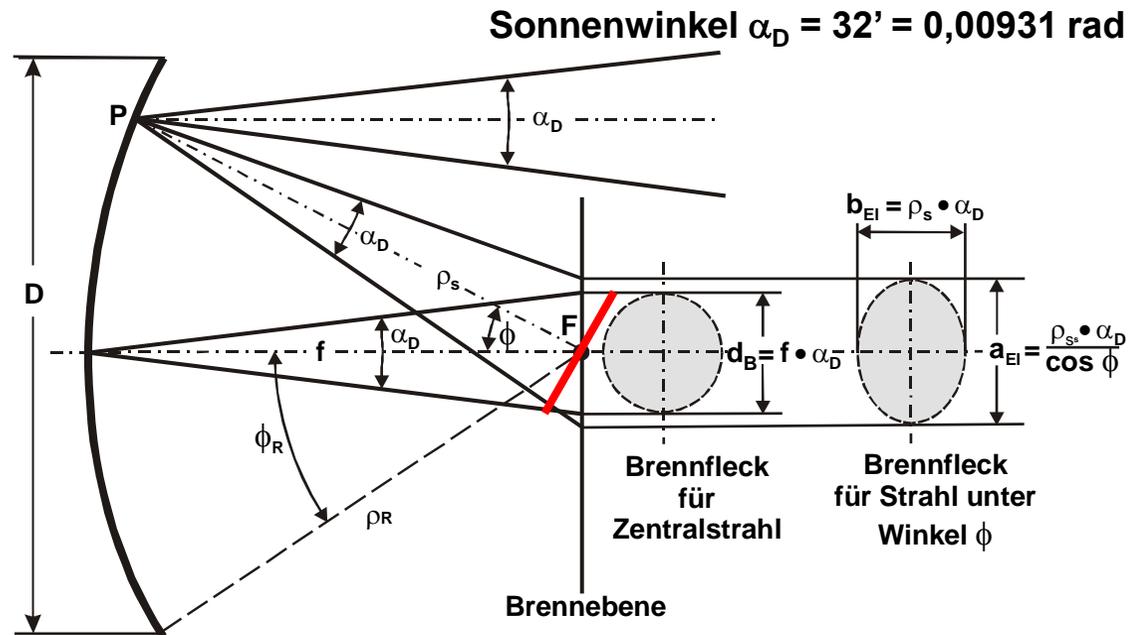
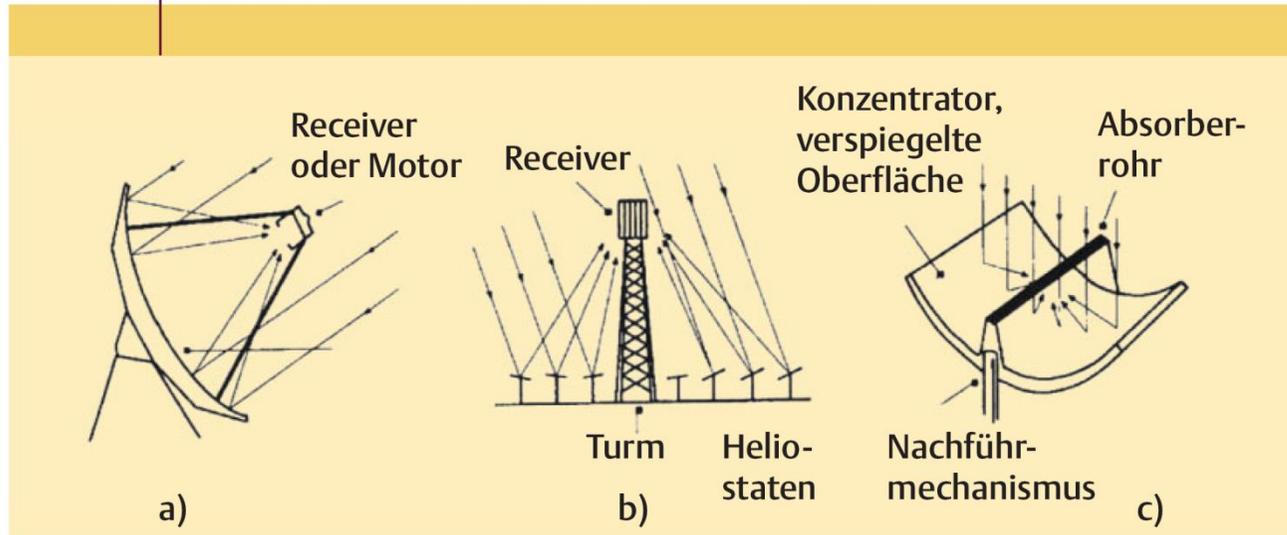


ABB. 1 | KONZENTRATION DES SONNENLICHTS



Drei mögliche Varianten zur Konzentration der solaren Strahlung: a) Dish-Konzentrator, b) Zentral-Receiver-System, c) Parabolrinne.

- in der technischen Realisierung:

dish: 5000...8000

Turm: 500...1000

Parabolrinne: 100

-Kollektordesign
von LUZ (Solel)

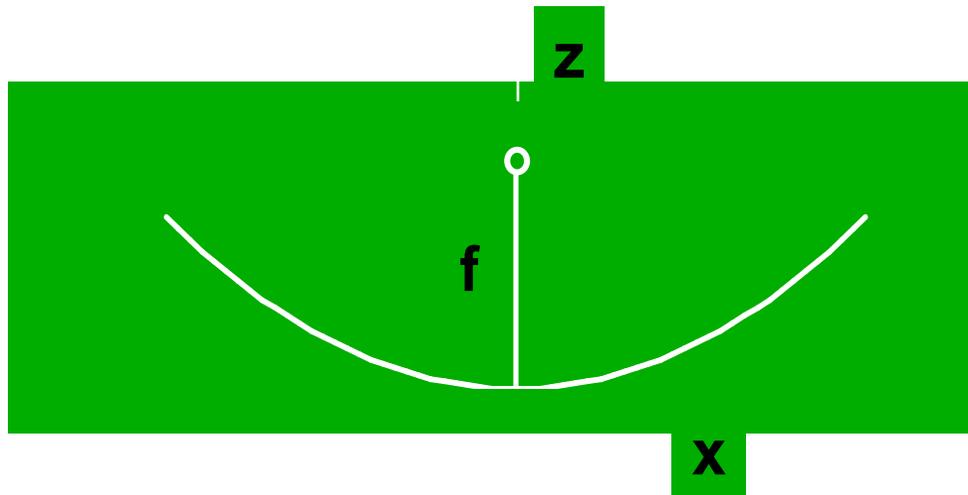
(2009 gekauft von Siemens
2013 eingestellt)



	<u>LS-1</u>	<u>LS-2</u>	<u>LS-3</u>	<u>Eurotrough</u>
Aperturweite	2.5m	5m	5.76m	5.8m
Kollektorlänge	50 m	48 m	99 m	100-150 m
Stützenabstand	6 m	12 m	17.3 m	12 m
Refl. Fläche	128m ²	235m ²	545m ²	545m ²
Konzentration	61:1	71:1	82:1	82:1

SEGS

Parabolische Form

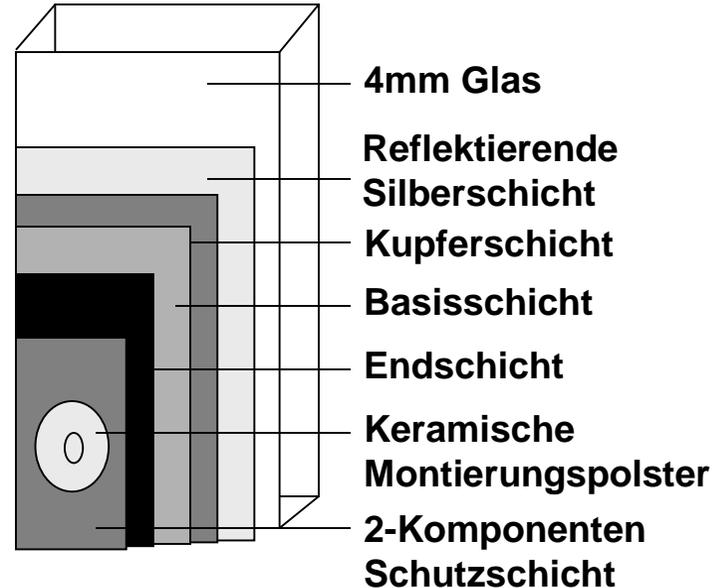


$$z = x^2 / 4f$$

$$f = 1.71 \text{ (Eurotrough)}$$

- einachsige Nachführung des Reflektors

Aufbau Spiegel



8. Solarthermische Kraftwerke

8.1 Einleitung

8.2 Konzentration solarer Strahlung

8.3 Grundlagen Wärmetransport

8.4 Absorberrohre

8.5 Parabolrinnenkraftwerke

8.5.1 Speicherung

8.6 Fresnel-Kollektor-Kraftwerke

8.7 Solare Turmkraftwerke

8.8 Dish-Stirling-Systeme

8.9 Aufwindkraftwerke

Tabelle 3.1 Für Wärmeberechnungen wichtige thermodynamische Größen und Parameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit
Wärme, Energie	Q	Ws = J
Wärmefluss	\dot{Q}	W
Temperatur	ϑ	°C
absolute Temperatur	T	K (Kelvin, 0 K = -273,15 °C)
Wärmekapazität	c	J/(kg K)
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(m K)
Wärmedurchgangszahl	k'	W/(m K)
Wärmedurchgangskoeffizient	k	W/(m ² K)
Wärmeübergangskoeffizient	α	W/(m ² K)

Die solare Wärme muss vor der Nutzung meist gespeichert werden.
Wärmefluß in einen Körper führt zu einer Temperaturänderung ΔT eines Körpers mit der Masse m und einer Wärmekapazität c :

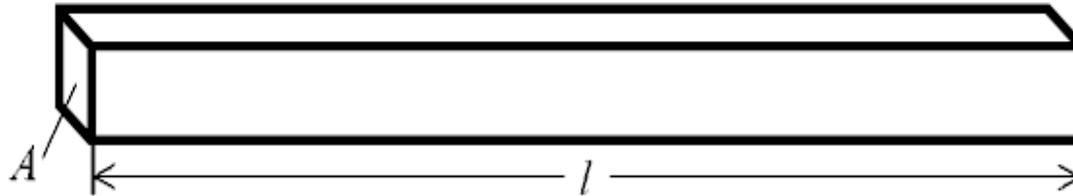
$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = c \cdot m \cdot \frac{dT}{dt}$$

Wasser besitzt ein besonders großes Wärmespeichervermögen

Tabelle 3.2 Wärmekapazitäten c einiger Stoffe für $\vartheta = 0 \dots 100 \text{ °C}$, Daten: [Gie89, Lad95]

Bezeichnung	c in Wh/(kg K)	c in kJ/(kg K)	Bezeichnung	c in Wh/(kg K)	c in kJ/(kg K)
Aluminium	0,244	0,879	Kupfer	0,109	0,394
Eis (-20 °C...0°C)	0,58	2,09	Luft (trocken, 20 °C)	0,280	1,007
Eisen	0,128	0,456	Messing	0,107	0,385
Ethanol (20 °C)	0,665	2,395	Sand, trocken	0,22	0,80
Gips	0,31	1,1	Wasser	1,163	4,187
Glas, Glaswolle	0,233	0,840	Wärmeträger (auf der Basis von 1,2 Propylenglykol)		
Holz (Fichte)	0,58	2,1	Tyfocor55 % (50 °C)	0,96	3,45

- Wärmestrom \dot{Q} in Watt: durch Wärmeleitung übertragene Wärmeleistung

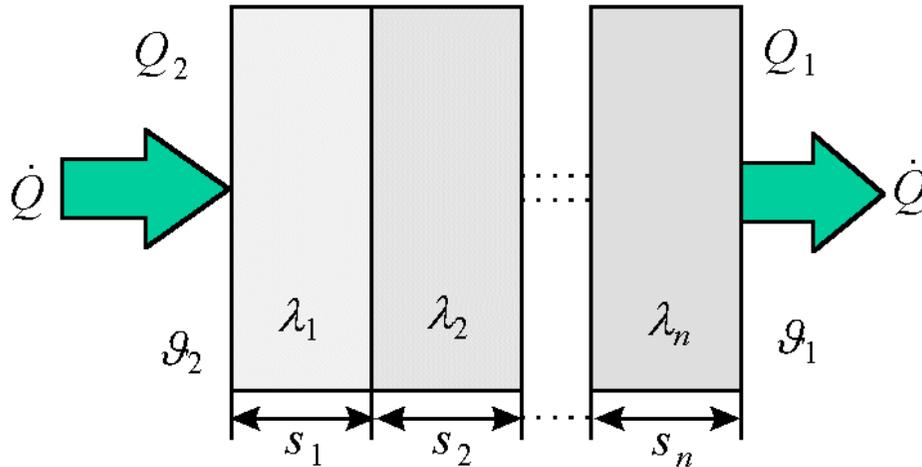


$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{A}{l} \cdot \Delta T = (R_{th})^{-1} \cdot \Delta T$$

Wärmewiderstand R_{th}

Der Wärmedurchgang ergibt sich aus der Abfolge von Wärmeübergängen und Wärmeleitung durch eine Schicht.

Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme



Wärmedurchgang(sleistung) durch n Schichten mit Querschnitt A und Wärmeübergangskoeffizienten α_1 und α_2 auf den Außenseiten der Schichten

$$\dot{Q} = U \cdot A (T_2 - T_1)$$

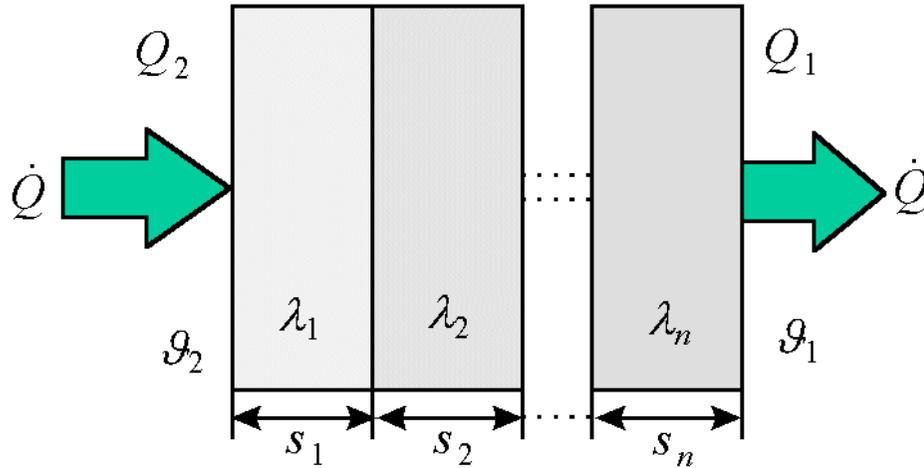
$$U = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} \right)^{-1}$$

$$[U] = [\alpha] = \frac{W}{m^2 K}$$

$$[\lambda] = \frac{W}{mK}$$

Wärmedurchgangskoeffizient
(U-Wert, früher k-Wert)

Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme



$$\dot{Q} = U \cdot A (T_2 - T_1)$$

$$U = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} \right)^{-1}$$

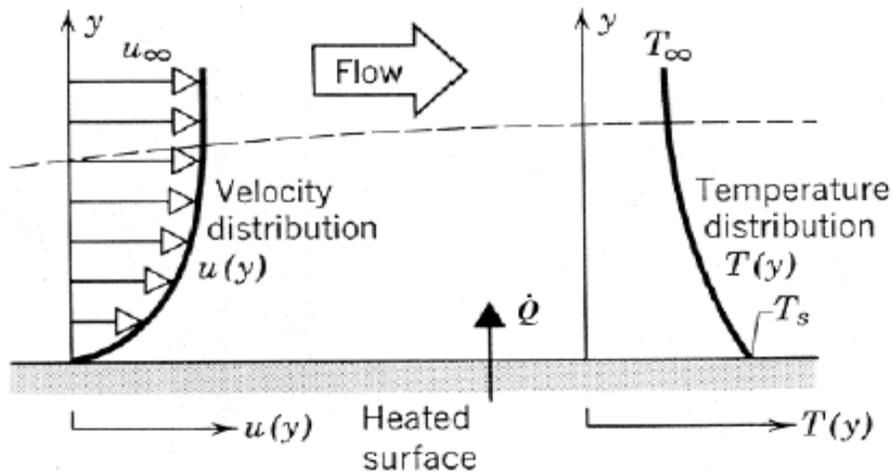
Tabelle 3.3 Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe, Daten: [Gie89, Hum91]

Material	Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m K)	Material	Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m K)
Eis (0 °C)	2,23	Luft (trocken, 20°C)	0,026
Eisen	81	Polystyrol (PS)	0,034
Gips	0,45	Polyurethan (PUR)	0,030
Glas	0,81	Stahl	60
Glasfasern	0,04	Stahlbeton	1,80
Holz (Fichte)	0,14	Steinwolle	0,04
Isofloc (Papierfasern)	0,045	Wasser (20 °C)	0,60

Newton's Gesetz der Kühlung (Konvektion)

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_s - T_\infty)$$

\dot{q} : Wärmestromdichte [W/m²]
 α : Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K]



- Konvektionsarten:
- (a) Erzwungene Konvektion
 - (b) Freie Konvektion
 - (c) Verdampfung
 - (d) Kondensation

Typische Größenordnung von Wärmeübergangskoeffizienten

PROCESS	α (W/m ² · K)
Free convection	
Gases	2–25
Liquids	50–1000
Forced convection	
Gases	25–250
Liquids	50–20.000
Convection with phase change	
Boiling or condensation	2500–100.000

8. Solarthermische Kraftwerke

8.1 Einleitung

8.2 Konzentration solarer Strahlung

8.3 Grundlagen Wärmetransport

8.4 Absorberrohre

8.5 Parabolrinnenkraftwerke

8.5.1 Speicherung

8.6 Fresnel-Kollektor-Kraftwerke

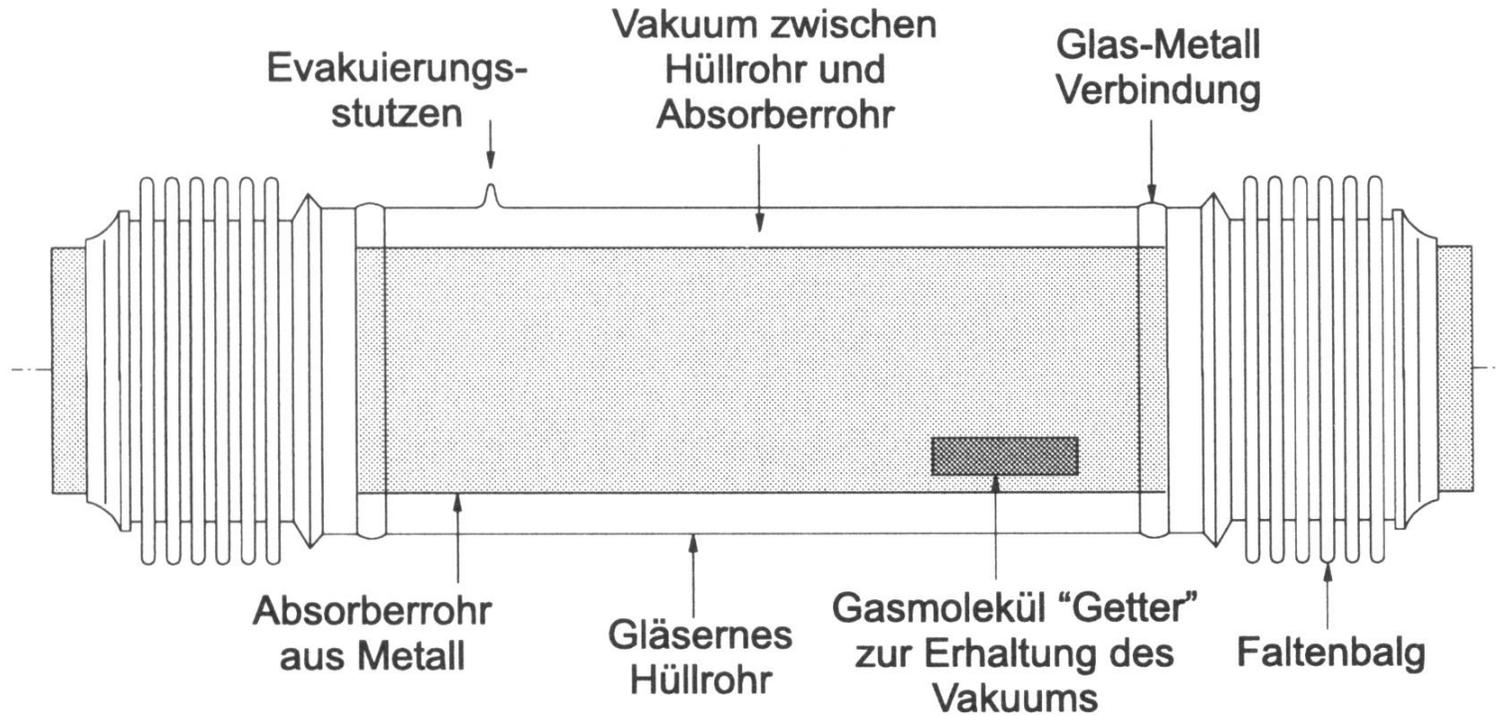
8.7 Solare Turmkraftwerke

8.8 Dish-Stirling-Systeme

8.9 Aufwindkraftwerke

Absorberrohr

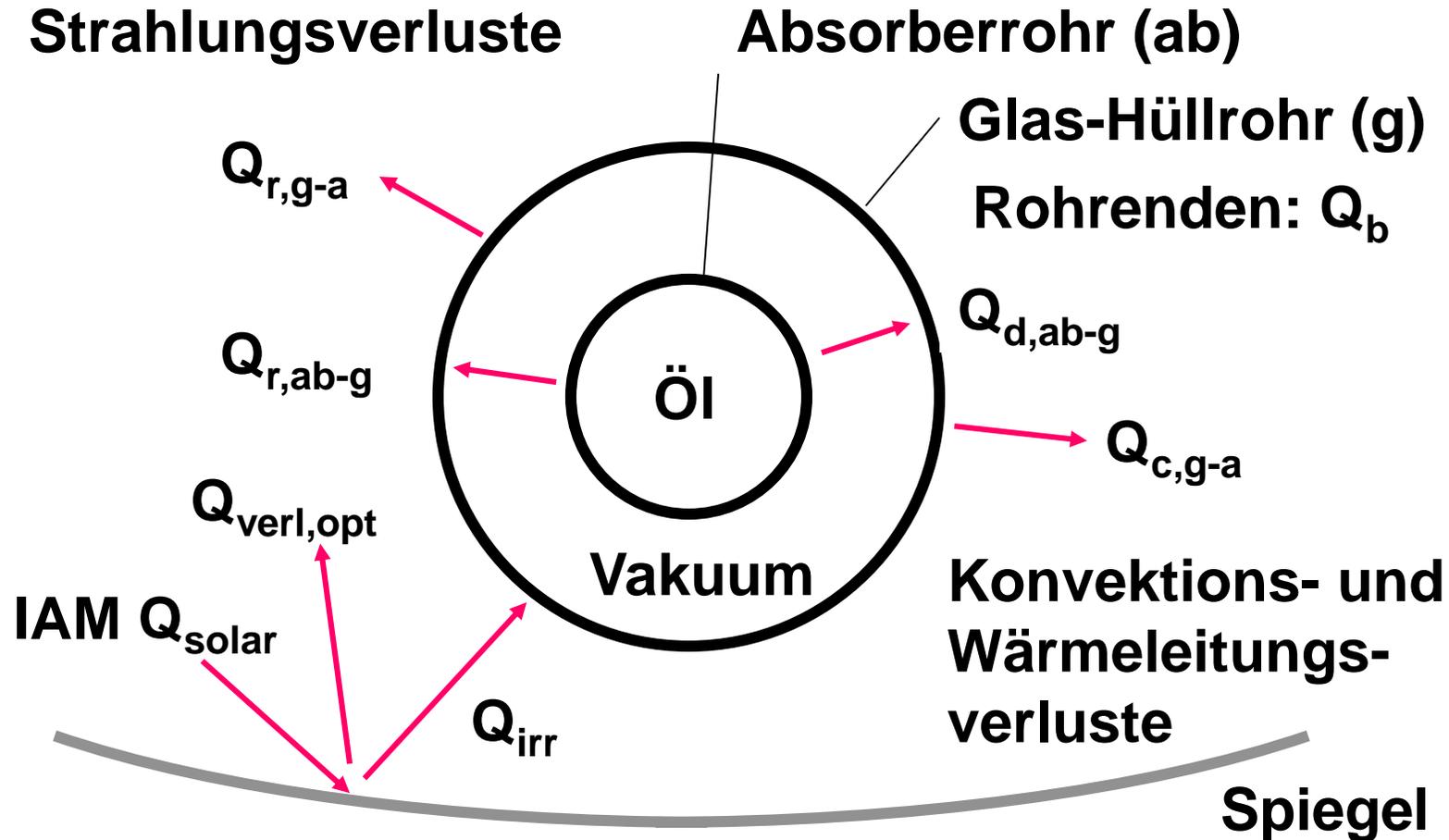
8.22
PV 2016



- selektive Beschichtung
- Vakuum zwischen Absorberrohr und äußerem Glasrohr

Thermische Verluste am Absorberrohr

8.23
PV 2016



Bedeutung der Indizes: r : Strahlung; d : Wärmeleitung; c : Konvektion

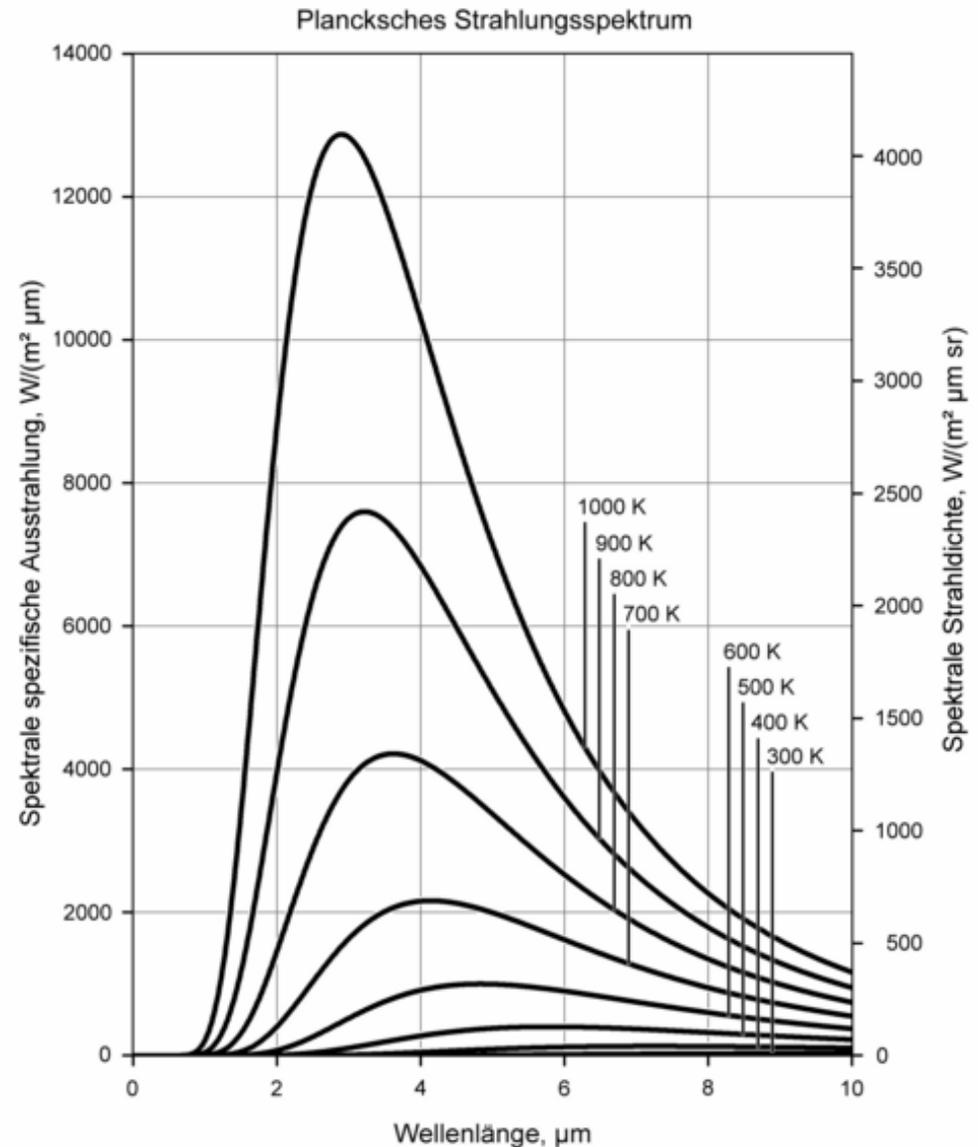
Spektrale spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers:

$$M_{\lambda}^0(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

Spektrale spezifische Ausstrahlung eines grauen Körpers:

$$M_{\lambda}^0(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

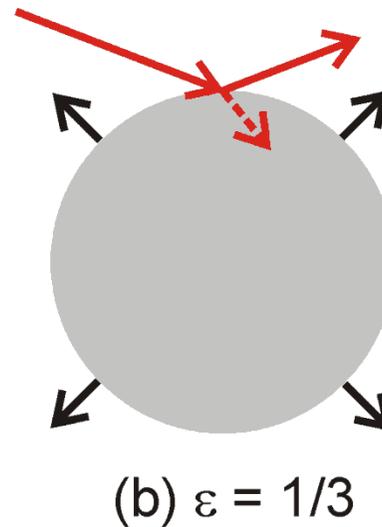
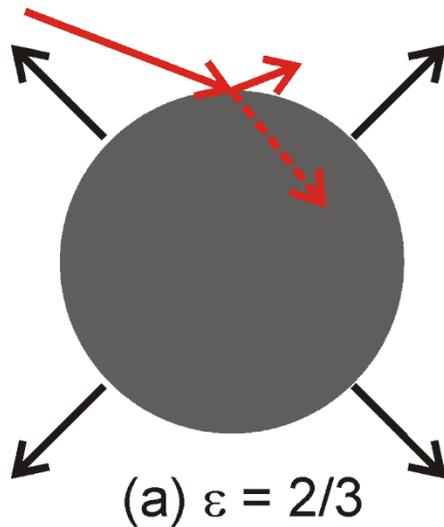
$\varepsilon(\lambda)$: spektralabhängiger Emissionsgrad
= $\alpha(\lambda)$: spektralabh. Absorptionsvermögen



Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz:

$\varepsilon(\lambda)$: spektralabhängiger Emissionsgrad
=
 $\alpha(\lambda)$: spektralabh. Absorptionsvermögen

Ein schwarzer Körper emittiert maximal thermische Strahlung und absorbiert maximal einfallende Strahlung ($\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$ für alle λ).



Aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz folgt das Stefan-Boltzmann-Gesetz für die Abstrahlung eines schwarzen Körpers:

$$M^o(T) = \int_{\nu=0}^{\infty} \int_{\text{Halbraum}} \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)} - 1} \cos \beta \sin \beta d\beta d\varphi d\nu = \sigma T^4$$

$$\Rightarrow P = M^o(T) \cdot A = A \sigma T^4$$

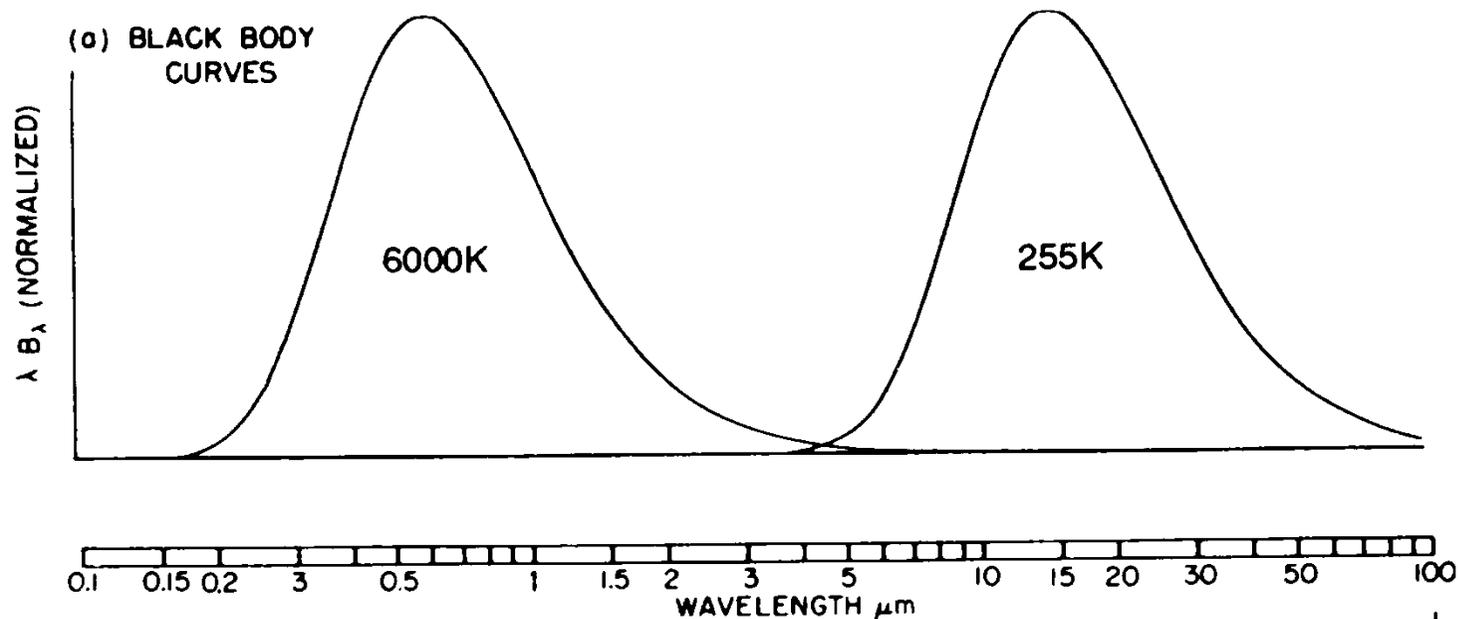
und das Wien'sche Verschiebungsgesetz

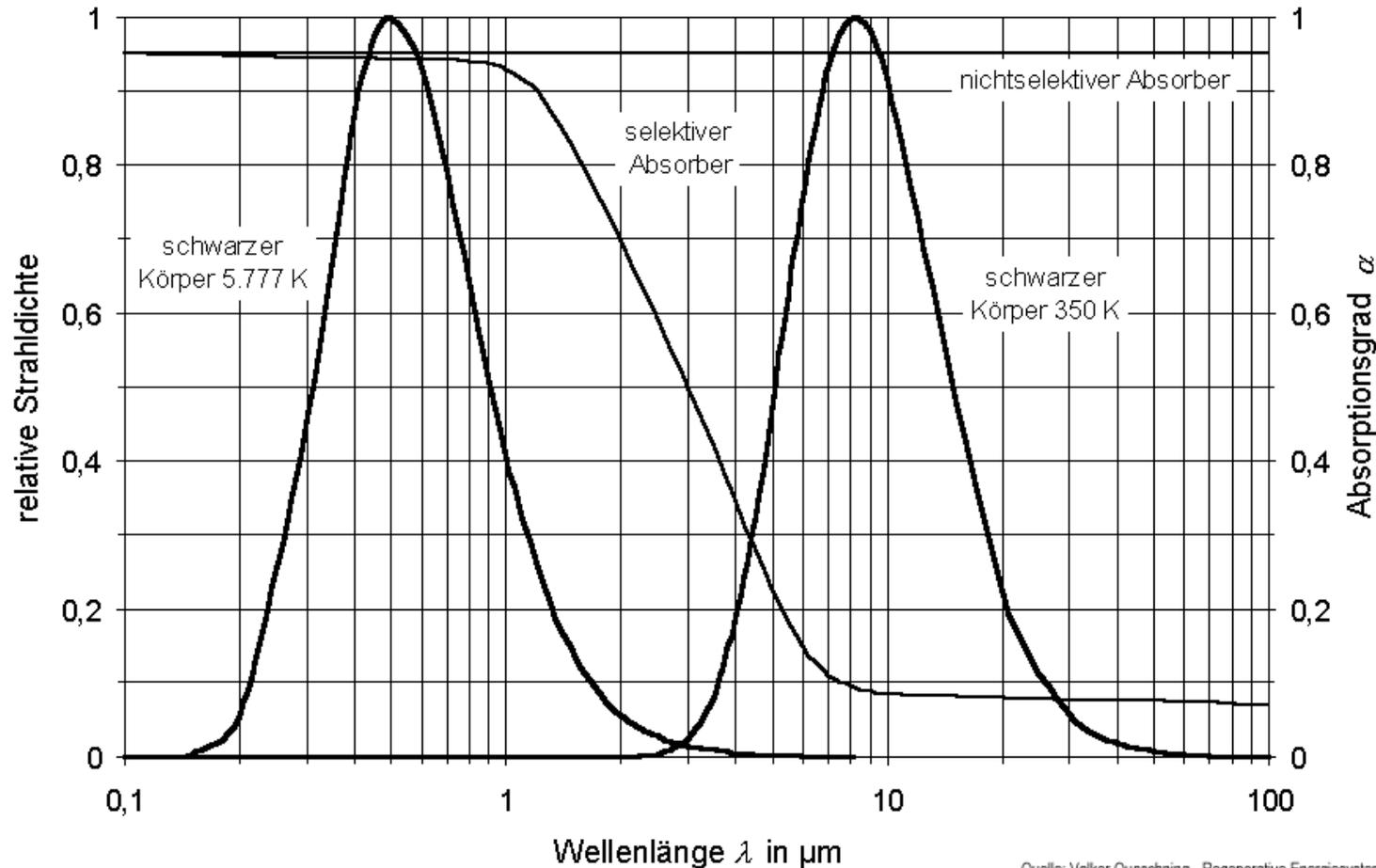
$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{xkT} =: \frac{b}{T} = \frac{2897,8 \mu\text{m K}}{T}$$

Für einen grauen Körper mit einem wellenabhängigen $\varepsilon(\lambda)$ werden diese Zusammenhänge komplizierter.

- Wärmeabgabe durch elektromagnetische Wellen im Infrarotbereich
- mit steigender Temperatur wächst die Intensität der Wärmestrahlung ($\sim T^4$)
- Abhängig von der Oberflächen“farbe“ und -beschaffenheit (Emissivität)

$$\dot{Q} = A \varepsilon \Delta(T^4)$$

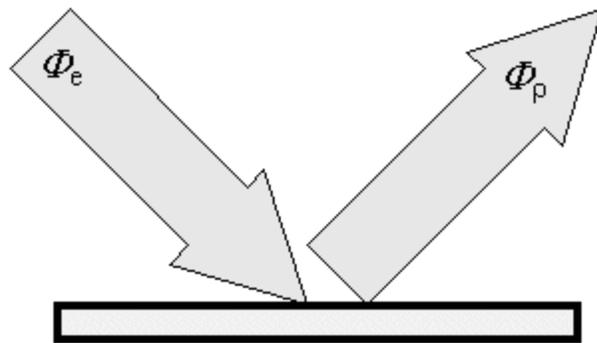




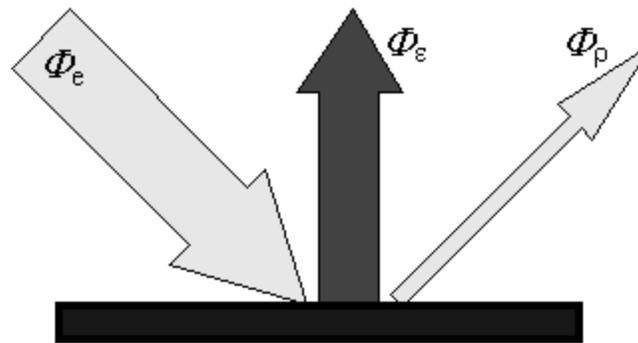
Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Hauptemission der Sonne – Schwarzer Körper der Temperatur von 5777 K - bei Wellenlängen $< 2 \mu\text{m}$. Absorptionsgrad sollte dort groß sein!

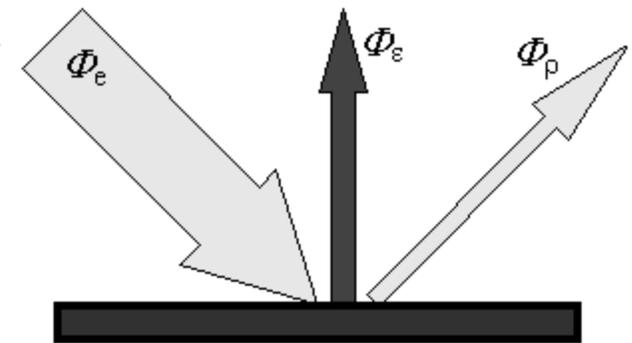
Hauptemission des Absorbers – Schwarzer Körper der Temperatur von 350 K – im Bereich von $3 - 30 \mu\text{m}$. Emissionsgrad = Absorptionsgrad dort möglichst klein!



Spiegelnde Oberflächen
reflektieren das Sonnenlicht



Schwarz lackierte Oberflächen
absorbieren die Sonnenstrahlung
und geben einen großen Teil als
Wärmestrahlung wieder ab.



Selektiv beschichtete Oberflächen
absorbieren die Sonnenstrahlung
und geben einen geringen Teil als
Wärmestrahlung wieder ab.

Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Material	sichtbar			infrarot		
	$\alpha = \epsilon$	τ	ρ	$\alpha = \epsilon$	τ	ρ
nicht selektiver Absorber	0,97	0	0,03	0,97	0	0,03
Schwarzchrom	0,87	0	0,13	0,09	0	0,91
Schwarznickel	0,88	0	0,12	0,07	0	0,93
TiNOX (TiN + TiO + TiO ₂)	0,95	0	0,05	0,05	0	0,95

8. Solarthermische Kraftwerke

8.1 Einleitung

8.2 Konzentration solarer Strahlung

8.3 Grundlagen Wärmetransport

8.4 Absorberrohre

8.5 Parabolrinnenkraftwerke

8.5.1 Speicherung

8.6 Fresnel-Kollektor-Kraftwerke

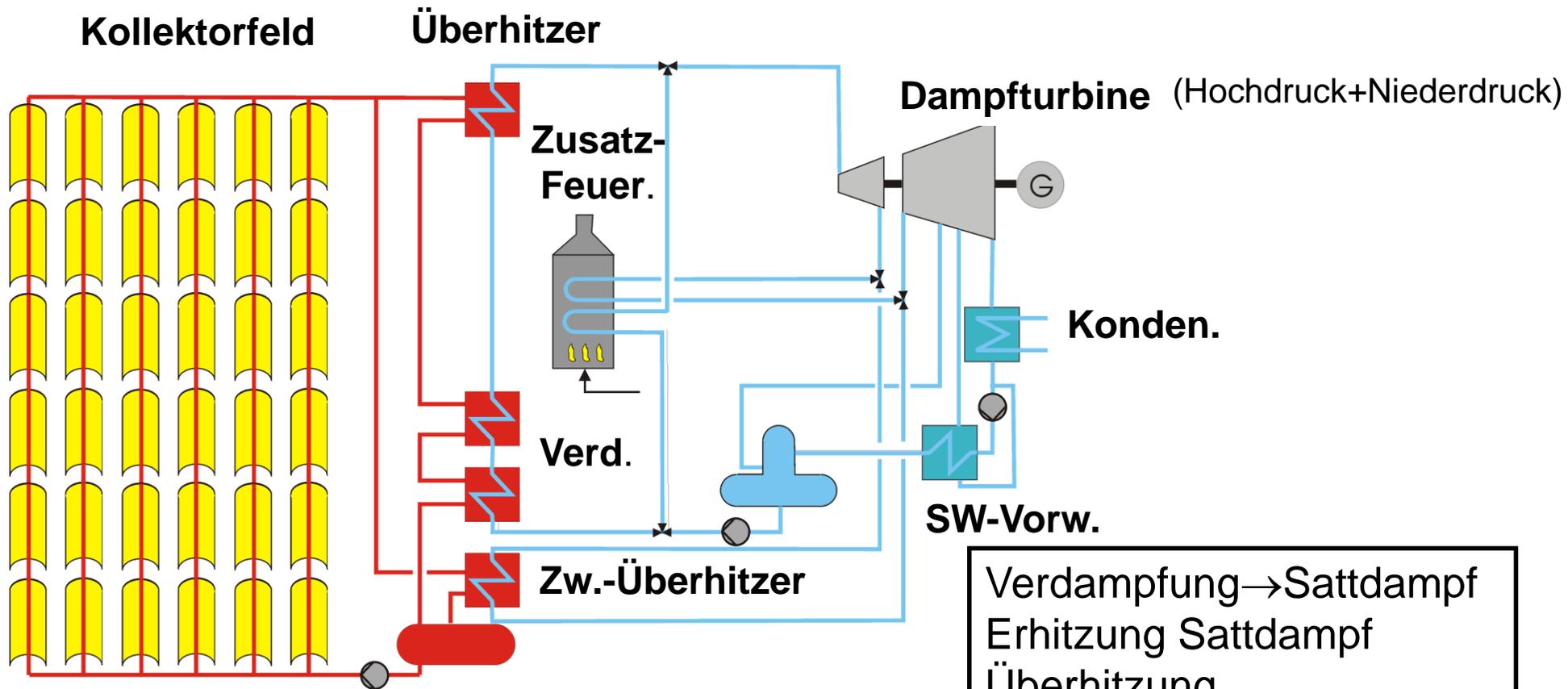
8.7 Solare Turmkraftwerke

8.8 Dish-Stirling-Systeme

8.9 Aufwindkraftwerke

Schema Parabolrinnenkraftwerk SEGS

8.31
PV 2016



- Thermoöl als Wärmeträgermedium
- Temperaturen bis ca. 400 °C

Modifizierter „Clausius-Rankine“-Prozess

Verdampfung → Sattdampf
Erhitzung Sattdampf
Überhitzung
Expansion in HD-Turbine
Zwischenüberhitzung
Expansion in ND-Turbine
Kondensation
Speisewasservorwärmung

1. Central Solar Power Schematics

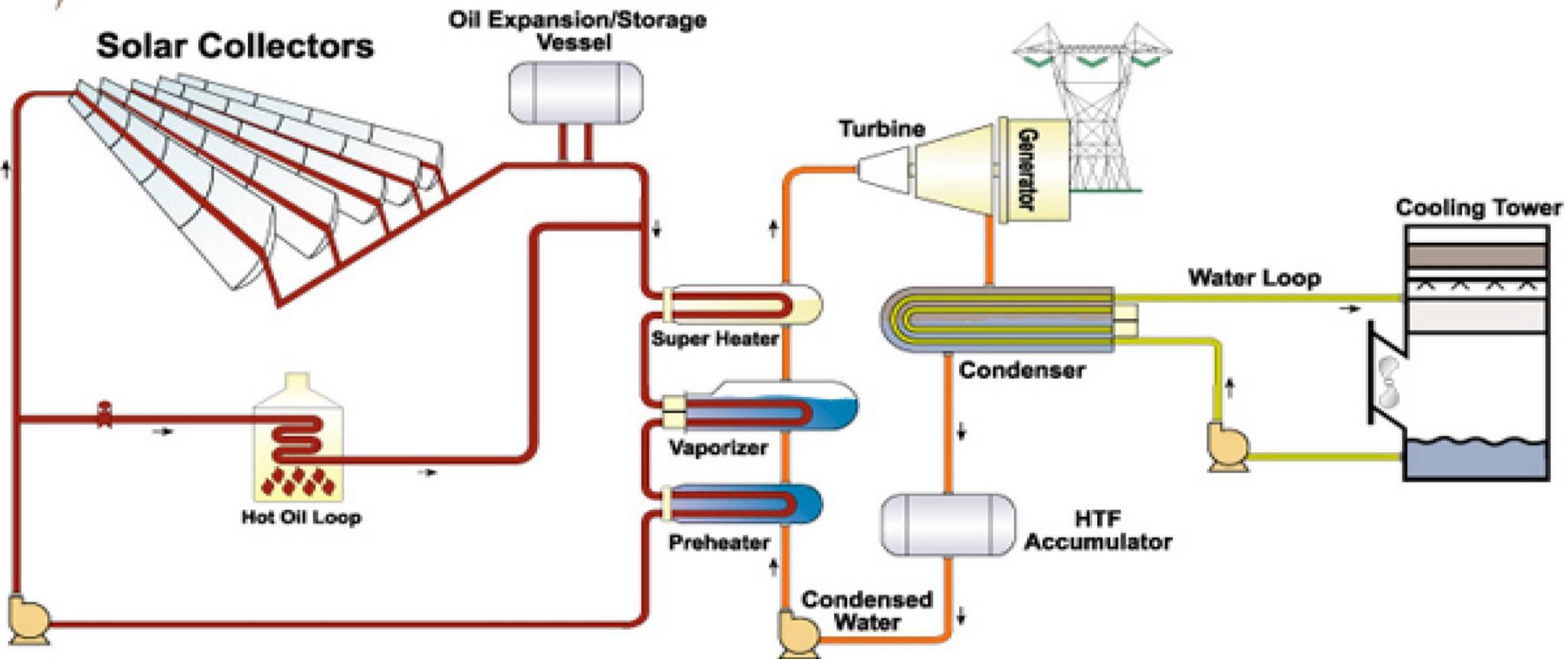
8.32
PV 2016



thermischer Gesamtwirkungsgrad: < 50 %

Wirkungsgrad Stromerzeugung im Dampfkraftwerk: < 45 %

solar-elektrischer Gesamtwirkungsgrad SEGS VIII: 14 %



Zusammenfassung Parabolrinnenkraftwerke ⁰⁸³³ PV 2016

- 2 Mqm Parabolrinnenfelder

- 354 MW Kapazität allein in SEGS-Kraftwerken installiert

- geringer Materialeinsatz: pro qm Aperturfläche 18 kg Stahl, 11 kg Glas

- 30-50 % weniger Landbedarf als bei Dish-/Turmanlagen

- beste solare Wirtschaftlichkeit (10-15 €ct/kWh)

- gute Modularität

- Parabolspiegel und Absorberrohrfertigung in D



Die größten solarthermischen Kraftwerke

Operational Solar Thermal Power Stations

Capacity MW	Name	Country	Location	Coordinates	Technology type	Notes and references
392	Ivanpah Solar Power Facility	 USA	San Bernardino County, California	 35°34'N 115°28'W	solar power tower	Completed in February 13, 2014 ^{[1][2][3]}
354	Solar Energy Generating Systems (SEGS)	 USA	Mojave Desert, California	 35°01'54"N 117°20'53"W	parabolic trough	Collection of 9 units ^{[4][5][6][7][8][9][10][11][12]}
280	Mojave Solar Project	 USA	Barstow, California	 35°00'40"N 117°19'30"W	parabolic trough	Completed December 2014. Gross capacity of 280 MW corresponds to net capacity of 250 MW ^{[13][14][15]}
280	Solana Generating Station	 USA	Gila Bend, Arizona	 32°55'N 112°58'W	parabolic trough	Completed in October 2013, with 6h thermal energy storage ^{[16][17]}
250	Genesis Solar Energy Project	 USA	Blythe, California	 33°38'37.68"N 114°59'16.8"W	parabolic trough	Online April 24, 2014 ^{[18][19]}
200	Solaben Solar Power Station ^[20]	 Spain	Logrosán	 39°13'29"N 5°23'26"W	parabolic trough	Solaben 3 completed June 2012 ^[21] Solaben 2 completed October 2012 ^[21] Solaben 1 and 6 completed September 2013 ^[22]
160	Noor I	 Morocco	Ghassate, Ouarzazate Province	 30°59'40"N 6°51'48"W	parabolic trough	with 3h heat storage ^[23] . ^[24]
150	Solnova Solar Power Station	 Spain	Sanlúcar la Mayor	 37°25'00"N 06°17'20"W	parabolic trough	Solnova 1 completed May 2010 Solnova 3 completed May 2010 Solnova 4 completed August 2010 ^{[25][26][27][28][29]}
150	Andasol solar power station	 Spain	Guadix	 37°13'42.70"N 3°46.73'W	parabolic trough	Completed: Andasol 1 (2008), Andasol 2 (2009), Andasol 3 (2011). Each equipped with a 7.5-hour thermal energy storage. ^{[30][31]}
150	Extresol Solar Power Station	 Spain	Torre de Miguel Sesmero	 38°39'N 6°44'W	parabolic trough	Completed: Extresol 1 and 2 (2010), Extresol 3 (2012). Each equipped with a 7.5-hour thermal energy storage. ^{[21][32][33]}

Das Projekt Andasol

8.35
PV 2016

Projektentwicklung der weltgrößten solarthermischen Kraftwerke in Andalusien (Spanien)



Das Projekt Andasol

8.36
PV 2016

Auf einen Blick: Daten zu einem Andasol-Kraftwerk

<i>Elektrische Leistung</i>	<i>50 Megawatt (MW)</i>
<i>Investitionsvolumen</i>	<i>300 Millionen Euro</i>
<i>Brutto-Stromproduktion</i>	<i>~ 176 Gigawattstunden pro Jahr (GWh/Jahr)</i>
<i>Flächenbedarf</i>	<i>2 km²</i>
<i>Oberfläche der Solarkollektoren</i>	<i>512.000 m²</i>
<i>Thermische Speicher</i>	<i>28.500 Tonnen Salz, ausreichend für den Betrieb von 7,5 Volllaststunden</i>
<i>Solarenergie ...</i>	<i>... für bis zu 200.000 Menschen</i>
<i>Baubeginn, Bauzeit</i>	<i>Juni 2006; 24 Monate</i>
<i>Zahl der Arbeitskräfte in der Bauphase</i>	<i>bis zu 500</i>
<i>Zahl der Arbeitskräfte im Betrieb</i>	<i>~ 40</i>

The screenshot shows the website for Solar Millennium AG. The header includes the company name and navigation links for language (deutsch, english, español) and actions (Download, Kontakt). The main navigation menu lists: Unternehmen, Technologie, Investoren, Presse, Energiemarkt. A search bar is present on the right. The breadcrumb trail reads: Home → Unternehmen → Vorstand. The main content area features the heading "Der Vorstand der Solar Millennium AG." with a red strikethrough line. Below it, the name "Prof. Dr. Utz Claassen (46) Vorsitzender" is also redacted with a red strikethrough line. A sidebar on the left contains a menu with items: Philosophie, Geschäftsmodell, Konzernstruktur, and Meilensteine.

05.01.2012

[Drucken](#) | [Senden](#) | [Feedback](#) | [Merken](#)

Solar-Millennium-Pleite

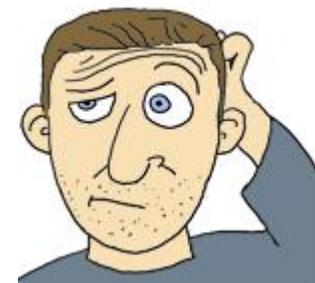
16.000 Kleinanleger müssen um ihr Geld bangen



Solar Millennium

Solar-Millennium-Kraftwerksprojekt in Kalifornien: Pleite trifft 16.000 Kleinanleger

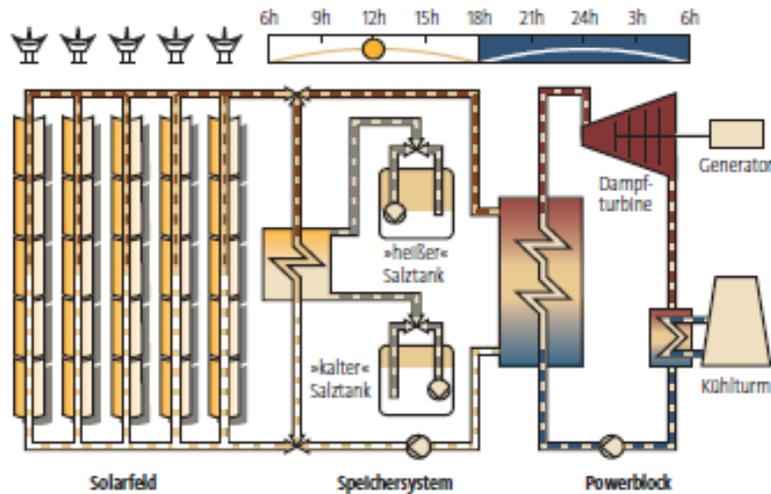
Die Pleite von Solar Millennium trifft vor allem Menschen, die ihr Geld privat bei dem Sonnenkraftwerkshersteller angelegt haben. Rund 16.000 Kleinanleger müssen um ihr Ersparnis fürchten - fast ebenso viele Aktionäre dürften ihr Geld nie wieder bekommen.



Das Projekt Andasol

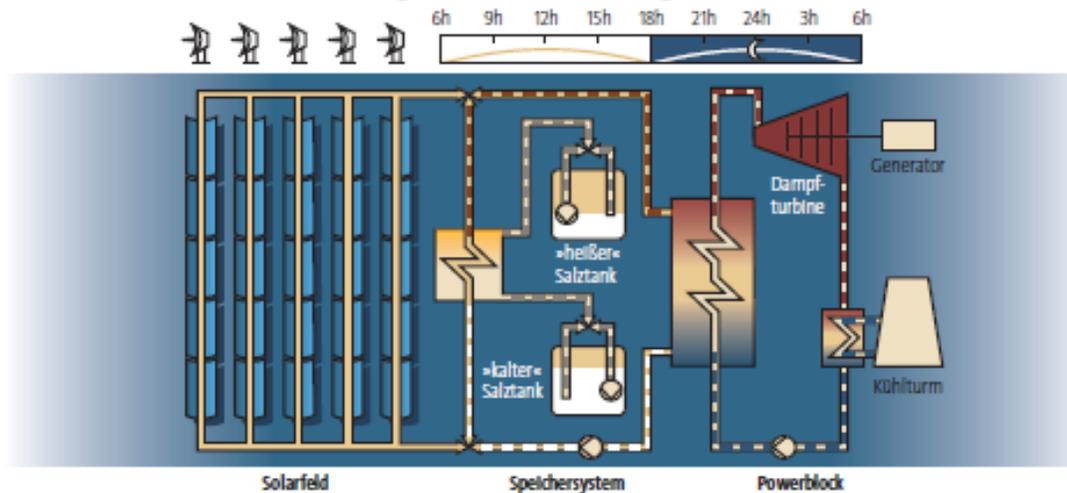
8.38
PV 2016

Der thermische Speicher wird tagsüber aufgeladen.



$d=36\text{ m}$, $h=14\text{ m}$

Nachts kann das Kraftwerk mit der gespeicherten Energie betrieben werden.



Salztanks mit 28.500 Tonnen Kalium-Natrium-Nitratsalzen erlauben nächtlichen Betrieb

Existing Solar Thermal Power Stations

Operational Solar Thermal Power Stations

Capacity MW	Name	Country	Location	Coordinates	Technology type	Notes and references
392	Ivanpah Solar Power Facility	USA	San Bernardino County, California	35°34'N 115°28'W	solar power tower	Completed in February 13, 2014 ^{[1][2][3]}
354	Solar Energy Generating Systems (SEGS)	USA	Mojave Desert, California	35°01'54"N 117°20'53"W	parabolic trough	Collection of 9 units ^{[4][5][6][7][8][9][10][11][12]}
280	Mojave Solar Project	USA	Barstow, California	35°00'40"N 117°19'30"W	parabolic trough	Completed December 2014. Gross capacity of 280 MW corresponds to net capacity of 250 MW ^{[13][14][15]}
280	Solana Generating Station	USA	Gila Bend, Arizona	32°55'N 112°58'W	parabolic trough	Completed in October 2013, with 6h thermal energy storage ^{[16][17]}
250	Genesis Solar Energy Project	USA	Blythe, California	33°38'37.68"N 114°59'16.8"W	parabolic trough	Online April 24, 2014 ^{[18][19]}
200	Solaben Solar Power Station ^[20]	Spain	Logrosán	39°13'29"N 5°23'26"W	parabolic trough	Solaben 3 completed June 2012 ^[21] Solaben 2 completed October 2012 ^[21] Solaben 1 and 6 completed September 2013 ^[22]
160	Noor I	Morocco	Ghassate, Ouarzazate Province	30°59'40"N 6°51'48"W	parabolic trough	with 3h heat storage ^[23] . ^[24]
150	Solnova Solar Power Station	Spain	Sanlúcar la Mayor	37°25'00"N 06°17'20"W	parabolic trough	Solnova 1 completed May 2010 Solnova 3 completed May 2010 Solnova 4 completed August 2010 ^{[25][26][27][28][29]}
150	Andasol solar power station	Spain	Guadix	37°13'42.70"N 3°46.73'W	parabolic trough	Completed: Andasol 1 (2008), Andasol 2 (2009), Andasol 3 (2011). Each equipped with a 7.5-hour thermal energy storage. ^{[30][31]}
150	Extresol Solar Power Station	Spain	Torre de Miguel Sesmero	38°39'N 6°44'W	parabolic trough	Completed: Extresol 1 and 2 (2010), Extresol 3 (2012). Each equipped with a 7.5-hour thermal energy storage. ^{[21][32][33]}

Total installed solar thermal: 4,7 GWp as of 2016

(Photovoltaics: 227 GWp in 2015!)

8. Solarthermische Kraftwerke

8.1 Einleitung

8.2 Konzentration solarer Strahlung

8.3 Grundlagen Wärmetransport

8.4 Absorberrohre

8.5 Parabolrinnenkraftwerke

8.5.1 Speicherung

8.6 Fresnel-Kollektor-Kraftwerke

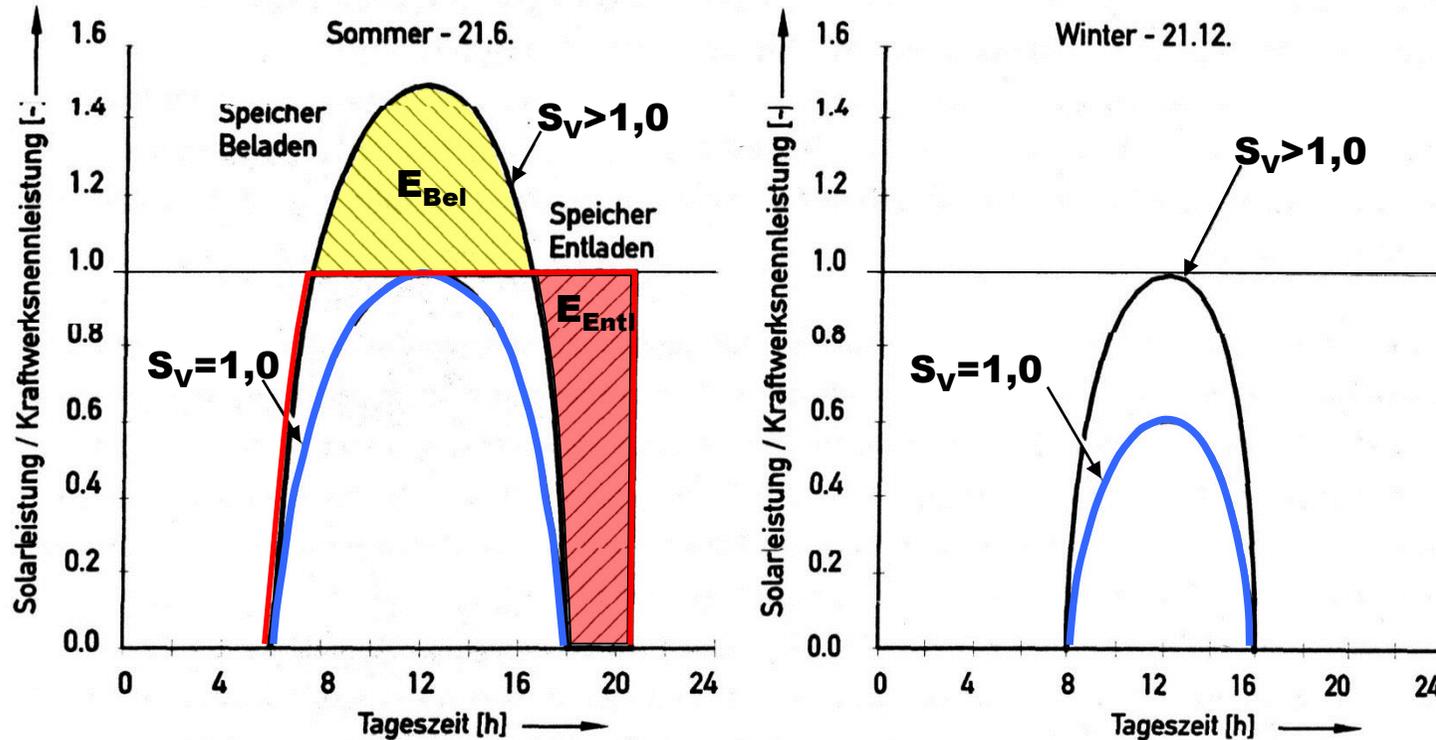
8.7 Solare Turmkraftwerke

8.8 Dish-Stirling-Systeme

8.9 Aufwindkraftwerke

Auswirkung eines Speichers auf ein thermisches Solarkraftwerk

Darstellung der zeitlichen Leistungsabgabe für zwei unterschiedliche große Solarfelder



$$S_V = \frac{P_{th, Solarfeld, Auslegungszeitpunkt}}{P_{th, Nenn, Kraftwerksblock}} \cdot \eta_{Bel, Speichern, Entl} \quad | \quad E_{Entl} = E_{Bel}^*$$

Steigerung der jährlichen solaren Nennleistungsstunden bei entspr. größerem S_V (Auslegungsverhältnis)
Zeitliches Shiften der solaren Stromproduktion vom Tag in den Abend, „Überbrücken“ von durchziehenden
Wolkenfelder. Vergleichmäßigung des Kraftwerkbetriebes bei rein solarer Betriebsweise

Vorwärmen des Kraftwerks beim morgendlichen Anfahren

Frostschutz des Primärkreislaufs bei kalten Nächten (synthet. Wärmeträgeröl erstarrt unterhalb $+12^\circ\text{C}$)

Thermische Energiespeicher für den Hoch & Mitteltemperaturbereich:

1. Speicher fühlbarer Wärme
 - Direkte Speicher - flüssiges Speichermedium übernimmt direkt die Solarenergie
 - Indirekte Speicher - festes Medium speichert, Wärmetauscher führt Wärme ab
2. Dampfspeicher
3. Speicher latenter Wärme
4. Thermochemische Energiespeicher

Solarkraftwerk SEGS 1 in Barstow, Cal.

$P_{el, max} : 14 \text{ MW}_{el}$

WärmeTrägerFluid:

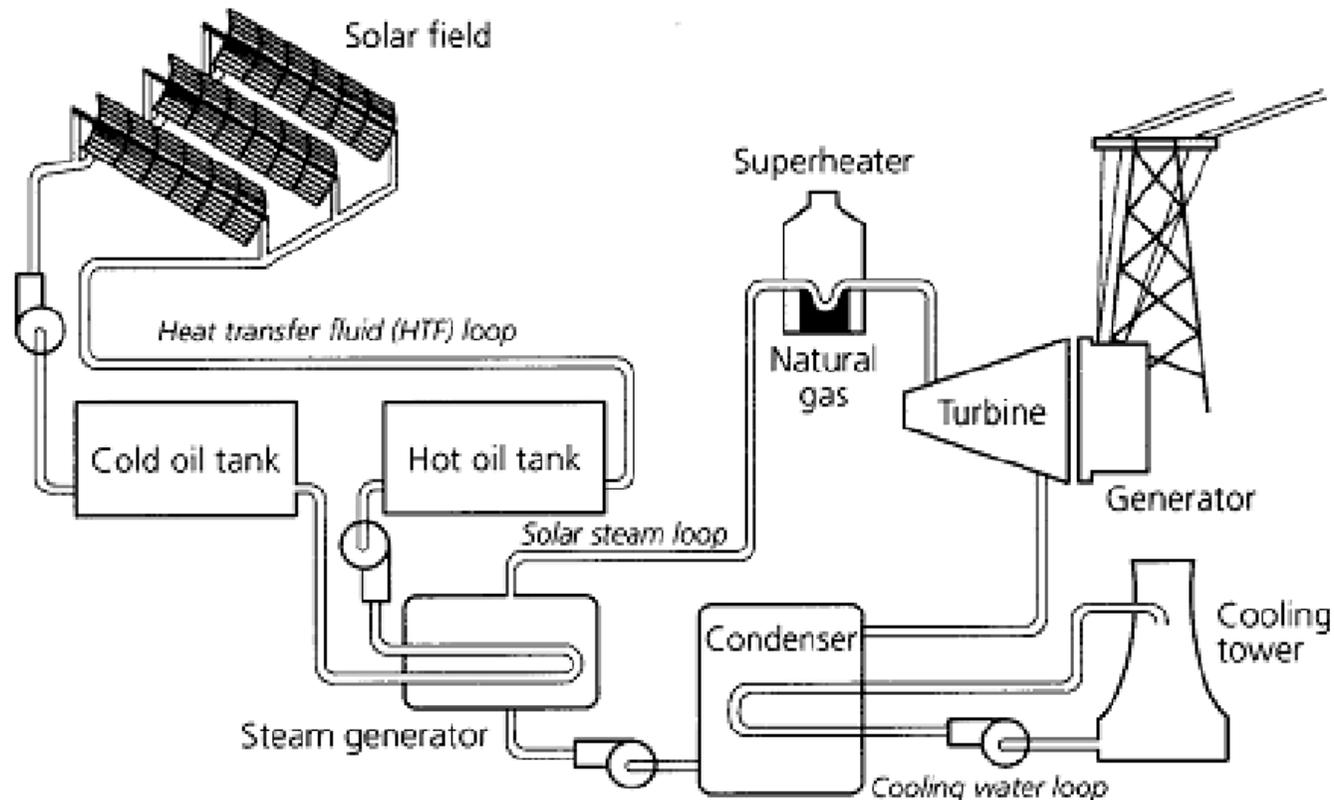
Mineralölbasis

$\vartheta_{WTF, min / max} : 240 / 307^\circ\text{C}$

Direkte Speicherung des WTF in einem 2-Tank Speicher

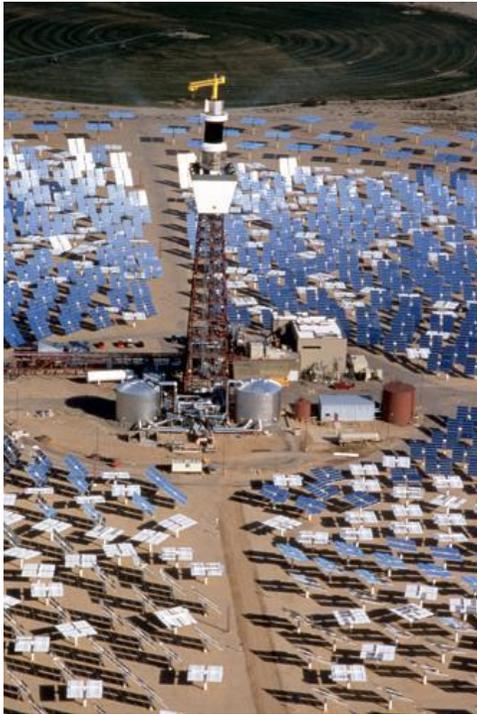
Speicher

Speicherkapaz.: 115 MWh_{th}



Direkte Hoch- und Mitteltemperaturspeicher

2-Tank fl. Salzspeicher „Solar Two“, Barstow, Cal.



Wärmeträgerfluid: NaNO_3 (60%)/ KNO_3 (40%)

Kristallisationspunkt: 221 °C

Betriebstemperatur: 290 °C – 565 °C

Tankvolumen: je 875 m³

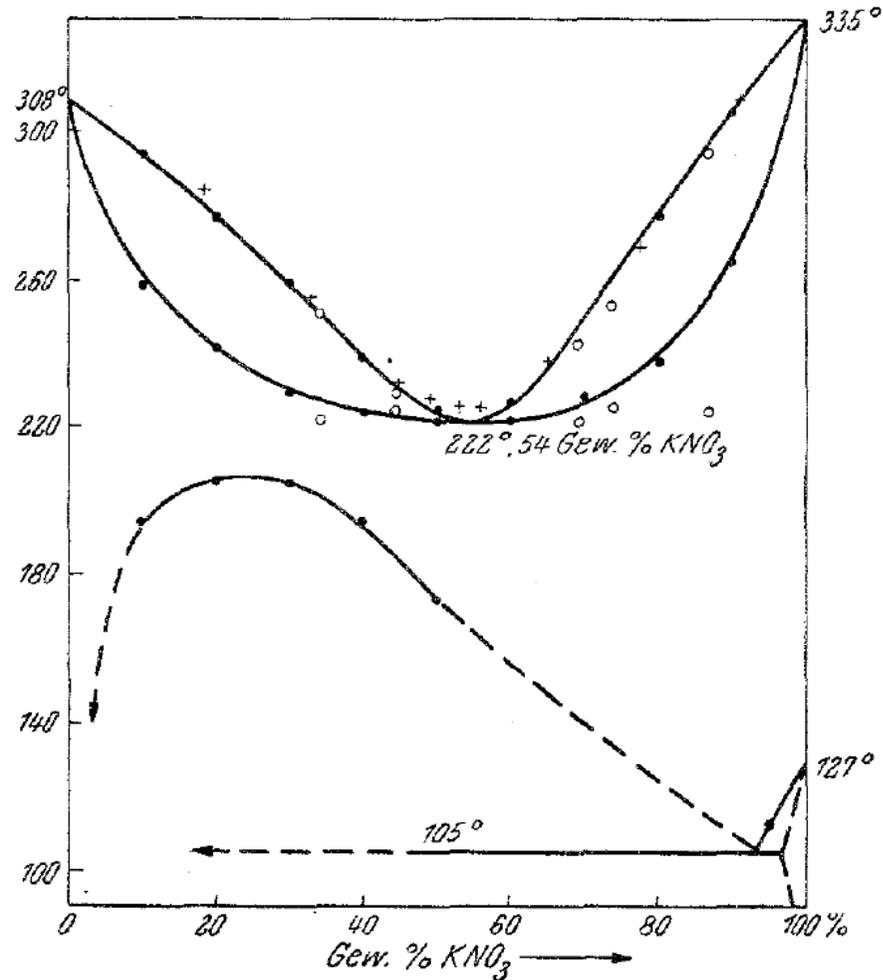
Kapazität: 115 MWh_{th} / 3h Nennlast

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta_{\min/\max}$$

$$\Delta\vartheta(t) = (\Delta\vartheta)_0 e^{-\frac{6k}{\rho \cdot c_p \cdot d} \cdot t}$$

Speicherkapazität mit Masse m und spezif. Wärme c_p

Zeitliche Temperaturabnahme eines kubischen Speichers der Kantenlänge d , Massendichte ρ und mit k -Wert der Wärmeisolation



Quelle: A. Koffler,
Monatshefte für Chemie 86, 643 (1955)

Abb. 2. Schmelzdiagramm NaNO₃-KNO₃. ● Eigene Meßpunkte; + Punkte nach *Briscoe* und *Madgin*; ○ Punkte nach *Tammann* und *Ruppelt*.

Daten flüssiger Speichermedien

Storage Medium	Temperature		Average density (kg/m ³)	Average heat conductivity (W/mK)	Average heat capacity (kJ/kgK)	Volume specific heat capacity (kWh _t /m ³)	Media costs per kg (US\$/kg)	Media costs per kWh _t (US\$/kWh _t)
	Cold (°C)	Hot (°C)						
Liquid media								
Mineral oil	200	300	770	0.12	2.6	55	0.30	4.2
Synthetic oil	250	350	900	0.11	2.3	57	3.00	43.0
Silicone oil	300	400	900	0.10	2.1	52	5.00	80.0
Nitrite salts	250	450	1,825	0.57	1.5	152	1.00	12.0
Nitrate salts	265	565	1,870	0.52	1.6	250	0.50	3.7
Carbonate salts	450	850	2,100	2.0	1.8	430	2.40	11.0
Liquid sodium	270	530	850	71.0	1.3	80	2.00	21.0

Für eine große Speicherkapazität – und dauer sollten die auf das Volumen bezogene spezif. Wärmekapazität und das Speichervolumen möglichst groß sein; der Wärmeinhalt skaliert mit dem Volumen, die Verluste mit der Oberfläche.

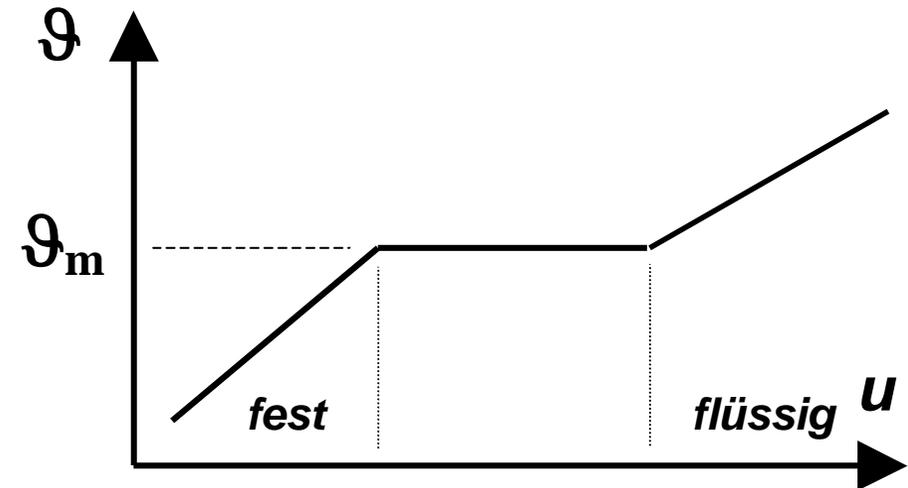
Die Wärmedämmung verlängert stark die nutzbare Dauer der Wärmespeicherung.

Feste Speichermedien für indirekte Speicher

Storage Medium	Temperature		Average density (kg/m ³)	Average heat conductivity (W/mK)	Average heat capacity (kJ/kgK)	Volume specific heat capacity (kWh _t /m ³)	Media costs per kg (US\$/kg)	Media costs per kWh _t (US\$/kWh _t)
	Cold (°C)	Hot (°C)						
Solid media								
Sand-rock-mineral oil	200	300	1,700	1.0	1.30	60	0.15	4.2
Reinforced concrete	200	400	2,200	1.5	0.85	100	0.05	1.0
NaCl (solid)	200	500	2,160	7.0	0.85	150	0.15	1.5
Cast iron	200	400	7,200	37.0	0.56	160	1.00	32.0
Cast steel	200	700	7,800	40.0	0.60	450	5.00	60.0
Silica fire bricks	200	700	1,820	1.5	1.00	150	1.00	7.0
Magnesia fire bricks	200	1,200	3,000	5.0	1.15	600	2.00	6.0

Latentwärmespeicher

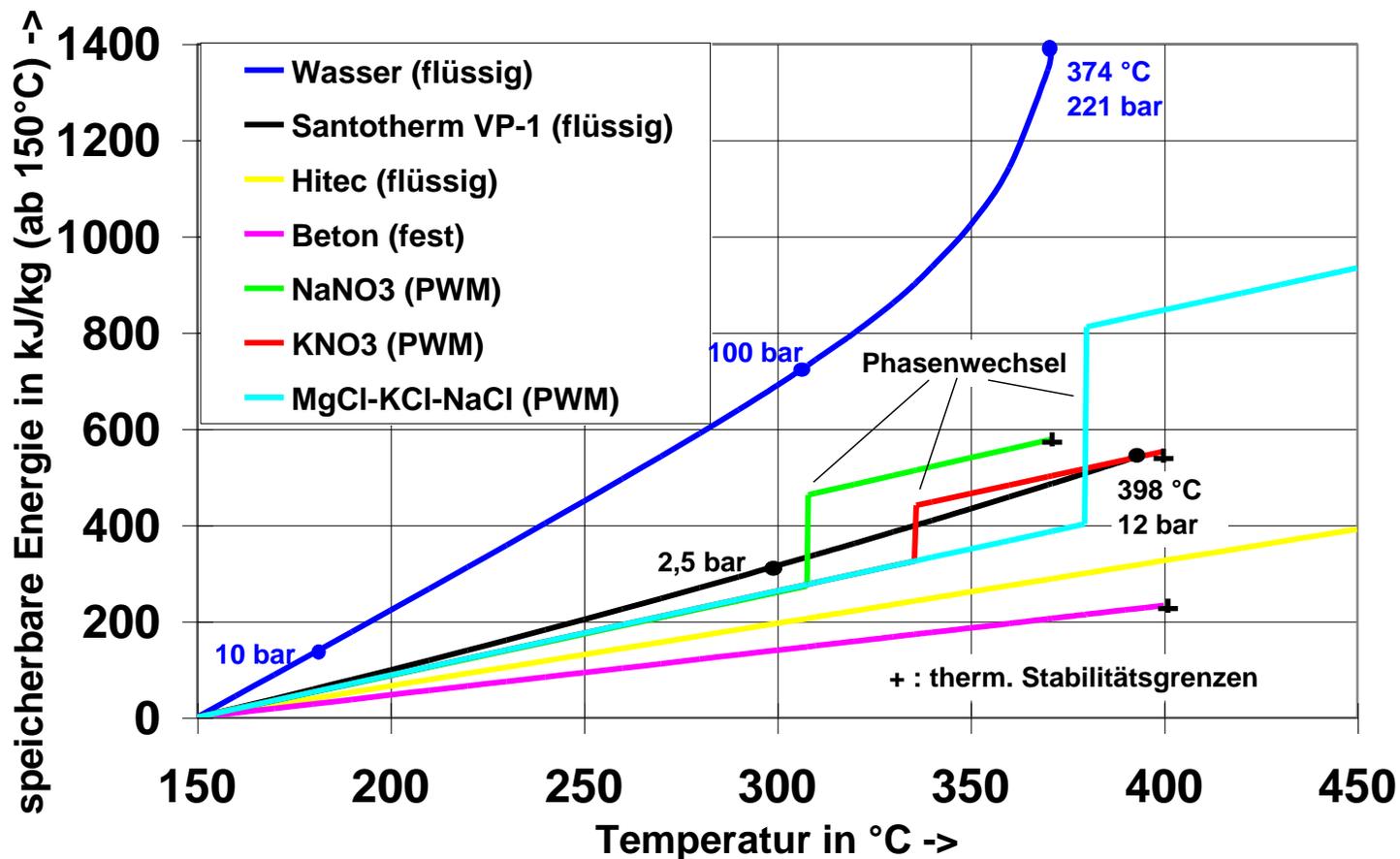
Die Energien, die Speichermaterialien bei einer Phasenänderung von fest nach flüssig unter relativ kleiner Volumen- und Druckänderung oder von flüssig nach dampfförmig aufnehmen und beim Erstarren bzw. Kondensieren abgeben sind wesentlich größer als die reinen Wärmekapazitäten.



$$\text{Speicherkapazität } Q = m * f_{\text{Nutzung}} * (c_{ps,m} * \Delta\vartheta_{\text{min/melt}} + \Delta h_{\text{melt}} + c_{ps,m} * \Delta\vartheta_{\text{melt/max}})$$

Storage Medium	Temperature		Average density (kg/m ³)	Average heat conductivity (W/mK)	Average heat capacity (kJ/kgK)	Volume specific heat capacity (kWh _t /m ³)	Media costs per kg (US\$/kg)	Media costs per kWh _t (US\$/kWh _t)
	Cold (°C)	Hot (°C)						
Phase change media								
NaNO ₃	308		2,257	0.5	200	125	0.20	3.6
KNO ₃	333		2,110	0.5	267	156	0.30	4.1
KOH	380		2,044	0.5	150	85	1.00	24.0
Salt-ceramics (NaCO ₃ -BaCO ₃ /MgO)	500-850		2,600	5.0	420	300	2.00	17.0
NaCl	802		2,160	5.0	520	280	0.15	1.2
Na ₂ CO ₃	854		2,533	2.0	276	194	0.20	2.6

Vergleich verschiedener Speicherarten



Der Phasenwechsel flüssig-gasförmig wird im technischen Maßstab in Heißdampfspeichern genutzt. Der relativ großen gewichtsspezifischen Speicherkapazität von Wasser steht der Aufwand für große Speichervolumen und hohe Drücke entgegen.

8. Solarthermische Kraftwerke

8.1 Einleitung

8.2 Konzentration solarer Strahlung

8.3 Grundlagen Wärmetransport

8.4 Absorberrohre

8.5 Parabolrinnenkraftwerke

8.5.1 Speicherung

8.6 Fresnel-Kollektor-Kraftwerke

8.7 Solare Turmkraftwerke

8.8 Dish-Stirling-Systeme

8.9 Aufwindkraftwerke

Areva Kimberlina Plant

8.50
PV 2016

The 5 megawatt (MW) **Kimberlina Solar Thermal Energy Plant** in Bakersfield, California is the first commercial solar thermal power plant to be built by AREVA Solar, formerly Ausra. The Kimberlina renewable energy solar boiler uses Compact Linear Fresnel Reflector (CLFR) technology to generate superheated steam. Each solar boiler has a group of 13 narrow, flat mirrors, that individually track and focus the sun's heat onto overhead pipes carrying water. The water boils directly into steam. The steam can then spin a turbine to generate electricity or be used as industrial steam for food, oil and desalination processes. The Kimberlina solar boiler currently achieves 750-degree F superheated steam. The next generation solar boiler under construction is designed to achieve 900-degree F superheated steam.



NOVATEC BIOSOL AG was founded in 2006 by engineers with an interest in revolutionising the technology for producing Concentrating Solar Power (CSP) in line with the global shift to renewable energy sources. NOVATEC has developed a patented design for solar fields using unique linear Fresnel collector technology.

NOVATEC BIOSOL's expert team undertakes manufacture, supply and turnkey delivery of direct solar steam generators for a range of applications including power stations, desalination plants and industrial processes.



NOVATEC BIOSOL AG

Herrenstraße 30
76133 Karlsruhe
Germany

Tel.: +49 721 255173-0
Fax: +49 721 255173

PUERTO ERRADO 2 IN SPANIEN

Das 30MW solarthermische Kraftwerk Puerto Errado 2 (PE2) ist seit August 2012 im kommerziellen Betrieb. Das Kraftwerk basiert auf der von Novatec Solar entwickelten Fresnel Kollektor Technologie. Der solare Dampferzeuger von PE2 umfasst eine Spiegelfläche von 302,000m² und ist damit das weltweit größte Fresnel Solarkraftwerk in Betrieb.

Das Kraftwerk PE2 mit einer elektrischen Leistung von 30MW, produziert bis zu 50 Millionen Kilowattstunden Strom pro Jahr. Der Strom wird ausschließlich durch Solarenergie erzeugt und es werden jährlich 16.000 Tonnen CO₂-Emissionen eingespart. Die saubere Energie deckt den Bedarf von über 12.000 Haushalten in Spanien.



Puerto Errado 2, Spanien (April 2012)



Eckdaten zum Solarkraftwerk PE 2

Hersteller	Novatec Solar
Produktbezeichnung	Nova-1
Bauart	28 Reihen lineare Fresnel-Kollektoren, konventionelle Dampfturbinenanlage und Generator
Solarfeldlänge	940 m
Netto-Aperturfläche	302.000 m ²
Betriebstemperatur	270 °C
Betriebsdruck	55 bar
Thermische Spitzenleistung	150 MW _{th}
Elektrische Spitzenleistung	30 MW _{el}
Energieertrag	49 GWh/Jahr