

KAPITEL: THERMISCHE SOLARENERGIENUTZUNG

ÜBERBLICK

PROF. MARIO ADAM



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>
Weitere Lizenz- und Quellenhinweise siehe Ende des Foliensatzes

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen





Erneuerbare Energien und Effizienztechnologien

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

E² - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz
ZIES - Zentrum für Innovative Energiesysteme

Hochschule Düsseldorf
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Kapitel „Thermische Solarenergienutzung“

Überblick

a d a m

Wärmeerzeugung mit Solarenergie - Übersicht

Aktive Systeme

- Kollektoren, durch die ein Fluid strömt (Wasser, Luft etc.)
- Anwendungsbereiche
 - Raumheizung und Trinkwassererwärmung für (Wohn)Gebäude, Städte und Quartiere
 - Beheizung von Freibädern
 - Prozesswärme z.B.
 - heißes Wasser für Wäschereien, Brauereien etc.
 - warme Luft zur Trocknung landwirtschaftlicher Güter
 - Solarkocher
 - Thermische Solarkraftwerke: Stromerzeugung mit Wärme/Kraft-Prozessen und Spiegeln, die das Sonnenlicht auf Punkte bzw. Linien fokussieren (Solarturm- bzw. Parabolrinnen-Kraftwerke)

Passive Systeme

- passive Solarenergienutzung in Gebäuden durch solare Einstrahlung an Fensterflächen



Flachkollektor auf HSD-Dach



Solarturmkraftwerk in Nevada

Lizenz- und Quellenhinweise

Folie 2: Hochschule Düsseldorf, Münsterstraße 156, 40476 Düsseldorf

Folie 2: Solarturmkraftwerk von Michael4Wien, Pixabay,
<https://pixabay.com/de/photos/sonne-stromproduktion-erneuerbar-4535891/>

KAPITEL: THERMISCHE SOLARENERGIENUTZUNG **SYSTEMTECHNIK FÜR TRINKWARMWASSER UND RAUMHEIZUNG IN (WOHN-)GEBÄUDEN**

PROF. MARIO ADAM



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>
Weitere Lizenz- und Quellenhinweise siehe Ende des Foliensatzes

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen



a d a m



Erneuerbare Energien und Effizienztechnologien

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

E² - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz
ZIES - Zentrum für Innovative Energiesysteme

Hochschule Düsseldorf
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

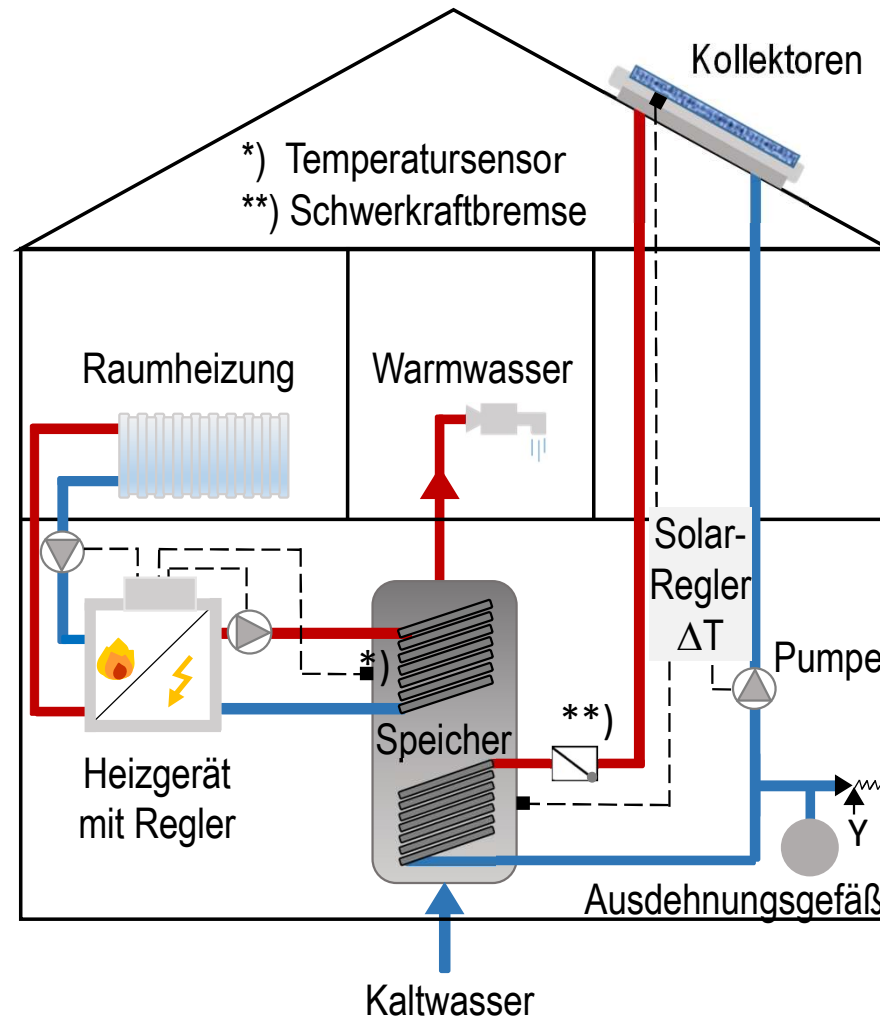
Kapitel „Thermische Solarenergienutzung“

Systemtechnik für Trinkwarmwasser und Raumheizung in (Wohn)Gebäuden

Solare Trinkwassererwärmung

System mit Trinkwarmwasserspeicher

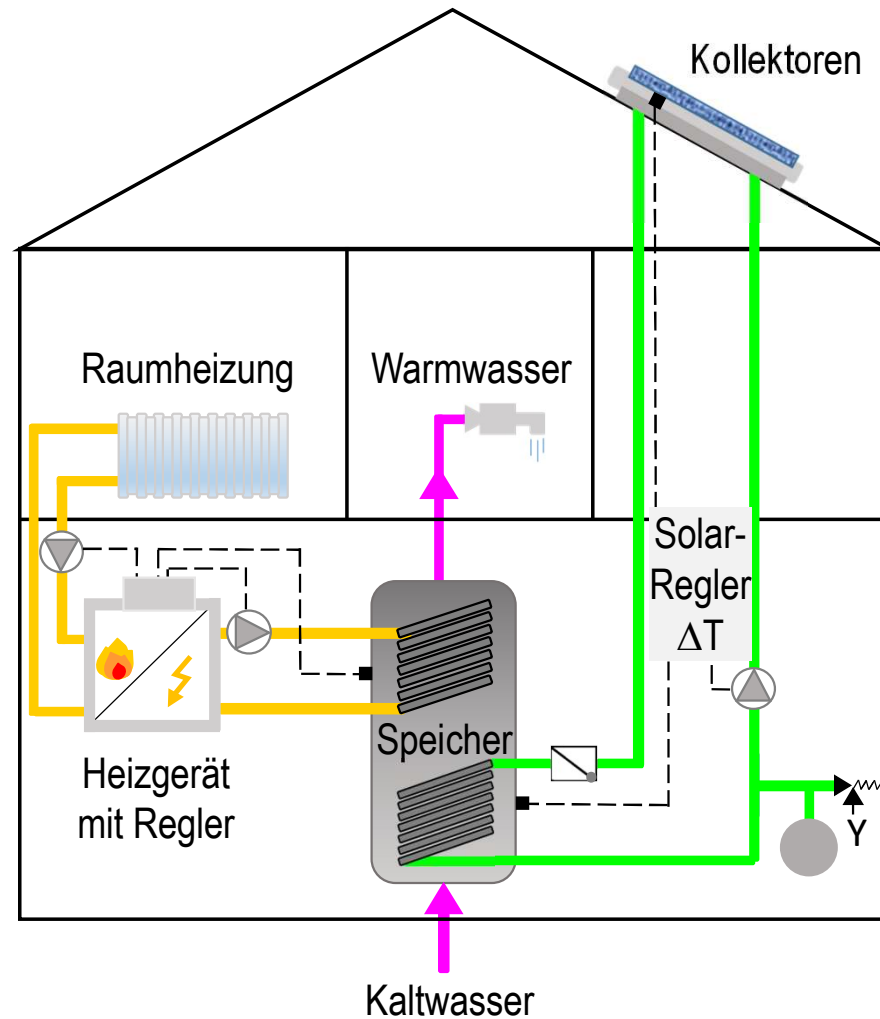
- Typisch für kleine Anlagen z.B. in Einfamilienhäusern
- Energiespeicherung als Trinkwarmwasser
- Trennung der Kreisläufe von Kollektor, Heizung, Trinkwarmwasser über (speicherinterne) Wärmeübertrager wegen unterschiedlicher Medien
- Pumpe im Kollektorkreis: per Differenztemperatur geregelt ($T_{\text{Kollektor, Austritt}} > T_{\text{Speicher, unten}}$), meist mit variabler Drehzahl
- Nachheizung: wenn Speicher oben zu kalt durch Heizgerät; alternativ: Durchlauferhitzer vor Warmwasser-Zapfstelle



Solare Trinkwassererwärmung

Medien und Drücke in Solaranlagen

- Solarflüssigkeit (grün):
meist Wasser/Glykol-Gemisch,
geschlossener Kreislauf,
ca. 3 bar Fülldruck
- Heizungswasser (gelb):
mit der Zeit „schmutziges“
altes Wasser, sauerstoffarm,
geschlossener Kreislauf,
ca. 1,5 bar Fülldruck
- Trinkwarmwasser (lila):
immer neues frisches Wasser,
sauerstoffreich (→ Korrosions-
schutz nötig, Verkalkungsgefahr
an heißen Wärmeübertragern),
ca. 5 bar = Druck des kommu-
nalen Kaltwassernetzes (bei
geschlossenem Wasserhahn)



Solare Trinkwassererwärmung

System mit „Thermosyphon“

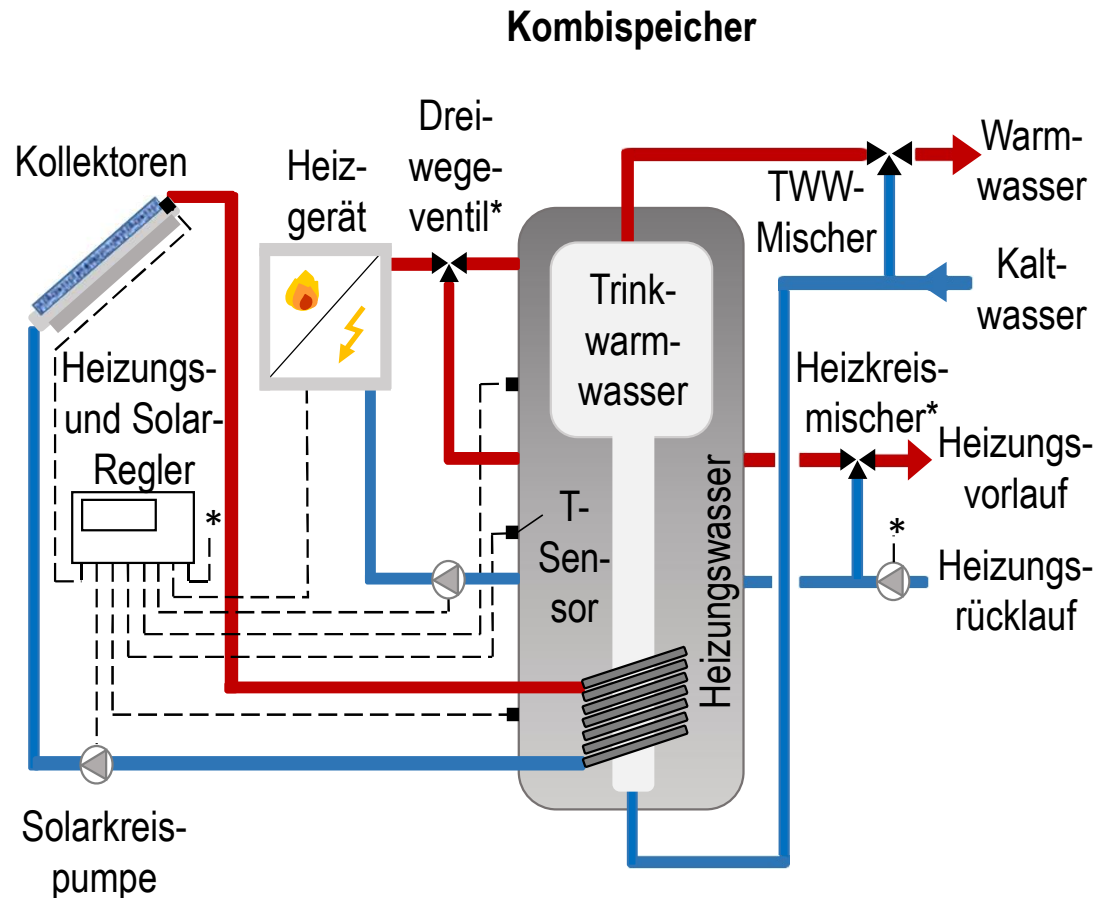
- Typisch für Länder ohne (nächtliche) Frostgefahr und mit hoher Solarstrahlung
- Warmes Wasser steigt selbstständig aus dem Kollektor in den Speicher auf, da warmes Wasser leichter ist als kaltes
- Trinkwarmwasserspeicher
 - über den Kollektoren platziert
 - oft drucklos (mit Öffnung zur Umgebung) und ohne internen Wärmeübertrager (durch die Kollektoren strömt dann Trinkwasser)
- Kein Regler, keine Pumpe, keine Hilfsenergie!



Solare Trinkwassererwärmung und Raumheizung

System mit Kombispeicher (Tank-in-Tank-Speicher)

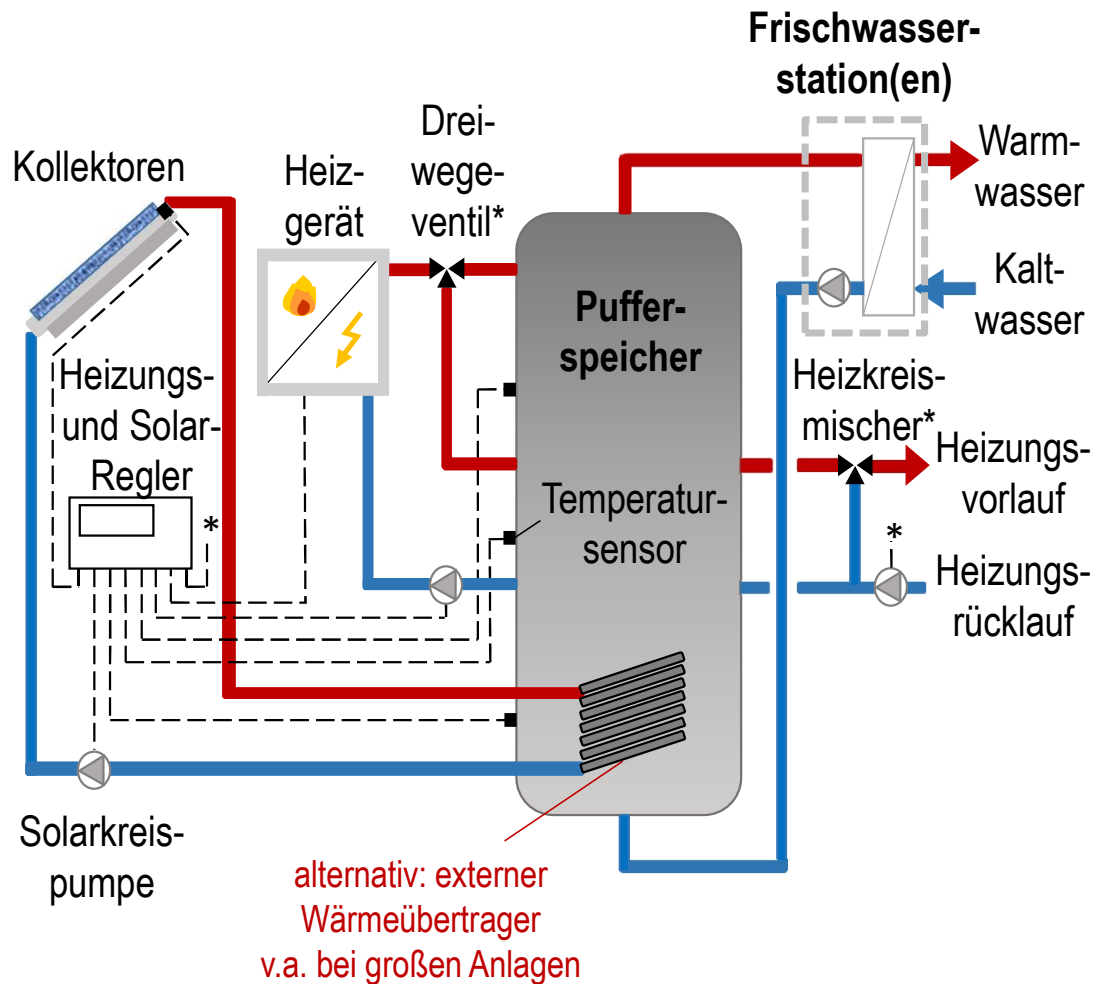
- Für kleine Anlagen z.B. in Einfamilienhäusern
- Heizungswasserspeicher mit innen liegendem Trinkwarmwasserspeicher
- Dreiwegeventil im Heizgerät-Vorlauf + Temperatursensoren im TWW-Bereitschaftsteil (oben) und Heizung-Speicherteil (Mitte)
→ Nachheizung für TWW / Heizung auf 2 verschiedenen Temperaturniveaus (Heizwärme bei höherem Wirkungsgrad)
- TWW-Mischer bzw. Thermostat als Verbrühungsschutz



Solare Trinkwassererwärmung und Raumheizung

System mit Pufferspeicher und Frischwasserstation

- Für kleine und große Anlagen
- Energiespeicherung im Heizungswasser („Puffer-Speicher“)
- TWW im Durchfluss über „Frischwasserstation“ = groß dimensionierter Wärmeübertrager, Zapferkennung, Auslauf-temperaturregelung
- Vorteil: Legionellenschutz energiesparend machbar → TWW-Rohr bis Zapfstelle <3 l Inhalt (statt regelmäßiges Aufheizen des Speichers auf über 60°C); zudem preiswertes Speichermaterial



Lizenz- und Quellenhinweise

Folie 2: Wagner-Solar, Sonnenallee 2, 35274 Kirchhain

KAPITEL: THERMISCHE SOLARENERGIENUTZUNG

SPEICHERTEMPERATURSCHICHTUNG,

KOLLEKTORKREISFLUID

PROF. MARIO ADAM



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen



a d a m



Erneuerbare Energien und Effizienztechnologien

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

E² - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz
ZIES - Zentrum für Innovative Energiesysteme

Hochschule Düsseldorf
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

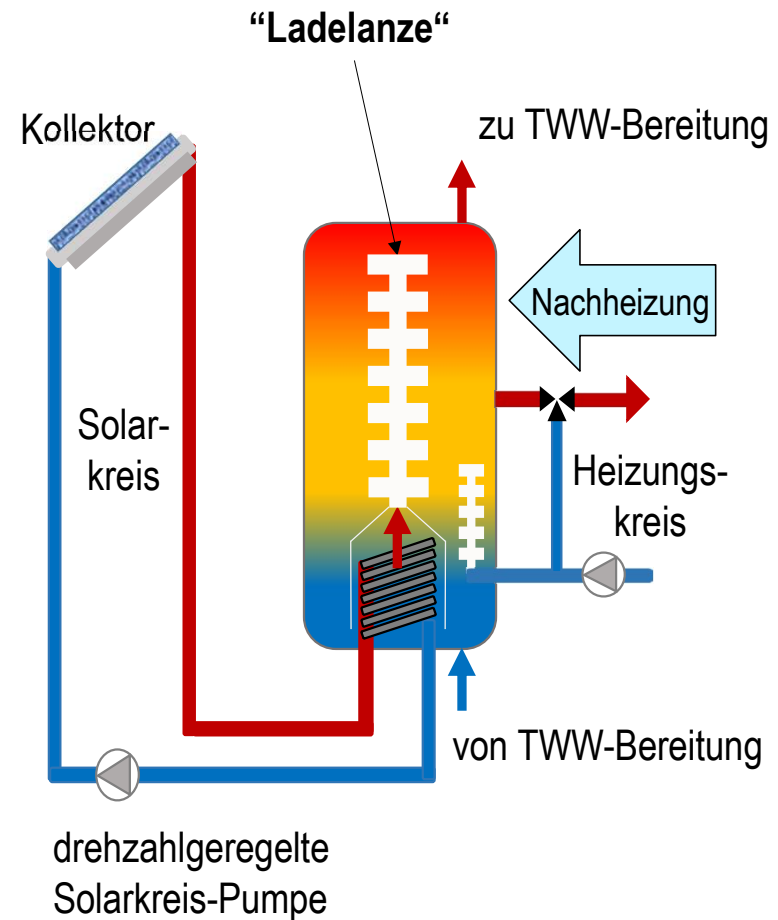
Kapitel „Thermische Solarenergienutzung“

Speichertemperaturschichtung, Kollektorkreisfluid

Temperaturschichtung in (Solar-)Speichern

Maßnahmen zur Temperaturschichtung

- Einbringung von Solarenergie
 - „Ladelanze“: erwärmtes Wasser steigt auf, tritt in Schicht gleicher Temperatur bzw. Dichte aus oder
 - externer Wärmeübertrager + Solarkreis-Vorlaufanschlüsse auf unterschiedlichen Speicherhöhen mit gesteuerten Ventilen
- Hohe Kollektoraustrittstemperaturen
 - Drehzahlregelung der Solarkreis-Pumpe, so dass Kollektoraustrittstemperatur = Sollwert
 - „Low-Flow“-Auslegung des Solarkreises: $\approx 10 \text{ l/h pro m}^2 \text{ Kollektorfläche}$ statt $40 \text{ l/m}^2\text{h}$
- Nachheizung: nur im oberen Speicherteil
→ unterer Teil bleibt kühl für Solarenergie
- Anbindung an TWW-Bereitung: kalte Seite am Speicherboden, warme am Speicherkopf
- Einspeisung des temperaturveränderlichen Heizungsrücklaufs über „Schichtungs-lanze“



Fluid im Kollektorkreis

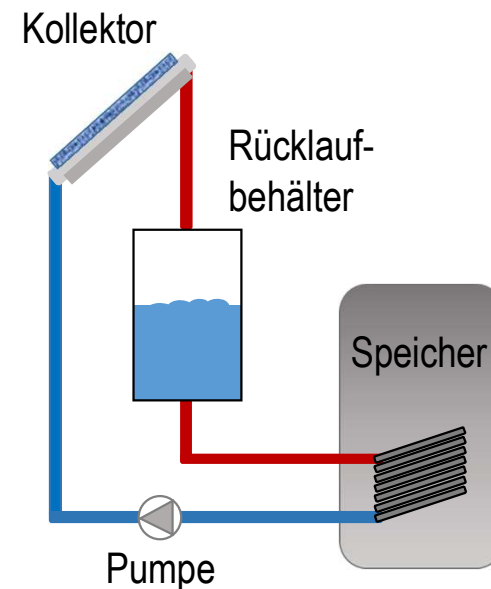
Wasser/Glykol-Gemisch

- am meisten verwendet
- Vorteil: sicherer Schutz vor Einfrieren im Winter
- Nachteil: Gefahr des „Crackens“ des Glykols bei hohen Kollektor-Stillstandtemperaturen im Sommer

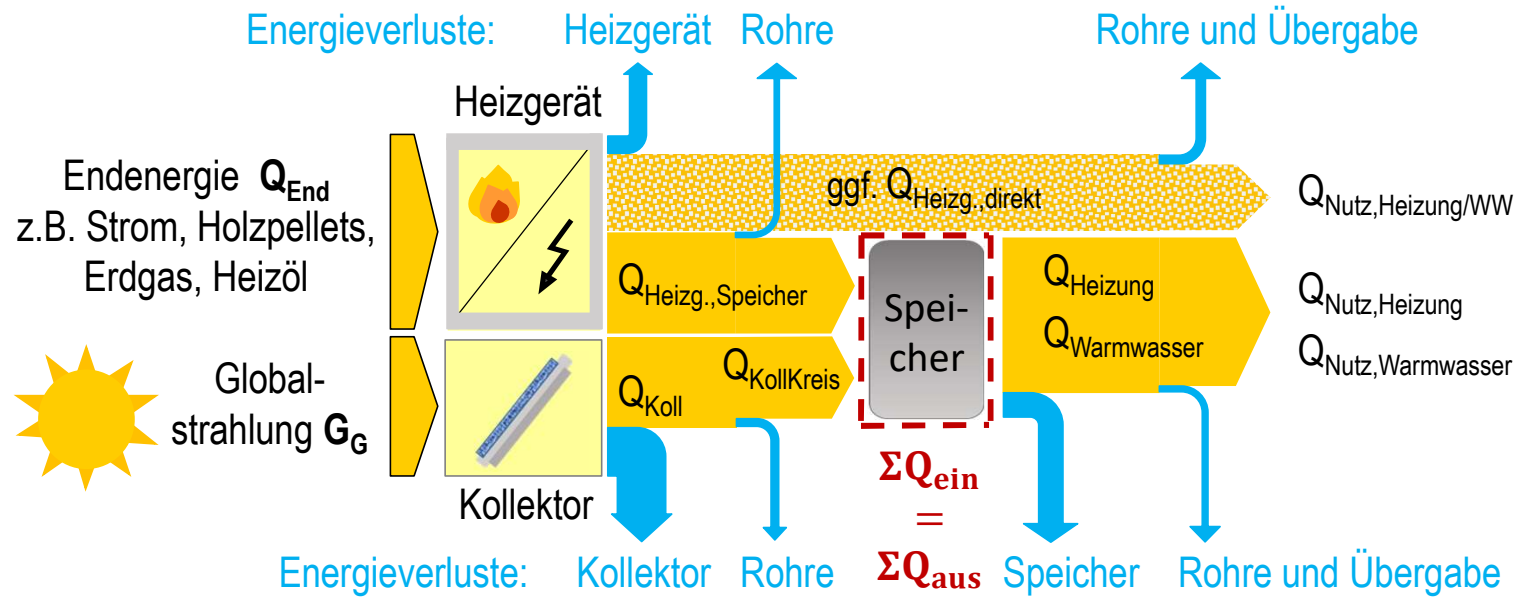
Reines Wasser

- allgemeine Vorteile: Umwelt-/Gesundheits-/Crackgefahr durch Glycol entfällt, größere spezifische Wärmekapazität ($m \downarrow$) und Wärmeübergangskoeffizienten ($\dot{q} \uparrow$)
- „Aqua-System“
 - Durchströmung des Kollektorfeldes mit warmem Wasser aus dem Speicher bei Einfriergefahr
 - Nachteil: Energieaufwand
- „Drain-Back-System“
 - Kollektor und frostgefährdete Rohre laufen leer (in Rücklaufbehälter), wenn Pumpe abschaltet
 - Nachteil: Leerlaufgefälle sicherstellen, erhöhte Pumpenleistung, korrosionsfeste Materialien

Drain-Back-System



Solaranlagen - Energiebilanz, Energieflussbild



Kollektor- und Kollektorkreis-Nutzungsgrad

$$\eta_{\text{Kollektor}} = \frac{Q_{\text{Koll}}}{G_G \cdot A_{\text{Koll}}} \quad (\eta_{\text{mittel, Jahr}} \cong 50\%)$$

$$\eta_{\text{Kollektorkreis}} = \frac{Q_{\text{KollKreis}}}{G_G \cdot A_{\text{Koll}}}$$

Solarer Deckungsgrad $DG_{\text{Solar}} = \frac{Q_{\text{KollKreis}}}{Q_{\text{KollKreis}} + \Sigma Q_{\text{Heizg.}}}$

Endenergieeinsparung $f_{\text{save}} = \frac{Q_{\text{End (ohne Solar)}} - Q_{\text{End (mit Solar)}}}{Q_{\text{End (ohne Solar)}}$

KAPITEL: THERMISCHE SOLARENERGIENUTZUNG

SOLARE NAHWÄRME FÜR STÄDTE

UND QUARTIERE

PROF. MARIO ADAM



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>
Weitere Lizenz- und Quellenhinweise siehe Ende des Foliensatzes

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen



a d a m



Erneuerbare Energien und Effizienztechnologien

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

E² - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz
ZIES - Zentrum für Innovative Energiesysteme

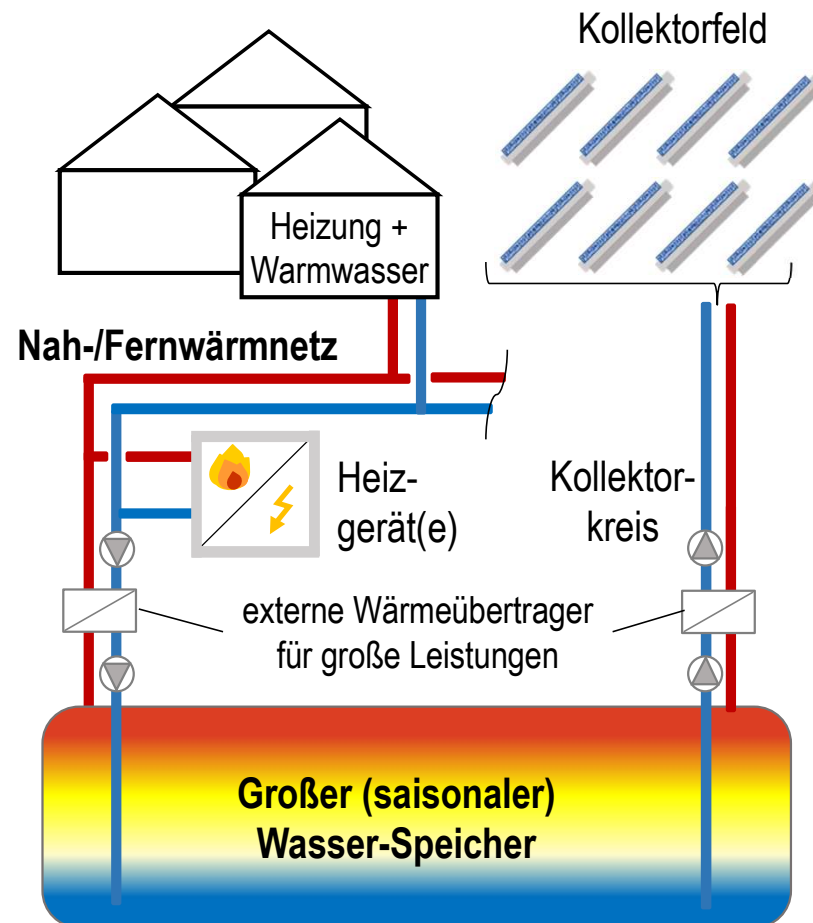
Hochschule Düsseldorf
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Kapitel „Thermische Solarenergienutzung“

Solare Nahwärme für Städte und Quartiere

Solare Nahwärme für TWW und Raumheizung

- Große Kollektorfelder und Speicher
- Vorreiter: Dänemark (alle Anlagen mit Daten unter www.solvarmedata.dk)
- Konzepte (SD: Solarer Deckungsgrad)
 - Direkteinspeisung ohne Speicher (SD $\approx 10\%$)
 - mit Speicher für Tag/Nacht ... Woche, Wasserbehälter aus Stahl oder Beton (SD $\approx 20\%$); Beispiel Silkeborg / DK: 4 x (39.000 m² + 16.000 m³)
 - mit saisonalem Langzeitspeicher, „Baggerseen“ mit Folienauskleidung und schwimmender Wärmedämmung (SD $\approx 50\%$); Beispiel Vojens / DK: 70.000 m² + 200.000 m³
- Alternativen zu Wasserspeichern: Erdsondenfelder (Betonsäulen mit U-Rohren), unterirdische Wasservorkommen (Aquifere)



Beispiele mit Tages-/Wochenspeicher



Chemnitz: 2.100 m² Kollektoren (im Bild: Teilfeld), 1000 m³ Speicher

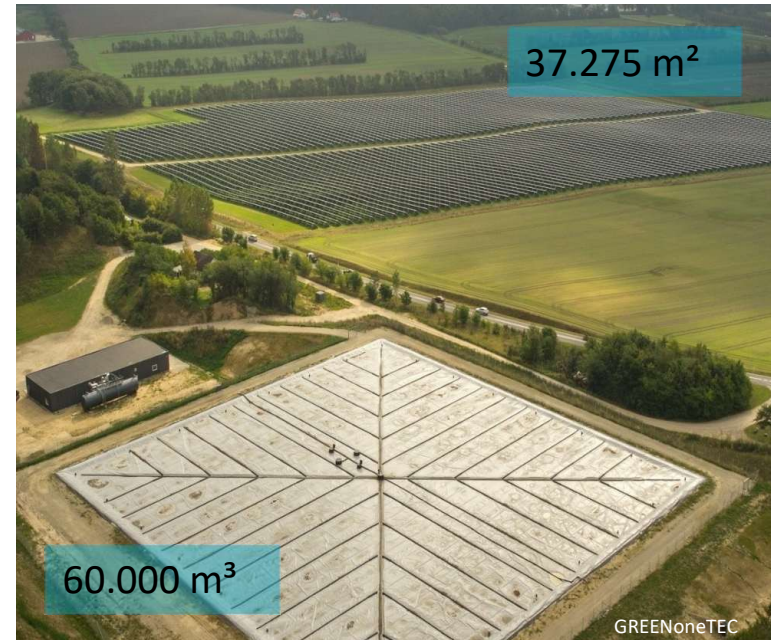


Kornwestheim: 2.000 m³, 20 m hoch



Mengersberg: 2.950 m² Kollektoren auf eingeramnten Profilen, 300 m³ Speicher

Beispiel mit Langzeitspeicher - Dronninglund / DK



Lizenz- und Quellenhinweise

Folie 2: GREENoneTEC, GREENoneTEC Solarindustrie GmbH, A-9300 St. Veit/Glan, Energieplatz 1

Folie 3: GREENoneTEC, GREENoneTEC Solarindustrie GmbH, A-9300 St. Veit/Glan, Energieplatz 1

KAPITEL: THERMISCHE SOLARENERGIENUTZUNG

KOLLEKTOREN: BAUARTEN

PROF. MARIO ADAM



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>
Weitere Lizenz- und Quellenhinweise siehe Ende des Foliensatzes

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen



a d a m

Lehrveranstaltung



Erneuerbare Energien und Effizienztechnologien

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

E² - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz
ZIES - Zentrum für Innovative Energiesysteme

Hochschule Düsseldorf
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Kapitel „Thermische Solarenergienutzung“

Kollektoren: Bauarten

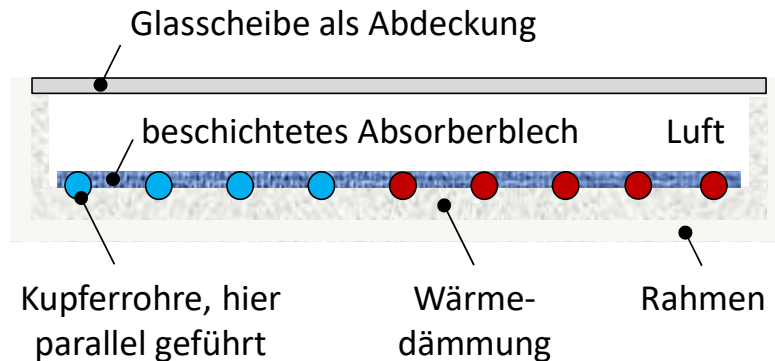
Kollektorbauarten - Flachkollektoren

Verschiedene Bauformen

- 1 Glasscheibe (siehe Bild) oder (selten) Doppelglasscheibe, Glasscheibe + Folie
- Luft im Zwischenraum (siehe Bild) oder (selten) Vakuum plus Stützstäbe
- mehrere parallel geführte Rohre vom Verteil- zum Sammelrohr („Harfe“, siehe Bild) oder 1 schlangenförmig geführtes Rohr vom Kollektoreintritt zum -austritt („Mäander“)

Vorteile

- stabil, hagelfest, keine Dichtheitsprobleme (da meist Luft im Zwischenraum)
- vergleichsweise preiswert
- gutes Preis-/Leistungsverhältnis



Kollektorbauarten - Röhrenkollektoren

Verschiedene Bauformen

- 2 ineinandergesteckte Glasröhren mit Vakuum im Spalt, innere Röhre außen beschichtet, innen eingestecktes Wärmeleitblech mit U-Rohr für Wärmeträger (Sydney/Dewar-Röhre; s. Bild)
- 1 Glasröhre, innen evakuiert, Absorberblechstreifen darin, daran befestigt:
 - koaxiales Rohr (Rohr in Rohr), von Wärmeträger durchströmt
 - Heat-Pipe: Rohr, teilgefüllt mit Kältemittel zum Wärmetransport (s. Bild)

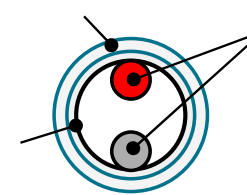
Vorteile (im Vergl. zu Flachkollektoren)

- höherer Wirkungsgrad → weniger Flächenbedarf, höhere Temperaturen
- Röhren häufig einzeln ohne Anlagenentleerung austauschbar („trockene Anbindung“)

Sydney-Röhrenkollektor

doppelwandige Glasröhre mit Vakuum im Spalt

zylindrisches Wärmeleitblech



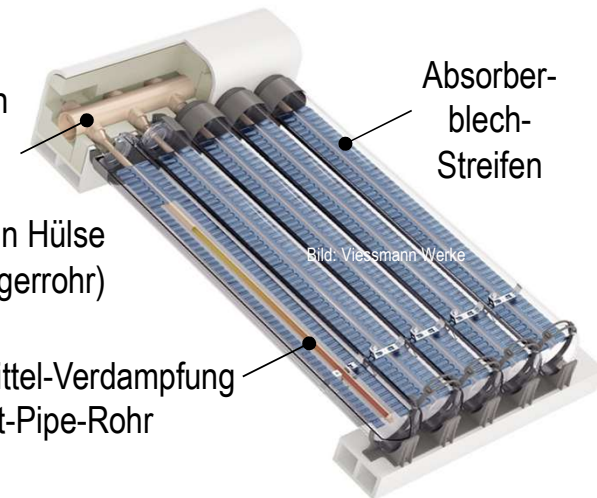
Vor-/Rücklauf-Rohre, als U-Rohr

Heat-Pipe-Röhrenkollektor

Kältemittel-Kondensation im Kopf des Heat-Pipe (eingesteckt in Hülse im Wärmeträgerrohr)

Absorberblech-Streifen

Kältemittel-Verdampfung im Heat-Pipe-Rohr



Kollektorbauarten - Solarabsorber, Luftkollektoren

Solarabsorber

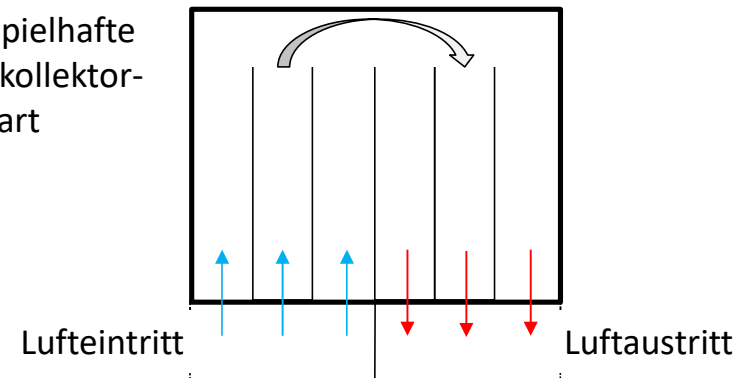
- schwarze, von Wasser durchflossene Schläuche, Kunststoffmatten, etc.
- Vorteil: preiswert
- Nachteil: geringer Wirkungsgrad
- meist zur Schwimmbadbeheizung
→ sehr gute zeitliche Korrelation von solarer Einstrahlung und Wärmebedarf



Luftkollektoren

- wie Flachkollektor (ohne Kupferrohr), Luft strömt (geeignet geleitet) zwischen Scheibe und Absorberblech
- zur Trocknung landwirtschaftlicher Güter oder bei Luftheizungen
- in Deutschland selten

beispielhafte
Luftkollektor-
bauart



Kollektorbauarten - Konzentrierende Systeme

- Röhrenkollektor mit **Compound Parabolic Concentrator**
→ höherer Ertrag pro m² Fläche
- Fokussierung ermöglicht Temperaturen >> 100°C für
 - Prozesswärme
 - Solarkraftwerke zur Stromerzeugung
- wichtig: nur Direktstrahlung ist gut fokussierbar!

| Fokus: Linie | Linie | Punkt |
|--------------------------------------|-------------|--------------|
| Nachführung: keine | einachsig | zweiachsig |
| $f_{\text{Konzentration}}$: 2 bis 3 | bis ca. 100 | bis ca. 1000 |

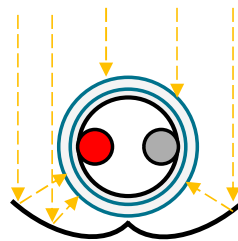
CPC-Reflektor unter Kollektorröhren



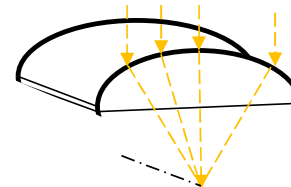
Parabol-Rinne



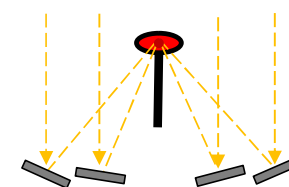
Parabol-Schüssel (Bild: Solarkocher)



Zylinderlinse (selten)



Heliostatenfeld (Bild: Turmkraftwerk)



Kollektorbauarten - Fazit

Relevant in Deutschland

- Flachkollektoren
- Vakuum-Röhrenkollektoren (ohne und mit CPC-Reflektoren)

Gründe für geringe Relevanz anderer Kollektorarten in Deutschland

- geringe Direktstrahlungsanteile
- wenige Luftheizungen
- wenige Swimmingpools ☺



Lizenz- und Quellenhinweise

Folie 2: Hochschule Düsseldorf, Münsterstraße 156, 40476 Düsseldorf

Folie 3: Viessmann, Viessmann Climate Solutions SE, Viessmannstraße 1, 35108 Allendorf (Eder)

Folie 4: AQSOL, AQSOL GmbH Solarsysteme, Margarete-Böhme-Str. 19, 25813 Husum / Germany

Folie 5: Vaillant, Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, Bahnhofstr. 15, 42897 Remscheid (Lennepe), Germany,
<https://www.vaillant.de/fachpartnernetz/vermarktungsunterstuetzung/vaillant-downloads/bilder/>

Wikipedia, Urheber Kjkolb, Parabolic trough solar thermal electric power plant located at Kramer Junction in California, 2005,
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Parabolic_trough_solar_thermal_electric_power_plant_1.jpg

Hochschule Düsseldorf, Münsterstraße 156, 40476 Düsseldorf, Germany

Creative Commons-Lizenz „Namensnennung 2.5 generisch“,
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/deed.de> (Es wurden keine Änderungen vorgenommen)

Folie 6: Hochschule Düsseldorf, Münsterstraße 156, 40476 Düsseldorf, Germany

Vaillant, Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, Postanschrift: Berghauser Str. 40, 42859 Remscheid,
Hausanschrift: Bahnhofstr. 15, 42897 Remscheid (Lennepe), Germany,
<https://www.vaillant.de/fachpartnernetz/vermarktungsunterstuetzung/vaillant-downloads/bilder/>

KAPITEL: THERMISCHE SOLARENERGIENUTZUNG

KOLLEKTOREN: ENERGIEBILANZ, WIRKUNGSGRADE

PROF. MARIO ADAM



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>
Weitere Lizenz- und Quellenhinweise siehe Ende des Foliensatzes

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen



a d a m

Lehrveranstaltung



Erneuerbare Energien und Effizienztechnologien

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

E² - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz
ZIES - Zentrum für Innovative Energiesysteme

Hochschule Düsseldorf
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Kapitel „Thermische Solarenergienutzung“

Kollektoren: Energiebilanz, Wirkungsgrade

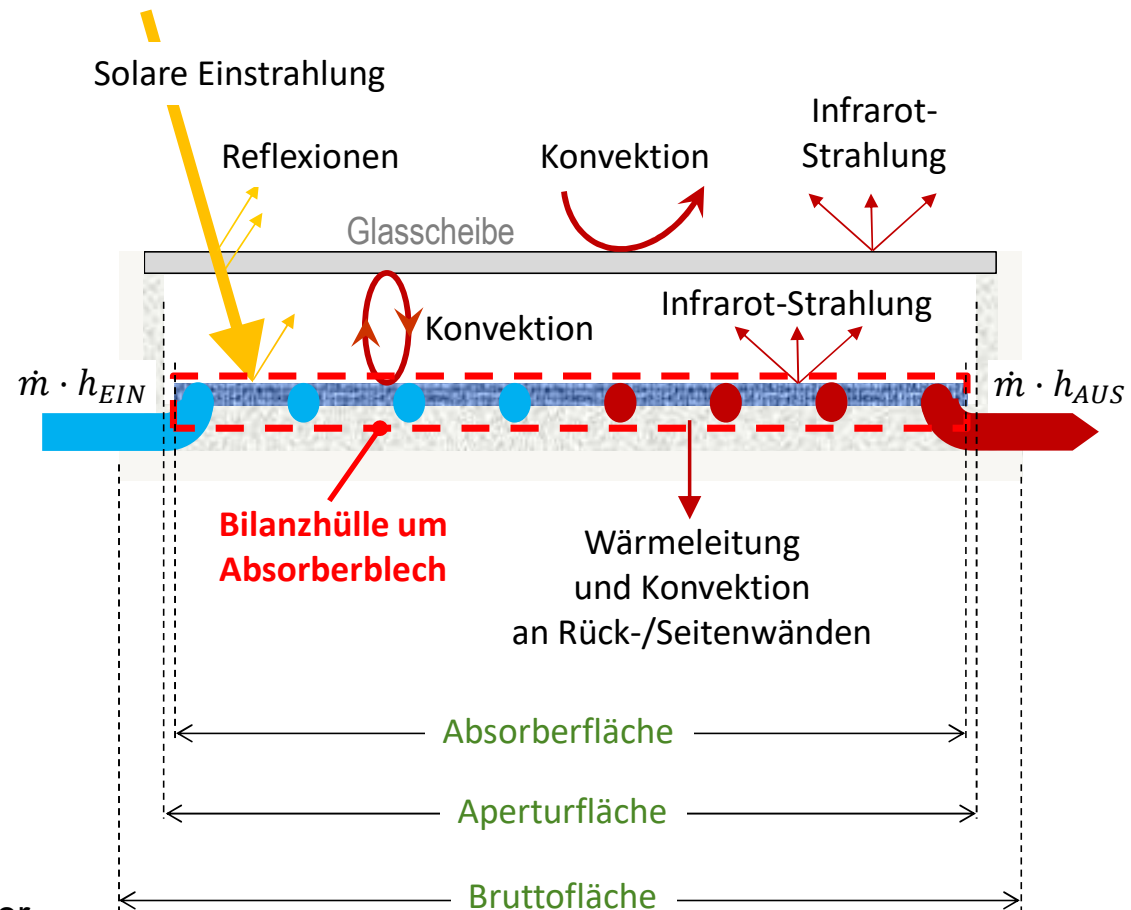
Solarkollektoren - Energiebilanz (vereinfacht)

Solarstrahlung \dot{G}_G

- hinter der Glasscheibe:
 $\dot{G}_G \cdot \tau_{Glas}$
 τ = Transmissionskoeffizient ($\approx 90\%$)
- am Absorber absorbiert:
 $\dot{G}_G \cdot \tau_{Glas} \cdot \alpha_{Absorber}$
 α = Absorptionskoeffizient ($\approx 90\%$)
- $\tau_{Glas} \cdot \alpha_{Absorber} = \eta_0$
 = Optischer Wirkungsgrad

Thermische Verluste

- durch Konvektion, Leitung:
 Summe = $a_1 \cdot \Delta T$
- durch Infrarot-Strahlung
 Summe = $a_2 \cdot \Delta T^2$
- a_1, a_2 : linearer, quadratischer Wärmeverlustkoeffizient



Solarkollektoren - Wirkungsgradkennlinien (2. Ordnung)

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot (h_{aus} - h_{ein})}{\dot{G}_G \cdot A_{Kollektor}} = \eta_0 - \frac{a_1 \cdot \Delta T}{\dot{G}_G} - \frac{a_2 \cdot \Delta T^2}{\dot{G}_G}$$

\dot{G}_G : Globalstrahlungsleistung in W/m²

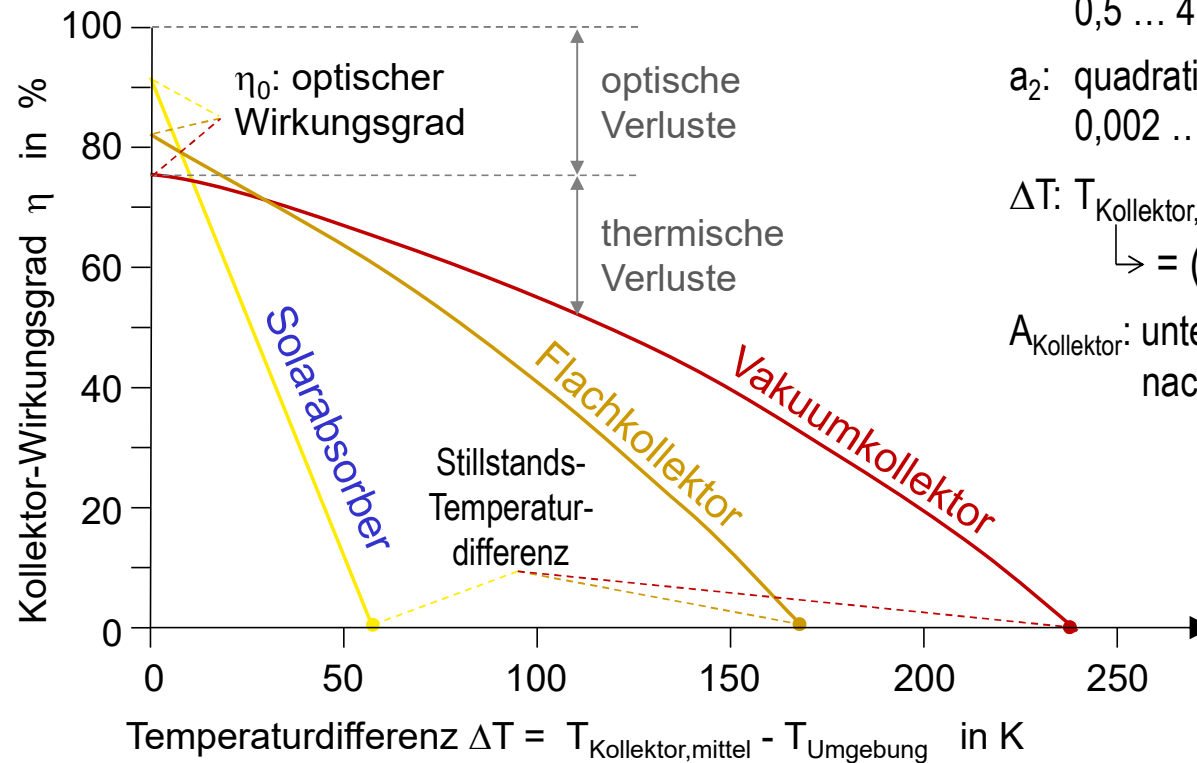
η_0 : optischer Wirkungsgrad (0,7...0,9)

a_1 : linearer Wärmeverlustkoeffizient
0,5 ... 4 W/(m²K)

a_2 : quadratischer Wärmeverlustkoeff. 0,002 ... 0,02 W/(m²K²)

ΔT : $T_{Kollektor,mittel} - T_{umgebung}$
 $\rightarrow = (T_{Fluid,Eintritt} + T_{Fluid,Austritt}) / 2$

$A_{Kollektor}$: unterschiedliche Flächen (!), je nach Norm (DIN 9806: A_{Brutto})



Grafik für
 $\dot{G}_G = 800 \text{ W/m}^2$
 $\dot{G}_G \downarrow \rightarrow \eta \downarrow$

Strahlungsdurchlässigkeit von Kollektorgläsern

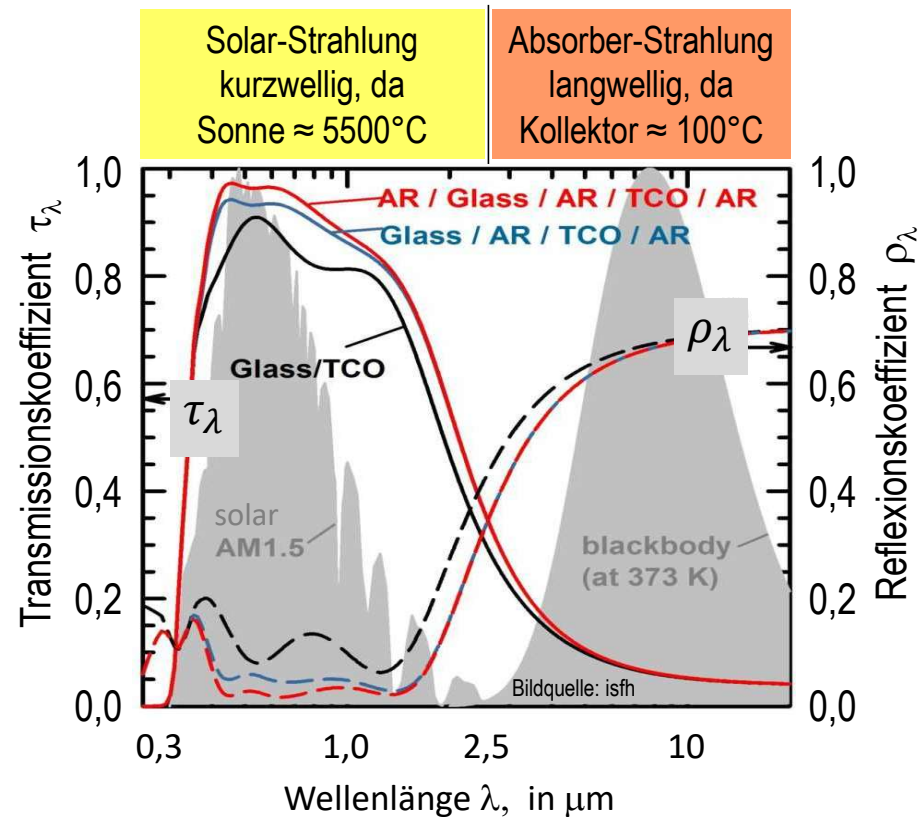
Strahlungsgesetz

- $\rho_\lambda + \tau_\lambda + \alpha_\lambda = 1$
 ρ , τ , α : Reflexions-, Transmissions-, Absorptionskoeffizient
 (Werte: 0 bis 1); λ Wellenlänge

Glas-Eigenschaften

- Ziele: viel Solarstrahlung durchlassen & wenig Strahlung vom heißen Absorber nach draußen lassen, d.h.
- bei Wellenlängen $\lambda < 2,5 \mu m$:
 τ_λ möglichst groß!
 $\rightarrow \rho_\lambda, \alpha_\lambda$ klein: unkritisch, da Absorber bei $\lambda < 2,5 \mu m$ ohnehin kaum Strahlung abgibt
- bei Wellenlängen $\lambda > 2,5 \mu m$:
 ρ_λ möglichst groß!
 $\rightarrow \tau_\lambda$ klein: gewollt
 $\rightarrow \alpha_\lambda$ klein: unkritisch

Strahlungseigenschaften von Glas mit Beschichtungen
 (AR: Anti-Reflex, TCO: Transparent Conducting Oxides)



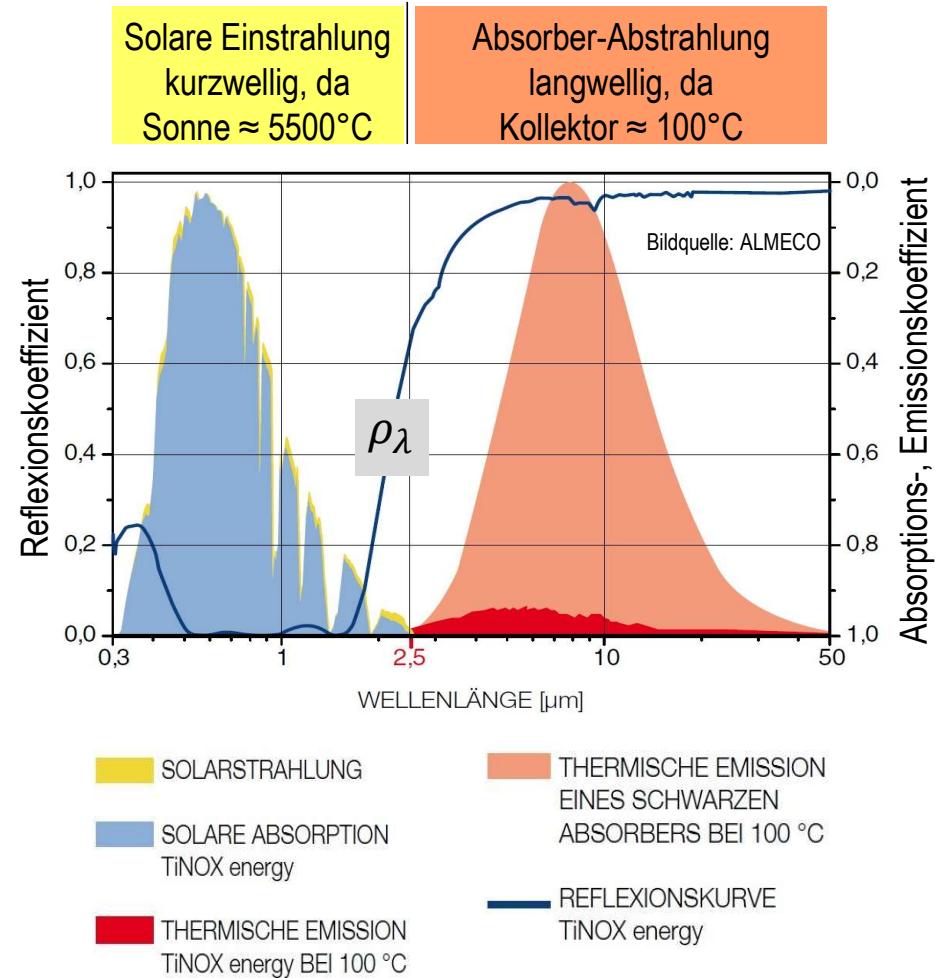
„Selektive Beschichtung“ von Absorberblechen

Strahlungsgesetz

- $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda$ (Blech: $\tau_\lambda = 0$)
 ϵ_λ : Emissionskoeffizient (0 bis 1)

Absorber-Eigenschaften

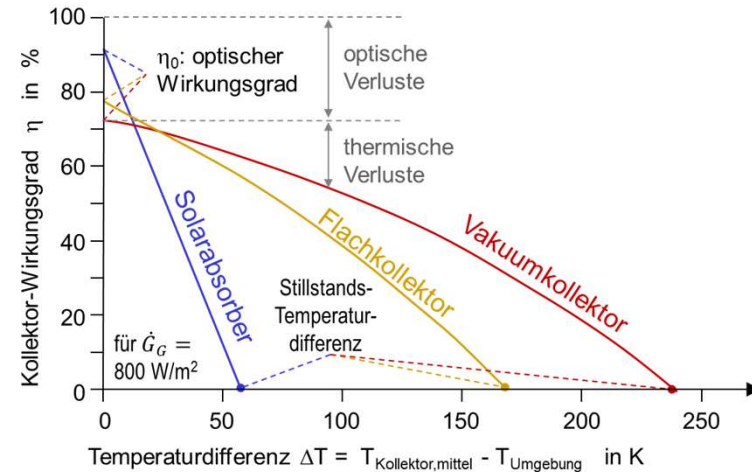
- Ziele: viel Solarstrahlung absorbieren & selbst wenig Strahlung emittieren, d.h.
- bei Wellenlängen $\lambda < 2,5 \mu\text{m}$:
 α_λ möglichst groß!
 $\rightarrow \rho_\lambda$ klein: gewollt
 $\rightarrow \epsilon_\lambda$ groß: unkritisch, da Absorber bei $\lambda < 2,5 \mu\text{m}$ ohnehin kaum Strahlung abgibt
- bei Wellenlängen $\lambda > 2,5 \mu\text{m}$:
 ϵ_λ möglichst klein!
 $\rightarrow \alpha_\lambda$ klein: unkritisch, da ohnehin kaum Solarstrahlung bei $\lambda > 2,5 \mu\text{m}$
 $\rightarrow \rho_\lambda$ groß: gewollt



Kollektorstückwirkungsgrade - Fazit

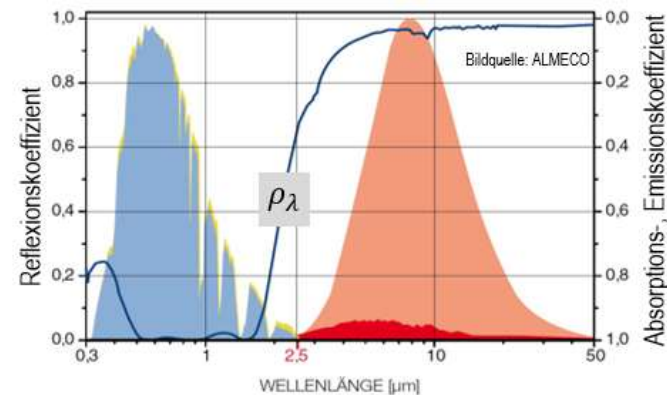
Kollektorstückwirkungsgrade

- abhängig von
 - Kollektoreigenschaften
 - Temperaturdifferenz zur Umgebung
 - Globalstrahlungsleistung
 - etc.
- bei Anlagen zur Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung im Jahresmittel in der Größenordnung von 50%



Beispielhafte Maßnahmen zur Wirkungsgrad-Verbesserung

- Absenkung der Betriebstemperaturen
- gute Wärmedämmung
- selektive Beschichtung (bzgl. Strahlungswellenlängen) von Abdeckgläsern und Absorberflächen



Lizenz- und Quellenhinweise

Folie 4: ISFH, Institut für Solarenergieforschung GmbH, Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal, Germany, www.isfh.de

Folie 5: 2021, ALMECO GmbH, Claude Breda Strasse, 3, D-06406 Bernburg, Germany, <http://www.almecogroup.com>

Folie 6: 2021, ALMECO GmbH, Claude Breda Strasse, 3, D-06406 Bernburg, Germany, <http://www.almecogroup.com>

KAPITEL: THERMISCHE SOLARENERGIENUTZUNG

SOLARANLAGEN: DIMENSIONIERUNG, ÖKOBILANZ, WIRTSCHAFTLICHKEIT

PROF. MARIO ADAM



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>
Weitere Lizenz- und Quellenhinweise siehe Ende des Foliensatzes

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen



a d a m

Lehrveranstaltung



Erneuerbare Energien und Effizienztechnologien

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

E² - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz
ZIES - Zentrum für Innovative Energiesysteme

Hochschule Düsseldorf
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Kapitel „Thermische Solarenergienutzung“

Solaranlagen: Dimensionierung, Ökobilanz, Wirtschaftlichkeit

Solaranlagen-Dimensionierung – Trinkwarmwasser

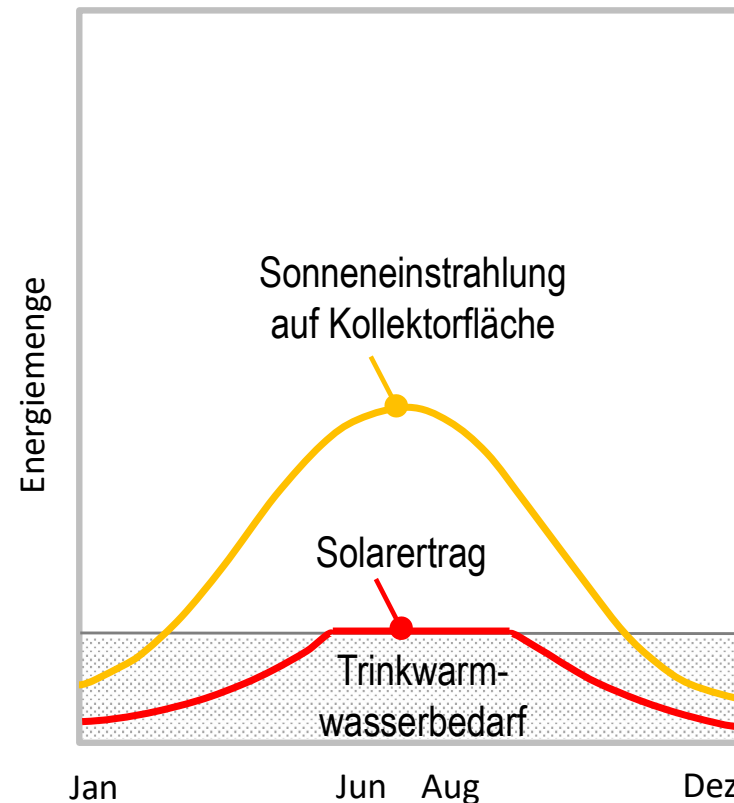
Wirtschaftliche Standard-Dimensionierung

- solare Deckungsgrade, bezogen auf Wärmebedarf für Trinkwarmwasser (TWW)
 - im Sommer: ca. 100 %
positiver Nebeneffekt: Zusatzheizung i.d.R. außer Betrieb
 - im Jahresmittel: ca. 60 %
- d.h. für Einfamilienhaus (4 Personen)
 - 3...5 m² Kollektorfläche
 - 200...400 l Speicher

Andere Kollektorflächen

- kleiner: Montageaufwand lohnt nicht
- größer: geringe Zugewinne in Winter und Übergangszeit, immer größere nicht nutzbare Überschüsse im Sommer

Anlagen für Trinkwarmwasser



Solaranlagen-Dimensionierung – TWW + Heizung

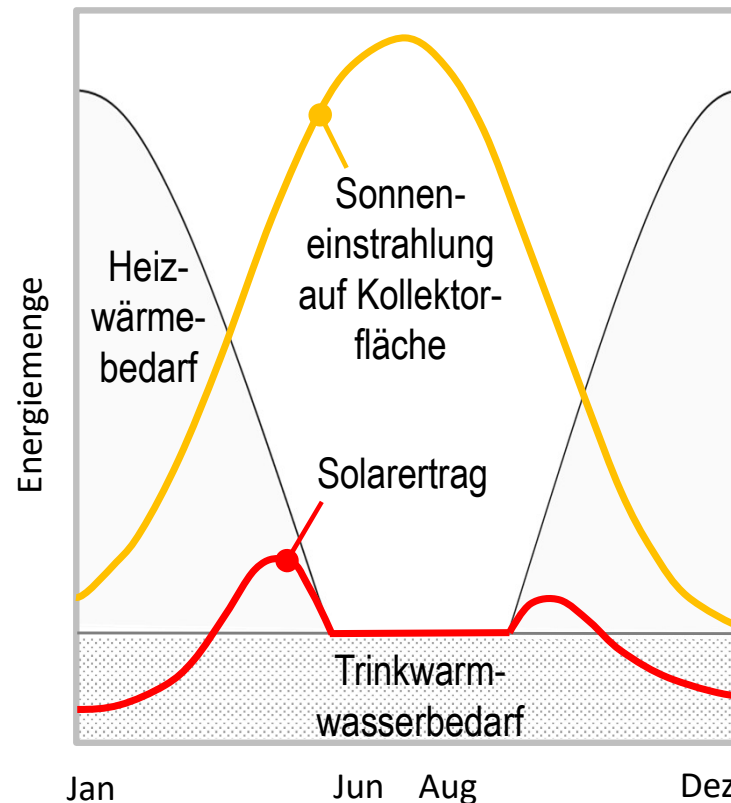
Wirtschaftliche Standard-Dimensionierung

- solare Deckungsgrade, bezogen auf Wärmebedarf für TWW & Raumheizung
 - im Sommer: ca. 100 %
positiver Nebeneffekt: Zusatzheizung i.d.R. außer Betrieb
 - im Jahresmittel: ca. 25 %
- für Einfamilienhaus
 - 6...15 m² Kollektorfläche
 - 600...1.000 l Speicher

Andere Kollektorflächen

- kleiner: kaum Unterstützung der Raumheizung
- größer: geringe Zugewinne in Winter und Übergangszeit, immer größere nicht nutzbare Überschüsse im Sommer

Anlagen für Trinkwarmwasser + Raumheizung



Solaranlagen-Dimensionierung – Weitere Aspekte

Allgemeines

- In Nordrhein-Westfalen ist Jahressumme solarer Einstrahlung auf eine Fläche maximal, wenn sie um ca. 37° nach Süden geneigt ist.
- Ausgleich nicht optimaler Dachausrichtungen durch geeignet größere Kollektorfläche. Beispiel: 5% größere Fläche wenn Dach nicht nach Süden sondern Südwest.
- Genauere Ertragsprognosen und Analysen durch Jahressimulationen mit Programmen wie T*SOL, POLYSUN, GetSolar (wissenschaftlich: TRNSYS, MATLAB/CARNOT, Dymola etc.)

Solare Nahwärme mit saisonalem Speicher

- 0,1 ... 0,2 m² Kollektorfläche pro m² Wohnfläche
- 1 ... 10 m³ Speichervolumen pro m² Kollektorfläche
- solarer Deckungsgrad:
40 bis 60 % des
Gesamtenergiebedarfs für
Trinkwarmwasser und
Raumheizung



Ökobilanz thermischer Solaranlagen – Primärenergie

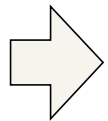
Solaranlage für Trinkwarmwasser im Einfamilienhaus (als Beispiel)

Aufwand an Primärenergie

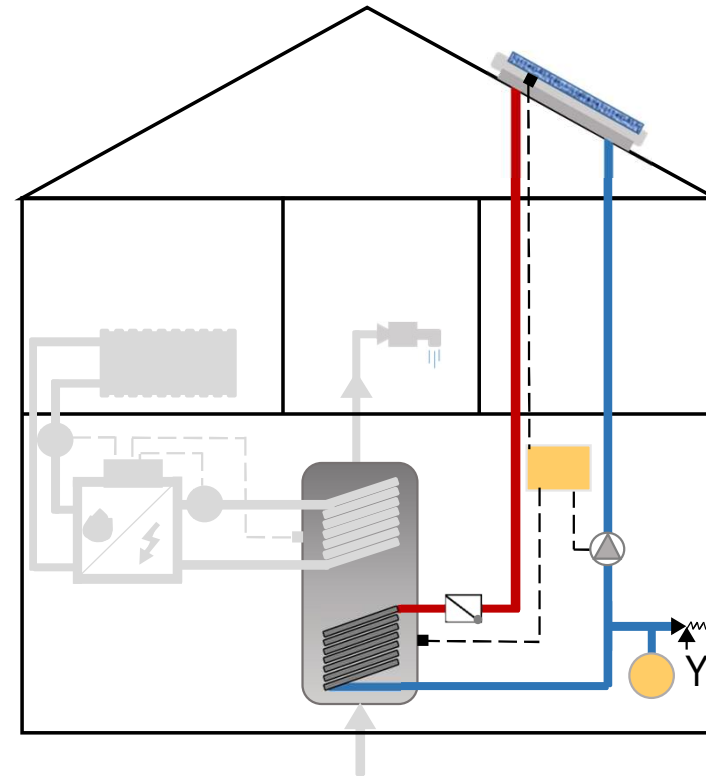
- Herstellung: rd. 1.500 kWh*
vor allem für Alu-Rahmen, Kupferrohre
- Betrieb: rd. 100 kWh/a
= 20 W (Pumpe + Regelung)
 - 8760 h/a (Stunden pro Jahr)
 - 30 % (abgeschätzte prozentuale Laufzeit)
 - 1,8 (aktueller Strom-Primärenergiefaktor)

Einsparung an Primärenergie

- Solarertrag Warmwasser: rd. 1.630 kWh/a
= $160 \text{ l/d} \cdot 4,2 \text{ kJ/(l} \cdot \text{K)} \cdot (50-10)^\circ\text{C} \cdot 365 \text{ d/a}$
 - 60% (solarer Deckungsgrad)



Energierücklaufzeit: \approx 1 Jahr

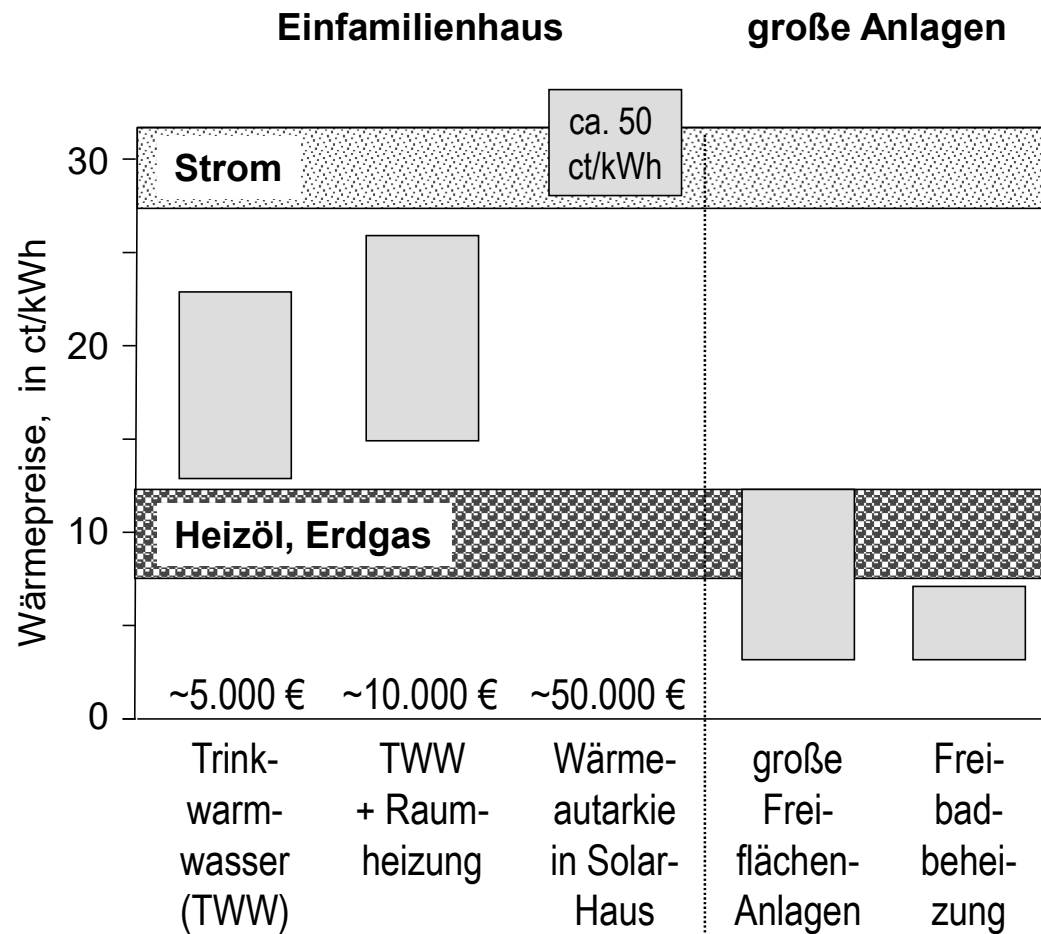


*Quelle: GEMIS

Wirtschaftlichkeit thermischer Solaranlagen

Wärmepreise

- Heizöl, Erdgas: Energieträgerpreis & Wirkungsgrad berücksichtigt
- Vorteil Solartechnik: Kauf der Anlage → Wärmepreis für Nutzungsdauer der Anlage „fixiert“
- große Anlagen pro m² deutlich preiswerter
- Wärmeautarkie im Solarhaus (40 m², 20 m³)
 - ca. 50.000 € Investition
 - ca. 100.000 kWh Ertrag in 20 Jahren
= 3.500 kWh/a Heizung + 1.500 kWh/a TWW x 20 Jahre
 - 50 ct/kWh (ohne Zins)



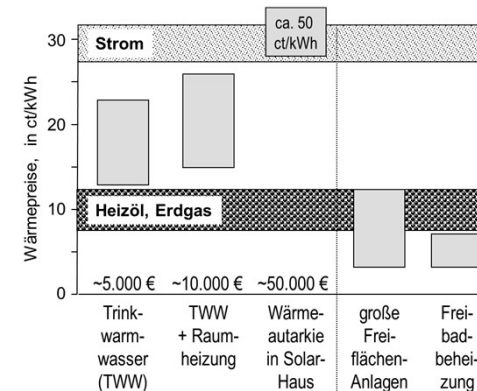
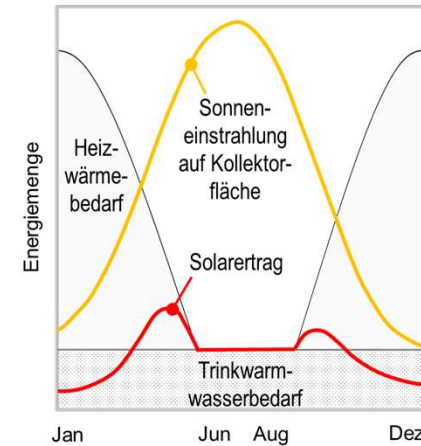
Thermische Solaranlagen – Fazit

Dimensionierung

- zeitlichen Verlauf des Bedarfs mit einbeziehen
- „kleine“ Anlagen: ca. 1 m² Kollektorfläche und 75 l Speicherinhalt pro Person
- „große“ Anlagen (mit saisonalem Speicher): 0,1 ... 0,2 m² Kollektorfläche pro m² Wohnfläche und 1 ... 10 m³ Speichervolumen pro m² Kollektorfläche

Wirtschaftlichkeit

- ökologisch: Amortisationszeit ca. 1 Jahr
- ökonomisch:
 - kleine Anlagen: ja, im Vergleich zur Wärmebereitstellung mit Strom
 - große Anlagen: ja, da erhebliche Kostendegression
 - insbesondere auf lange Sicht gesehen und mit Förderung



Lizenz- und Quellenhinweise

Folie 4: GREENoneTEC Solarindustrie GmbH , A-9300 St. Veit/Glan, Energieplatz 1

ORCA.nrw

Technology
Arts Sciences
TH Köln

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB



Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences
HSD

ISEA

Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

a d a m