

Übersicht über die Vorlesung Solarenergie

Vorläufige Terminplanung Vorlesung „Solarenergie“ WS 2005/2006
Stand: 10.11.2005

Termin	Thema	Dozent
Di. 25.10.	Wirtschaftliche Aspekte/Energiequelle Sonne	Lemmer/Heering
Fr. 04.11.	-	verschoben wg. Krankheit
Di. 01.11.	Allerheiligen	-
Di. 08.11.	Symposium Automobile Displaytechnik	-
Fr. 11.11.	Halbleiterphysikalische Grundlagen	Lemmer
Di. 15.11.	Kristalline pn-Solarzellen	Heering
Fr. 18.11.	Elektrische Eigenschaften	Heering
Di. 22.11.	Optimierung kristalliner Solarzellen	Lemmer
Fr. 25.11.	Technologie kristalliner Solarzellen	Lemmer
Di. 29.11.	Anorganische Dünnschichtsolarzellen	Lemmer
Di. 6.12.	Organische Dünnschichtsolarzellen	Lemmer
Fr. 9.12.	Third generation Photovoltaics	Lemmer
Di. 13.12.	Photovoltaische Systeme I	Heering
Fr. 16.12.	Photovoltaische Systeme II	Heering
Di. 20.12.	Solarkollektoren	Heering
	Weihnachtsferien	
Di. 10.01.	Passive Sonnenenergienutzung	Heering
Di. 17.01.	Solarthermische Kraftwerke I	Lemmer
Fr. 20.01.	Energiespeiche/Solarchemie	Heering
Di. 24.01.	Kostenrechnungen zu Solaranlagen	Heering
Di. 31.01.	Energieszenarien	Lemmer
Anfang Februar	Exkursion	Heering/Lemmer

Solarthermische Systeme

Thermische Nutzung der Solarenergie:

- **Solare Schwimmbaderwärmung**

direkt oder über „schwarze“ Absorber

- **Solare Brauchwassererwärmung**

über nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren

- **Solare Niedertemperaturheizung für Räume**

über nicht konzentrierende Luftkollektoren

- **Solare Prozesswärme**

über konzentrierende Kollektoren; oberflächlich absorbierende Rohrreceiver oder Gas-Partikel-Receiver mit transparenten Wänden und Volumenabsorption

- **Solarthermische Stromerzeugung**

über Solartower mit Receiver, der den aufzuheizenden Wärmeträger (z.B. Na) enthält, und Heliostaten (Spiegelfeld) zur Konzentration der Solarstrahlung auf dem Receiver (2000-fach und höher, $T_{\text{receiver}} < 1800 \text{ K}$, Leistung $> 10 \text{ MW}$)



Plataforma Solar de Almería

Kollektorbauarten

nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren

Einfachabsorber



Flachkollektoren



1 Abdeckung

2 Abdeckungen

Vakuum-Flachkollektor

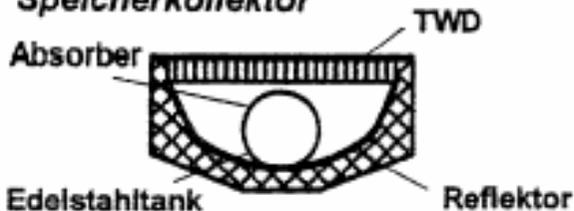
Abstützung der Abdeckung



Vakuum-Röhrenkollektor

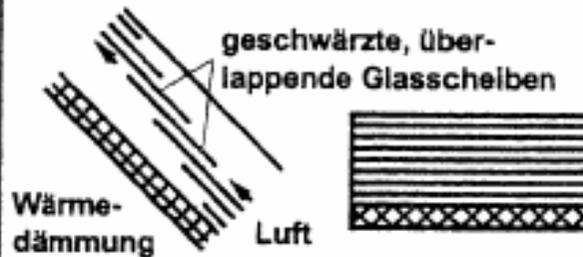


Speicherkollektor

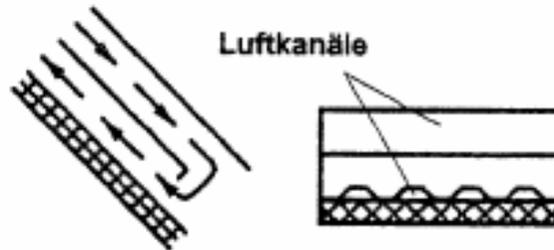


nicht konzentrierende Luftkollektoren

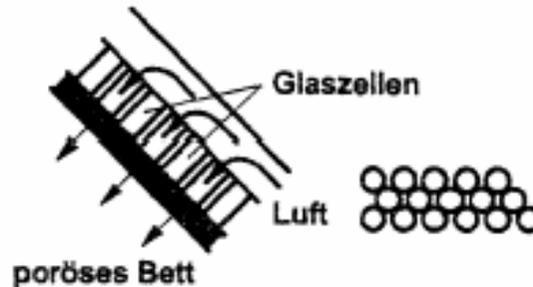
Ein-Pass-Typ



Zwei-Pass-Typ



Glaszellen/Poröses Bett



konzentrierende Kollektoren

feststehend

Flachspiegel Hohlspiegel Evakuierte Röhre



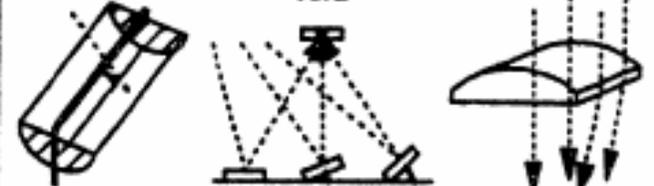
$C = 1..2$

$C = 2..15$

$C = 1..3$

einachsig nachgeführt

Paraboltrog Flachspiegel-feld Zylinderlinse



$C = 20..100$

$C = 20..80$

$C = 10..40$

zweiachsig nachgeführt

Heliostatenfeld Paraboloid-Spiegel Sphärischer Hohlspiegel

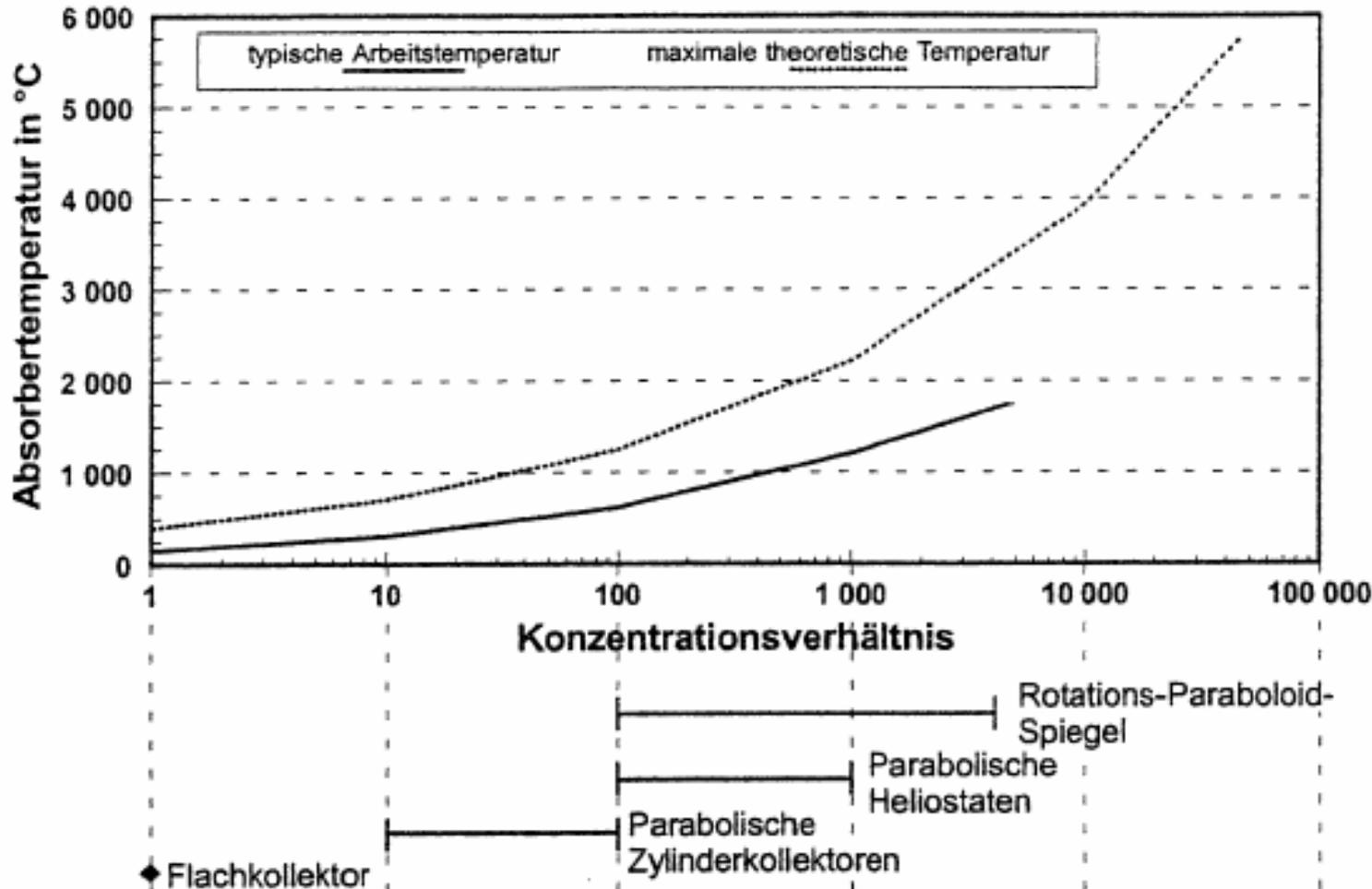


$C = 100..1000$

$C = 100..5000$

$C = 100..300$

Absorberrtemperaturen



"Parabolic trough collectors producing directly superheated steam (Courtesy of DISS - 2)"

Entsprechend der Anwendung werden unterschiedliche hohe Absorberrtemperaturen angestrebt. Sie sind abhängig von der Oberfläche und vom Konzentrationsverhältnis. Bei niedrigeren Temperaturen werden Flüssigkeiten, bei höheren Gase als Wärmeträgermedium verwendet.

Wärmespeicherung

Die solare Wärme muss vor der Nutzung meist gespeichert werden.

Durch Temperaturänderung $\Delta\delta$ in einen Körper der Masse m eingebrachte bzw. abtransportierte Wärmeleistung

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = c \cdot \frac{dm}{dt} \cdot \Delta\delta + c \cdot m \cdot \frac{d\Delta\delta}{dt}$$

Wasser besitzt ein besonders großes Wärmespeichervermögen

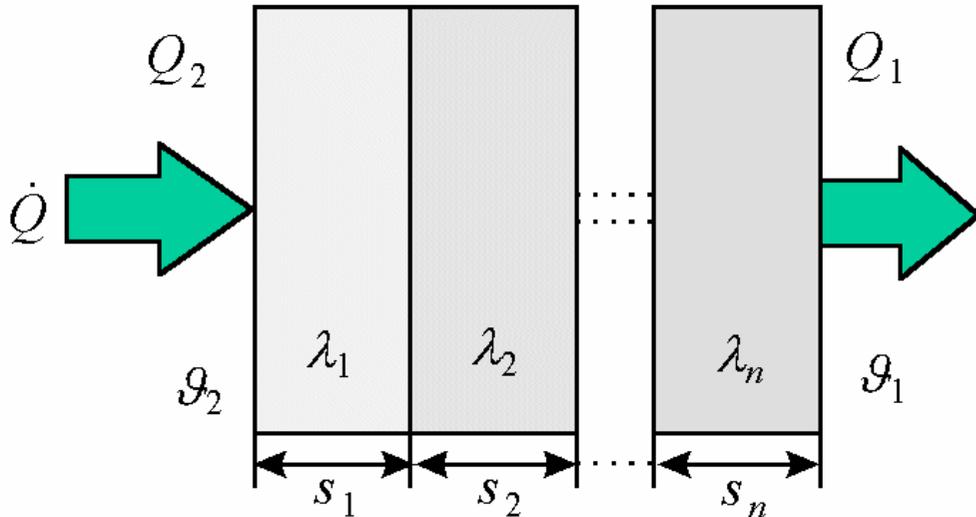
Bezeichnung	c in Wh/(kg K)	c in kJ/(kg K)	Bezeichnung	c in Wh/(kg K)	c in kJ/(kg K)
Aluminium	0,244	0,879	Kupfer	0,109	0,394
Eis (-20 °C...0°C)	0,58	2,09	Luft (trocken, 20 °C)	0,280	1,007
Eisen	0,128	0,456	Messing	0,107	0,385
Ethanol (20 °C)	0,665	2,395	Sand, trocken	0,22	0,80
Gips	0,31	1,1	Wasser	1,163	4,187
Glas, Glaswolle	0,233	0,840	Wärmeträger auf der Basis von 1,2 Propylenglykol		
Holz (Fichte)	0,58	2,1	Tyfocon55 % (50 °C)	0,96	3,45

Spezifische Wärmekapazitäten verschiedener Stoffe im Bereich von 0 °C bis 100 °C

Wärmedurchgang

Für eine längere Wärmespeicherung wird eine ausreichende Wärmeisolierung nötig.

Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme



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

$$\dot{Q} = k \cdot A (\delta_2 - \delta_1)$$

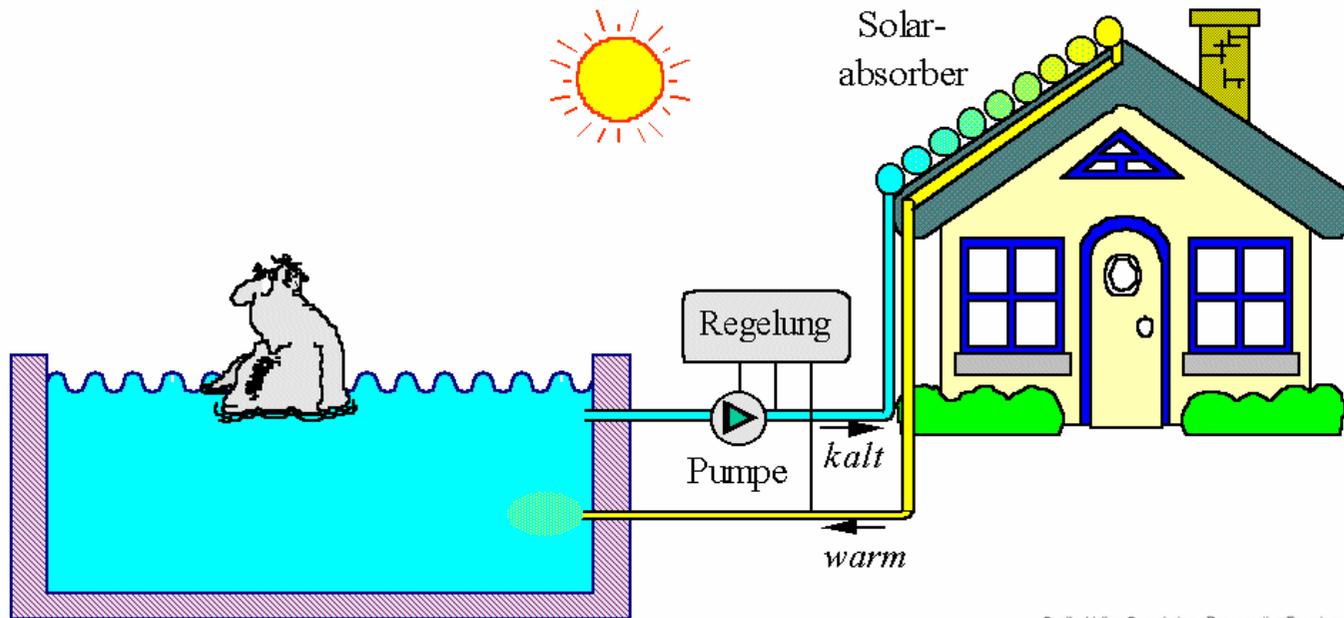
$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} \right)^{-1}$$

Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert)

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

Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Stoffe

Solare Schwimmbadbeheizung



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Zweipunktregelung:

Oberhalb einer gew. Temperaturdifferenz zwischen Becken- und Absorbertemperatur wird die Pumpe eingeschaltet.

In der Regel ist nur eine Temperaturerhöhung von wenigen Graden erforderlich!

Geschwärzte wasserdurchflossene Rohre aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder stabileren Ethylen-Propylen-Dien-Monomeren (EPDM) werden auf einer großen Fläche ausgelegt; Absorberfläche ca. 50 – 80% der Beckenoberfläche.

Bei Stützwassertemperatur von 23 °C: Wärmebedarf im Freien von 150 – 450 kWh/m². Auf eine Zusatzheizung kann in der Regel verzichtet werden. Bei 2000 m² lassen sich bis zu 75000 l Heizöl/Saison einsparen.

Solare Brauchwassererwärmung

Für Brauchwasser wird ein höheres Temperaturniveau benötigt.

Bloße, primitive Absorber, z.B. Solardusche (schwarzer Sack mit Wasserinhalt oberhalb der Zapfstelle), hätten zu hohe Konvektionsverluste, Verluste durch Wind, Regen und Schnee und vor allem Strahlungsverluste bei höherer Kollektortemperatur.

Alternative:

Flachkollektoren

Vakuum-Flachkollektoren

Vakuum-Röhrenkollektoren

Speicherkollektoren

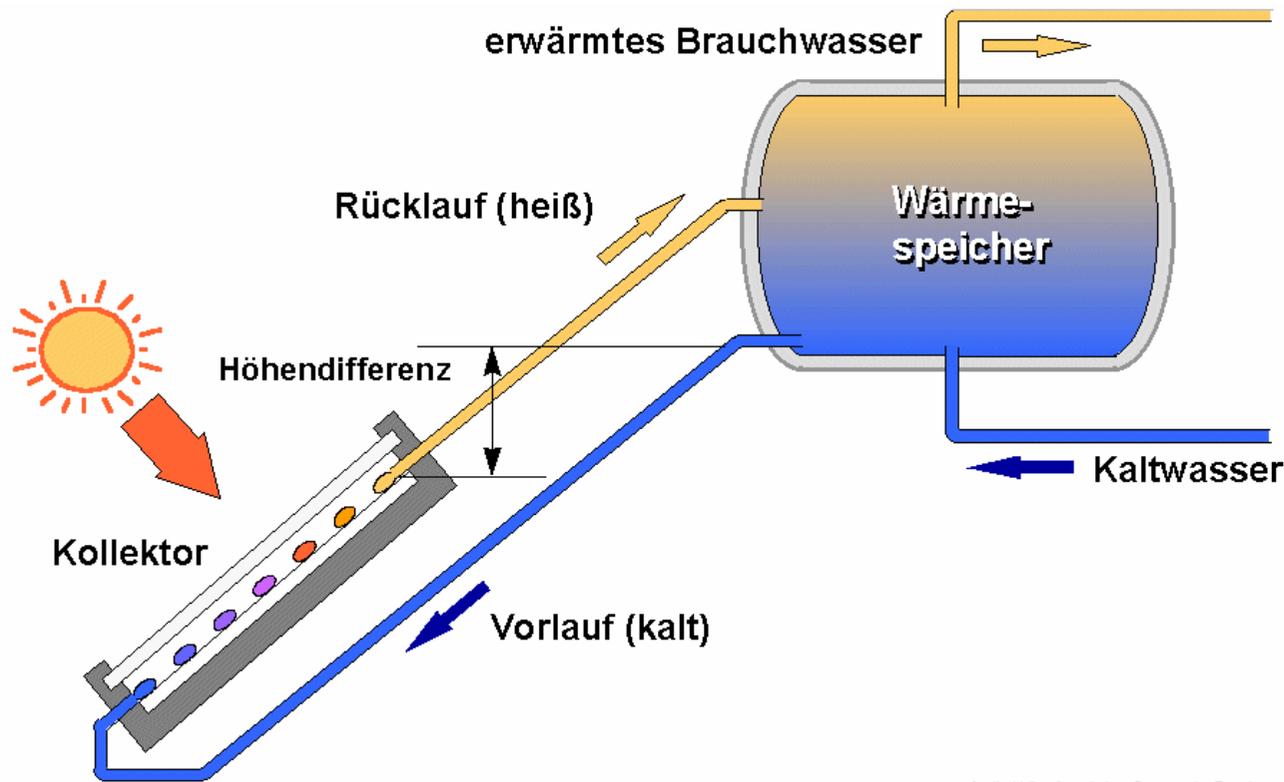
Weitere Komponenten:

Speicher – Kollektorstärke zum Speichern meist zu klein!

Pumpe – Ausnahme: Schwerkraftanlage

Regelung für konstantes Temperaturniveau

Thermosiphonanlagen



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Kollektor ist stets **tief**, gelagert, mindestens 0,6 m, **als der Wärmespeicher**, damit aufgrund der Schwerkraft warmes Wasser in den Wärmespeicher aufsteigen und kaltes Wasser in den Kollektor abfallen kann. Es darf, insbesondere nachts, kein Rückwärtslauf einsetzen!

Nachteile:

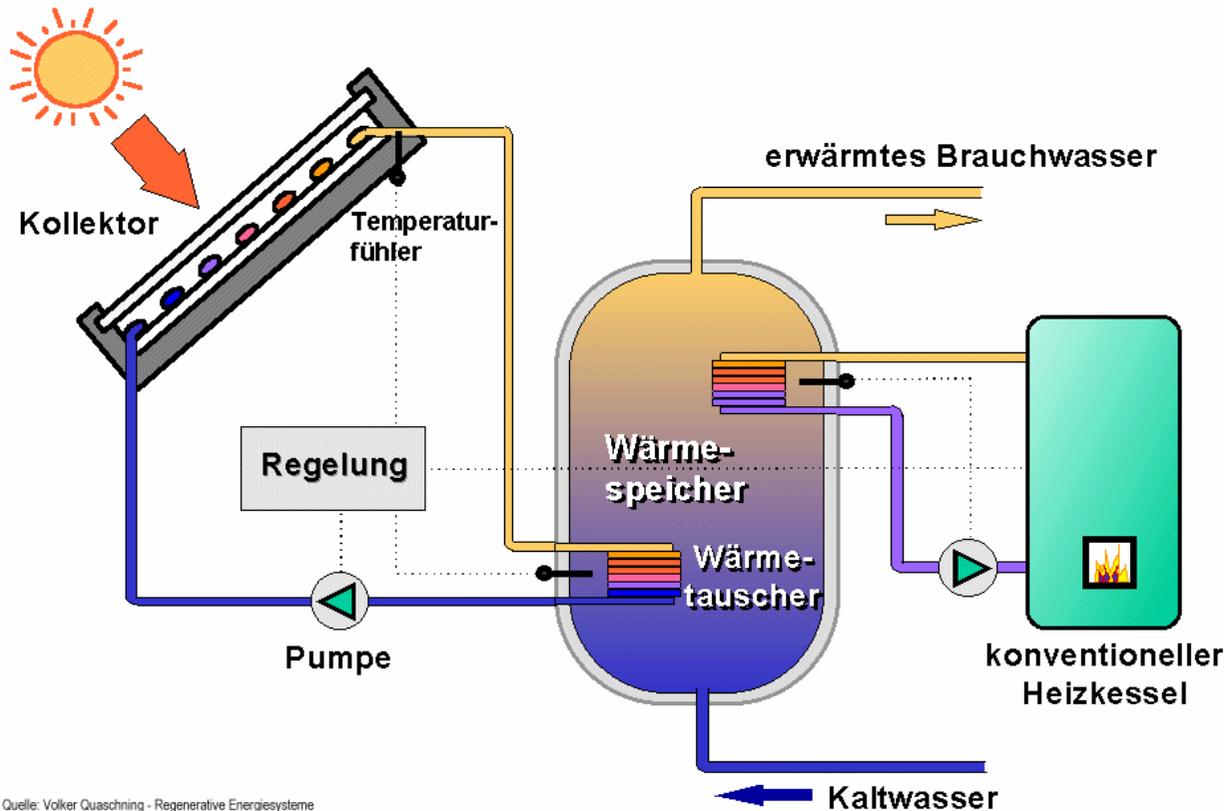
System reagiert bei mehr als 10 m² Kollektorfläche zu träge.

Schwerer Speicher ist hoch zu montieren.

Hohe Temperaturen im Speicher und Kollektorkreislauf mindern Wirkungsgrad.

Vorteil: Keine Pumpe erforderlich und kein Stromverbrauch dadurch.

Anlagen mit Zwangsumlauf



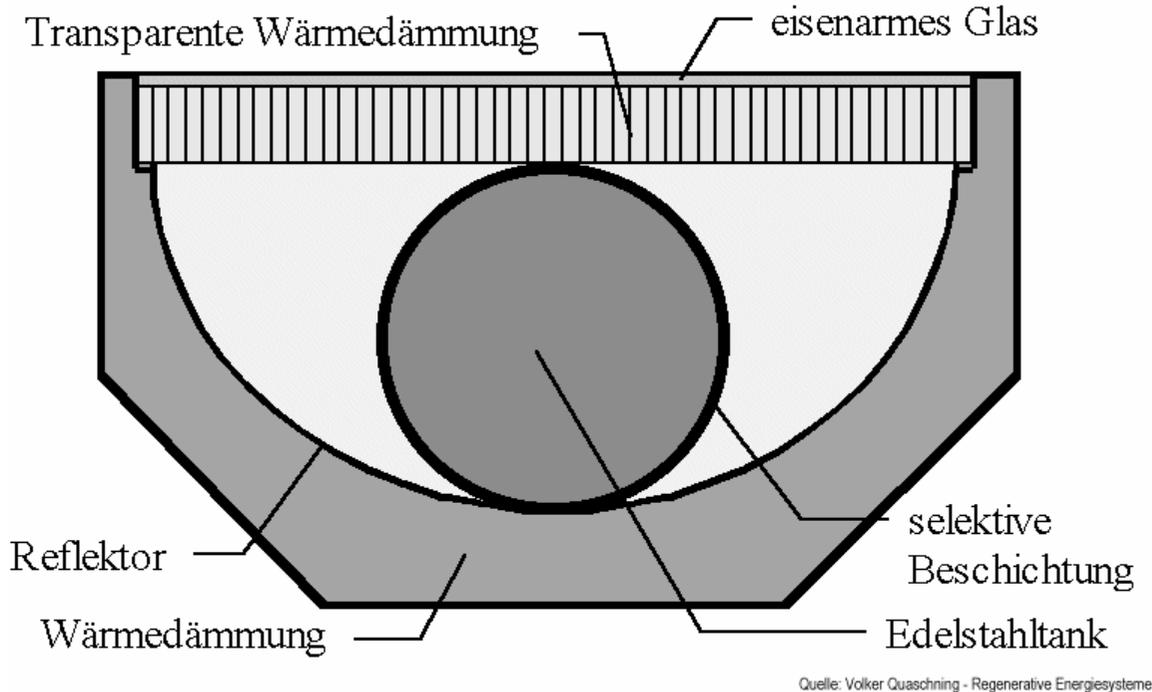
Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Zweikreissystem mit Zwangsumlauf:

Zur Vermeidung des Einfrierens von Wasser bei Frost fließt im Solarkreislauf mit Frostschutz (Glykol) versehenes Wasser, im getrennten Brauchwasserkreislauf reines Wasser.

Pumpe schaltet ein, wenn die gemessene Temperatur im Kollektor 5 – 10 °C höher als die Speichertemperatur ist; sie schaltet ab unterhalb einer gewissen Temperaturdifferenz. Schwellwerte sollten nicht zu nahe liegen, damit bei niedrigen Bestrahlungen nicht ständig ein- und ausgeschaltet wird. Kollektorserienschaltung erhöht das Temperaturniveau und erniedrigt den Gesamtmassenstrom (Low-Flow).

Speicherkollektoren



Schwerer **Edelstahltank** als Absorber und Speicher im Kollektor; 160 l Volumen auf ca. 2 m². Besonderer Wärmespeicher entfällt.

Selektive Beschichtung absorbiert im UV, VIS und NIR, emittiert aber kaum im MIR und FIR.

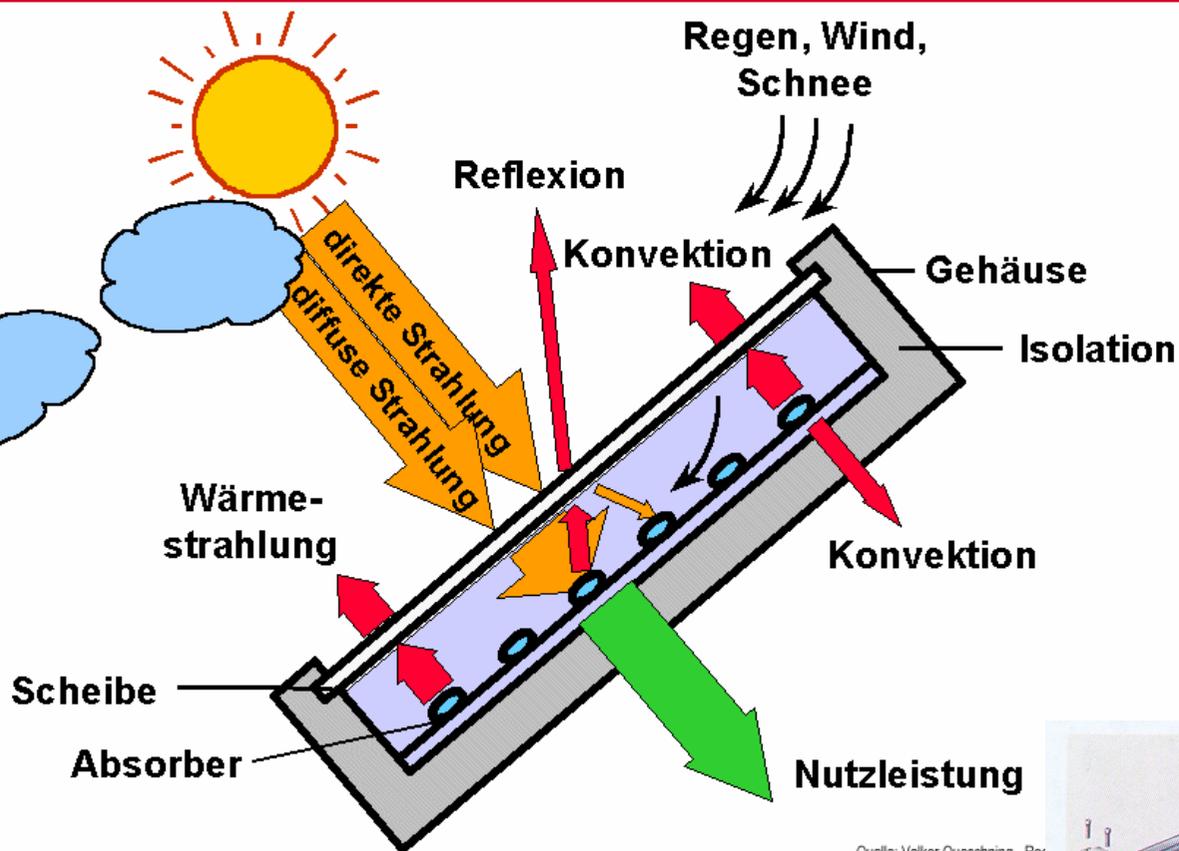
Reflektoren konzentrieren die Solarstrahlung auf den Speicher.

Zur weiteren Reduktion der Wärmeverluste:

•Wärmedämmung auf der Rückseite

•**Transparente Wärmedämmung** (TWD) auf der Einstrahlungsseite: Aerogranulat (20 mm) oder Polycarbonat in Waben- oder Kapillarstruktur besitzen wesentliche kleine Wärmedurchgangskoeffizienten $k = 0,7 - 0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ als Fensterverglasungen mit $k = 1,0 - 5,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, aber etwas schlechtere optische Transmission.

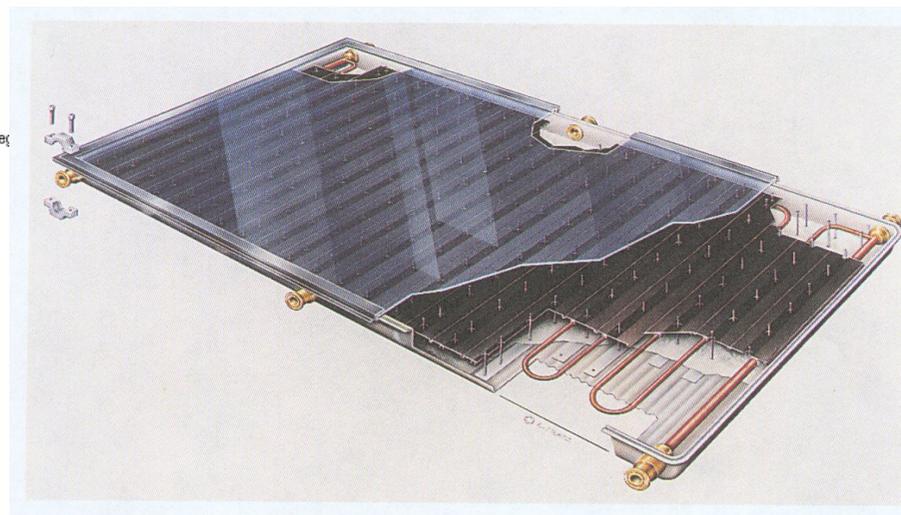
Flachkollektoren



Absorber befindet sich in einem **geschlossenen Gehäuse**, um die Verluste durch Konvektion und Wärmestrahlung zu begrenzen.

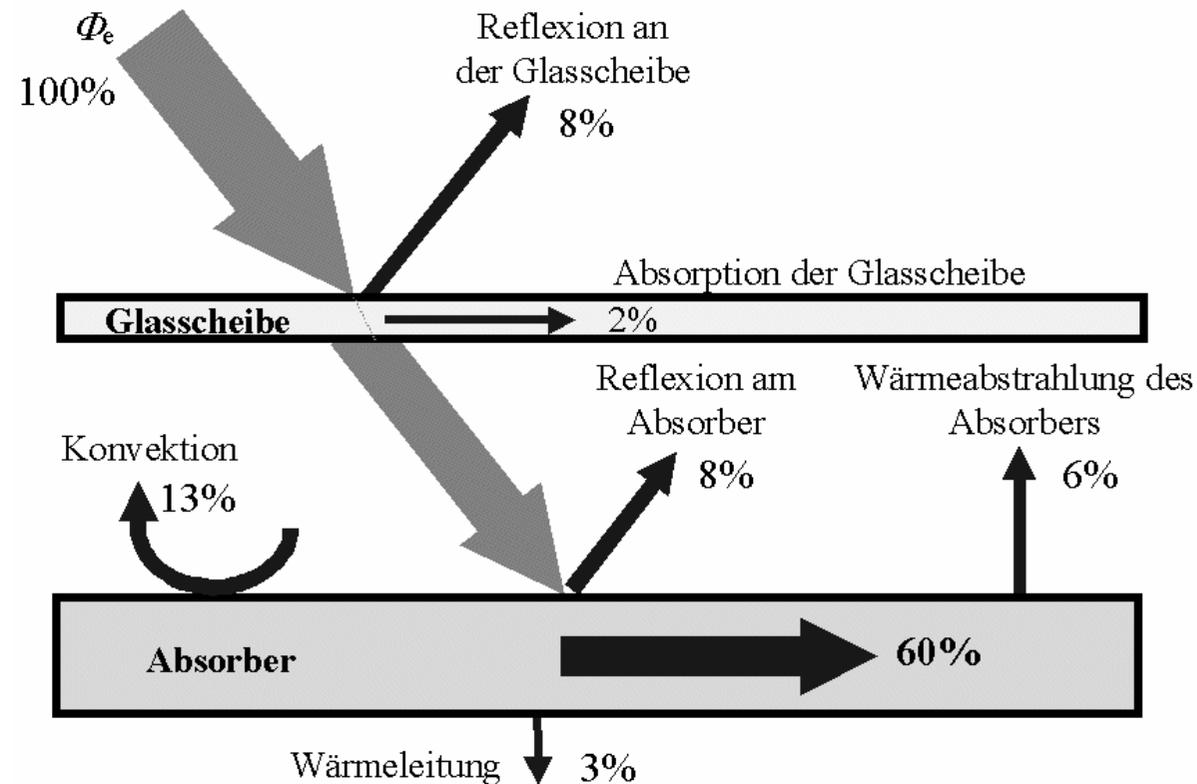
Gehäuse aus Kunststoff oder Blech, rückseitig mit Polyurethan-Hartschaumplatten oder Mineralfaserplatten wärmegeklämmt.

Quelle: Volker Quaschnig - Reg



Meist verwendeter Kollektortyp zur Brauchwassererwärmung

Energiebilanz des Flachkollektors



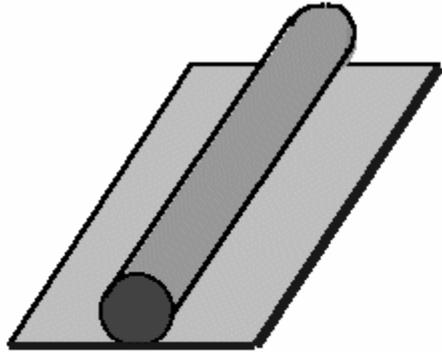
Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Frontscheibe soll die Solarstrahlung durchlassen, die Wärmestrahlung des Absorbers, wie im Treibhaus, zurückhalten. Dies wird erreicht mit eisenarmem Solarglas – hohe Transmission im VIS, starke Absorption im IR.

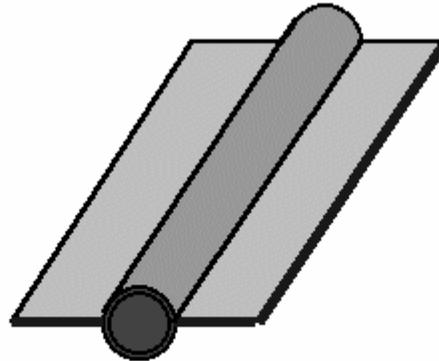
Besser: **In₂O₃** oder **ZnO₂** beschichtete Gläser mit guter Transmission im VIS, aber hoher Reflexion im IR.

Ca. 60% der einfallenden Strahlungsleistung ist thermisch nutzbar.

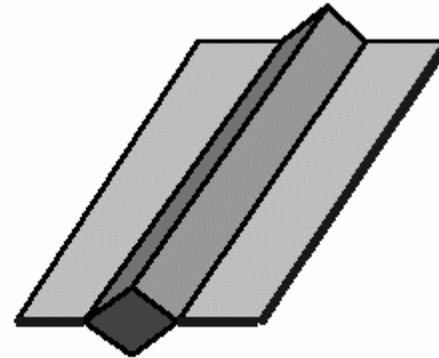
Bauformen von Solarabsorbern



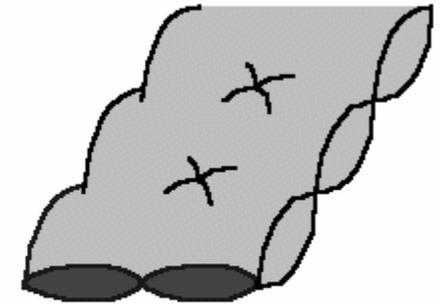
aufgelötetes
Kupferrohr



eingepresstes
Kupferrohr



Aluminium
Rollbond



Kissenabsorber

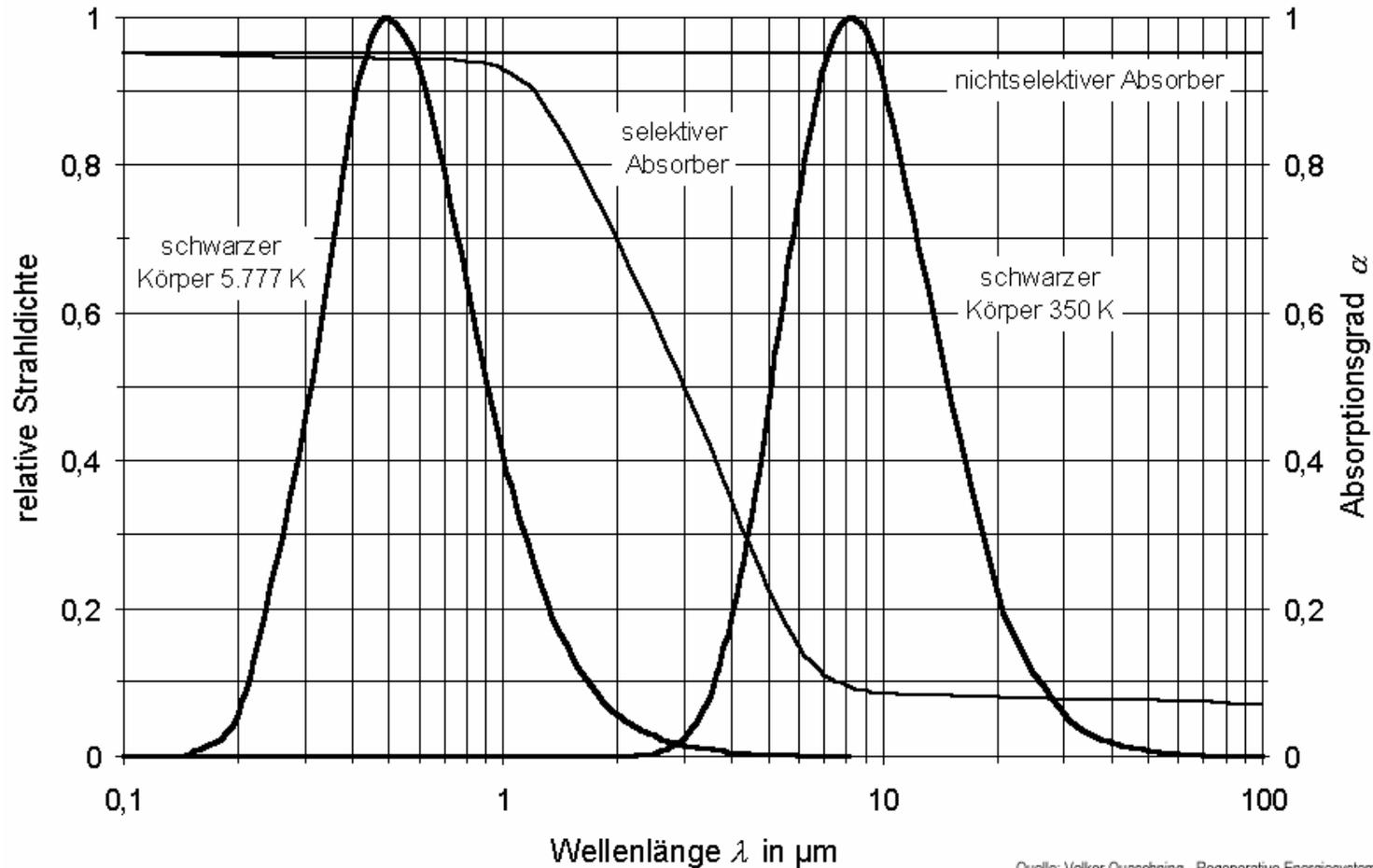
Fahnenabsorber

Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Ziel: Große Absorberfläche, kleines Absorbervolumen.

Wegen Leerlauftemperaturen von etwa 200 °C sind die Absorber fast ausschließlich aus Kupfer, Stahl oder Aluminium (korrosionsanfällig) gefertigt.

Emission und Absorption selektiver und nichtselektiver Absorber

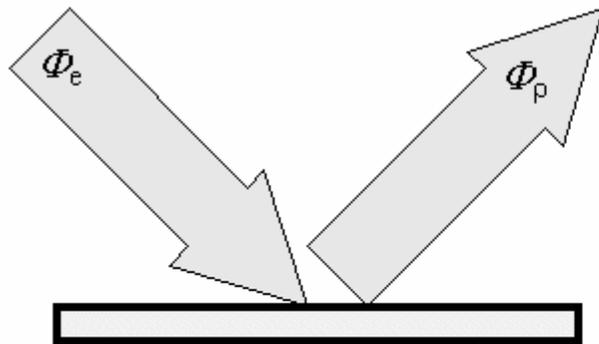


Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

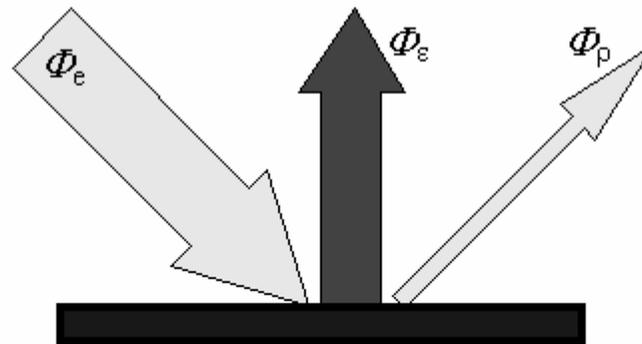
Hauptemission der Sonne – Schwarzer Körper der Temperatur von 5777 K - bei Wellenlängen $< 2 \mu\text{m}$. Absorptionsgrad sollte dort groß sein!

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

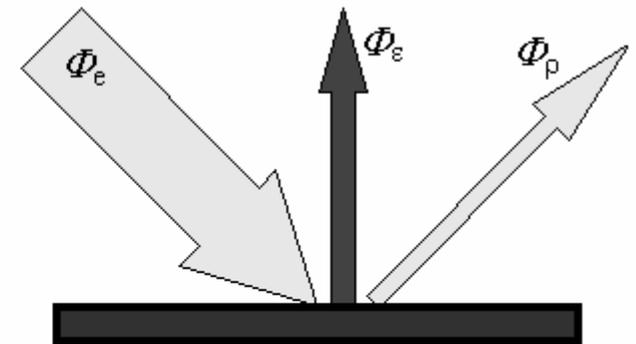
Selektive Absorberbeschichtung



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.

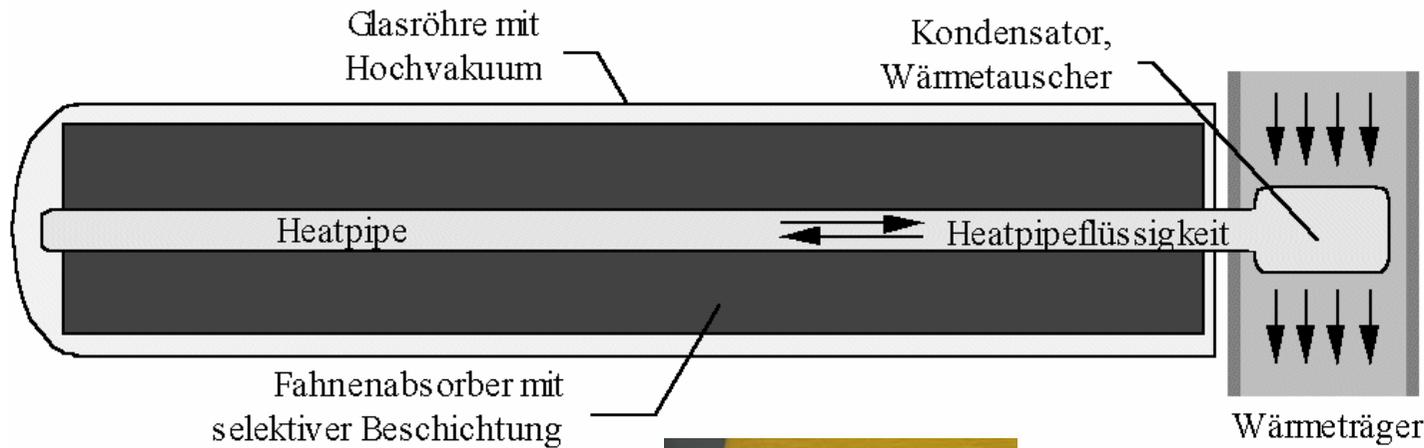
Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

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

Heute übliche Absorberbeschichtung: TiNOX

Zur Verhinderung der Konvektion kann das Kollektorgehäuse auch evakuiert werden – Vakuum-Flachkollektor. Glasabdeckung muss abgestützt werden!

Vakuumpipenkollektor

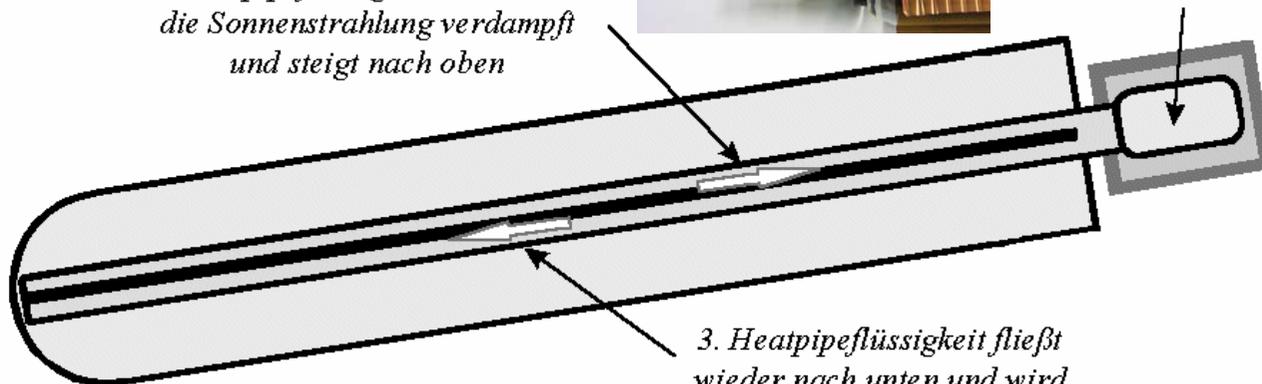


Ansicht von oben



1. Heatpipeflüssigkeit wird durch die Sonnenstrahlung verdampft und steigt nach oben

2. Heatpipeflüssigkeit gibt Wärme an den Solar-kreislauf ab und kondensiert



Ansicht von der Seite

3. Heatpipeflüssigkeit fließt wieder nach unten und wird erneut erwärmt

In einer Glasröhre lässt sich ein Hochvakuum besser herstellen und über eine längere Zeit halten als in einem Vakuum-Flachkollektor.

Gegen eindringenden Wasserstoff werden Getter eingesetzt..

Heat-Pipe in Schräglage und meist mit Methanol gefüllt transportiert Wärme zum Wärmetauscher. Auch gibt es Kollektoren mit durchlaufendem Wärmeträgerrohr ohne Schräglage und Wärmetauscher.

Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad

$$\dot{Q}_{KN} = \tau \cdot (1 - \rho) \cdot A_K \cdot E - \dot{Q}_V = \eta_o \cdot A_K \cdot E - \dot{Q}_V \quad \text{Kollektornutzleistung}$$

$$\eta_o = \alpha \cdot \tau$$

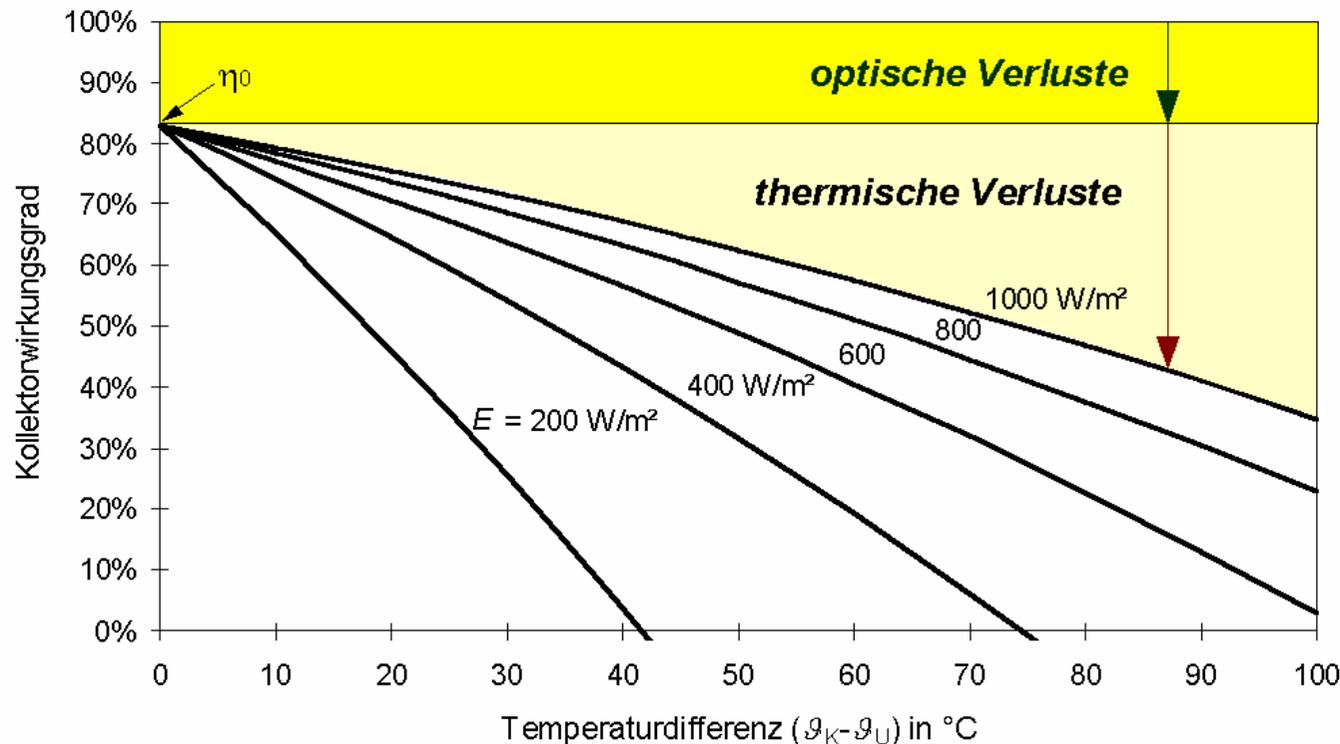
$$\dot{Q}_V = k_0 \cdot A_K \cdot (\delta_K - \delta_U) + k_1 \cdot A_K \cdot (\delta_K - \delta_U)^2 \quad \text{Verlustleistung durch Konvektion + Strlg.}$$

$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_{KN}}{A_K \cdot E} = \eta_o - \frac{\dot{Q}_V}{A_K \cdot E} \quad \text{Kollektorwirkungsgrad}$$

Thermische Verluste wachsen mit steigender Temperaturdifferenz vom Kollektor zur Umgebung.

$$\eta_K (\delta_K - \delta_U) = 0$$

Kollektorstillstandstemperatur um so niedriger je kleiner die Bestrahlungsstärke ist; z.B.
 $E = 400 \text{ W/m}^2: \delta_{K0} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$



Kennwerte unterschiedlicher Flüssigkeitskollektoren

	Optischer Wirkungsgrad	Thermischer Verlustfaktor in $W/(m^2 K)$	Typ. Temperaturbereich ^a in $^{\circ}C$	Aufwand für Herstellung	Typische Anwendung
Einfachabsorber ^b	0,92	12 – 17	0 – 30	klein	FB
Flachkollektor 1 ^c	0,80 – 0,85	5 – 7	20 – 80	mittel	WW
Flachkollektor 2 ^d	0,65 – 0,70	4 – 6	20 – 80	mittel	WW
Flachkollektor 3 ^e	0,75 – 0,81	3,3 – 4,0	20 – 80	mittel	WW, RH
Vakuum-Flachkollektor	0,72 – 0,80	2,4 – 2,8	50 – 120	groß	WW, RH, PW
Vakuum-Röhrenkollektor	0,64 – 0,80	1,5 – 2,0	50 – 120	sehr groß	WW, RH, PW
Speicherkollektor ^f	ca. 0,55	0,55	20 – 70	sehr groß	WW

FB Freibad; WW Brauchwarmwasser; RH Raumheizung; PW Prozesswärme; ^a mittlere Arbeitstemperaturen; ^b schwarz, nicht selektiv, nicht abgedeckt; ^c nicht selektiver Absorber, einfache Abdeckung; ^d nicht selektiver Absorber, zweifache Abdeckung aus Glas und Unterspannfolie; ^e selektiver Absorber, einfache Abdeckung; ^f Prototyp ISE.

Solarer Deckungsgrad

Außer den Konvektions- und Strahlungsverlusten des Kollektors entstehen **Verluste**

$Q_{LA} + Q_Z$ in den **Rohrleitungen** beim Aufheizen der Rohre und Zirkulation des Wärmeträgermediums durch Wärmeübergang nach außen

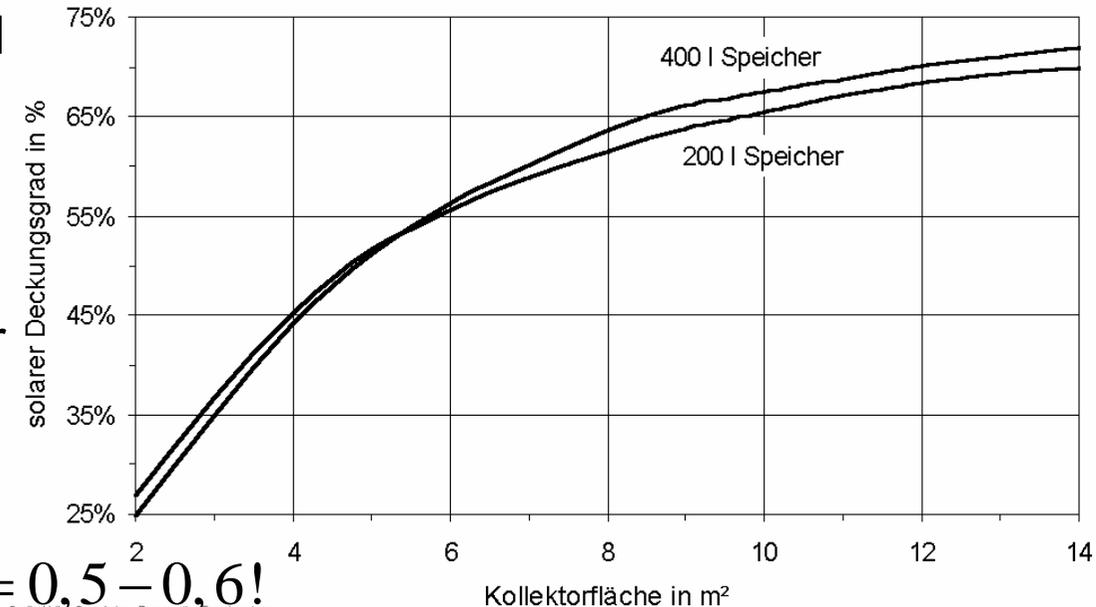
Q_{Sp} im **Speicher** durch Wärmeübergang durch die partiell isolierende Dämmschicht; Verluste um so größer je weiter die Speichertemperatur über der Außentemperatur liegt. Bei offenen Speicherbecken (Schwimmbad) kommen hinzu die Konvektions- und Strahlungsverluste und die dominanten Verdunstungsverluste.

Wird eine Nutzwärme Q_N gebraucht und eine Kollektornutzenergie Q_{KN} bereitgestellt, so wird eine Zusatzenergie

$$Q_{zu} = Q_N + Q_{LA} + Q_Z + Q_{Sp} - Q_{KN}$$

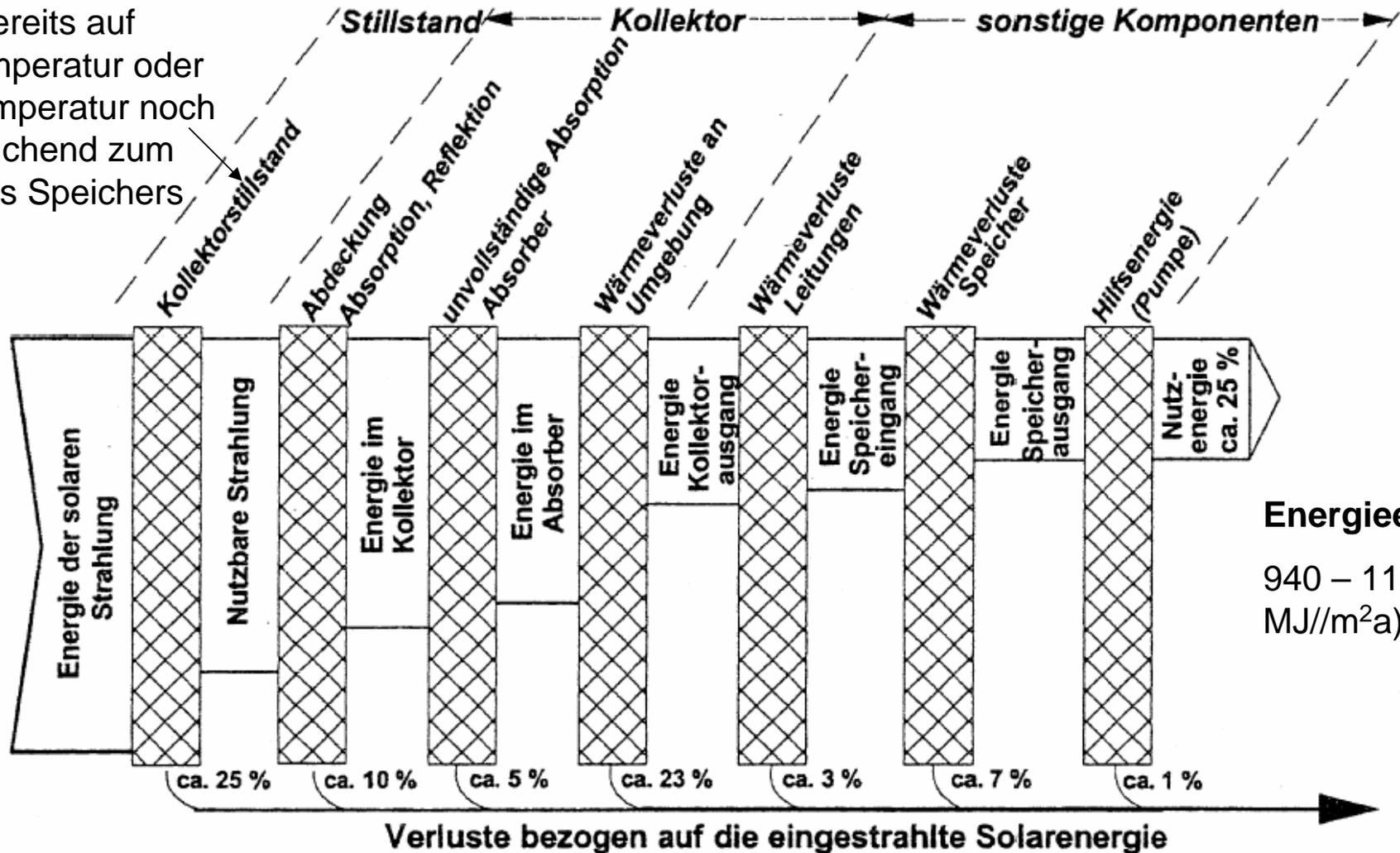
benötigt. Der Anteil der an den Speicher abgegebenen Energie zum Gesamtenergiebedarf heißt **solarer Deckungsgrad**

$$SD = \frac{Q_{KN} - Q_{LA} - Q_Z}{Q_N + Q_{Sp}} = 1 - \frac{Q_{zu}}{Q_N + Q_{Sp}} = 0,5 - 0,6!$$



Energiefluss einer solarthermischen Anlage

Speicher bereits auf Maximaltemperatur oder Kollektortemperatur noch nicht ausreichend zum Beladen des Speichers



6 m² Flachkollektor mit Zwangsumlauf für Brauchwassererwärmung eines Haushalts;
SD > 0,9 im Sommer, SD < 0,15 im Winter, Verlustangaben im Jahresmittel

Technische Daten solarthermischer Flachkollektoranlagen

System ^a zur Brauchwasser- und Raumerwärmung		EFH-I	EFH- Einfamilien-	EFH-III	MFH	NW-I Nahwärmenetz
Raumwärmenachfrage	in GJ/a	22	45	108	432	8 000 (+1 900
Brauchwarmw.nachfr.	in GJ/a	10,7	10,7	10,7	64,1	Netzverluste)
Solaranlage						
Kollektortyp		Indachflachk. selektiv		Aufdachk. selektiv		Indachflachkollektor selektiv
Inst. Netto-Kollektorfl.	in m ²	25	25	7,4	60	620
Kollektorleitung	in m	30	25	20	120	300
Lebensdauer	in a	20	20	20	20	20
Kollektornutzungsgrad	in % ^b Speichereingang	18,6	21,0	28,1	38,4	26,0
Spez. Kollektorertrag	in kWh/(m ² a) ^c	219	248	331	453	312
	in MJ/(m ² a) ^c	787	893	1 191	1 632	1 124
Nutzbare solare Wärme	in kWh/(m ² a) ^d Speicher	161	193	252	327	274/221 ^g
	in MJ/(m ² a) ^d ausgang	578	696	906	1 178	985/795 ^g
Solarer Deckungsgrad	in % ^e	44	31	63 (5,6) ^h	10,4	6,2
Systemnutzungsgrad	in % ^f	14	16	21	28	23/19 ^g
Speicher						
Speichertyp		Tank	Tank	Tank	Tank	Tank
Speichervolumen	in l	2 000	2 000	500	2 000	55 000
Wärmeübertrager		extern	extern	extern	extern	extern
Kollektorpumpe						
Anschlussleistung	in W	2 x 50	2 x 50	30	2 x 75	2 x 400
Laufzeit	in h/a	1 050	1 173	1 435	2 200	1 364