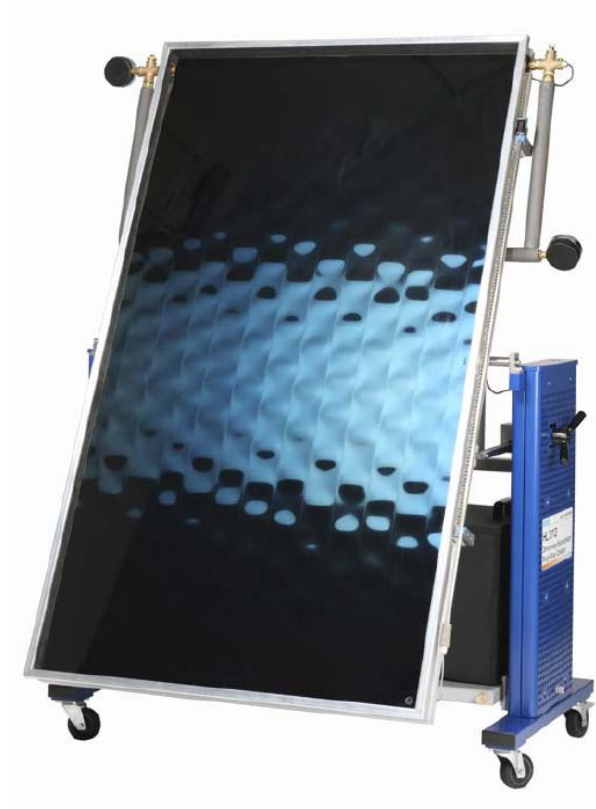


***Energie-Labor (ENLAB) – HS15***

Entdeckungsreise in der Welt der Energietechnik

***Postenlauf - 2-tägiger Versuch***

# Solarthermie: Flachkollektor zur Brauchwassererwärmung



Betreuungsperson:

Der Posten wurde von folgenden Studierenden durchgeführt:

- 
- 
- 
- 

Kohorte:

Gruppennummer:

Datum:

## **Fragen zur Vorbereitung auf den Postenlauf**

*Zur Vorbereitung dieser Fragen sollten Sie die folgenden Seiten bis Seite 10 gelesen haben.*

**1. Welche Rolle hat das Solarfluid, welches mit Hilfe einer Pumpe durch den Kollektor befördert wird?**

**2. Skizzieren Sie einen Solarkollektor und setzen Sie darum eine sinnvolle Systemgrenze. Stellen Sie die Energieerhaltungsgleichung auf und kürzen Sie überflüssige Terme, so dass die Energiebilanz um den Solarkollektor errechnet werden kann.**

**3. Welche Temperaturen sind für den Wirkungsgrad eines thermischen Solarkollektors bestimmend?**

**4. Bei welcher Kollektortemperatur ist der Wirkungsgrad 0?**

## Symbolverzeichnis

Bezeichnung	Symbol	Einheiten
Dichte	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]
Massenstrom	$\dot{m}$	[kg/s]
Spez. Wärmekapazität	$c_p$	[kJ/kg K]
Temperatur	$\vartheta$ oder $T$	[°C]
Volumenstrom	$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]
Wärmestrom	$\dot{Q}$	[W]
Oberfläche	$A$	[m <sup>2</sup> ]
Bestrahlungsstärke	$E_e$	[W/m <sup>2</sup> ]
Strahlungsleistung	$\Phi_e$	[W]
Solarer Ertrag	$\dot{Q}_s$	[W]
Übertemperatur	$\Delta T$	[K]
Strömungsgeschwindigkeit	$c$	[m/s]

## Gegebene Grössen

Nr.	Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
1	Absorberfläche	$A_A$	2.31	[m <sup>2</sup> ]	
2	Spez. Wärmekapazität Wasser	$c_{pW}$	4.19	[kJ/kg K]	
3	Spez. Wärmekapazität Solarfluid	$c_{pSF}$	3.45	[kJ/kg K]	
4	Dichte Wasser	$\rho_W$	998.2	[kg/m <sup>3</sup> ]	Bei 20 °C
5	Dichte Solarfluid	$\rho_{SF}$	1073	[kg/m <sup>3</sup> ]	Bei 20 °C
6	Volumen Brauchwarmwasser-speicher	$V_{BW}$	0.073	[m <sup>3</sup> ]	Bis unter oberen Ablauf gefüllt
7	Korrekturfaktor Lichtquelle	$K$	1.8	[-]	Herstellerangabe
8	Optischer Kollektorwirkungsgrad	$\eta_0$	0.81	[-]	Herstellerangabe
9	Linearer Verlustkoeffizient	$a_1$	4.5	[W/m <sup>2</sup> K]	Herstellerangabe
10	Quadratischer Verlustkoeffizient	$a_2$	0.18	[W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ]	Herstellerangabe

## Einheiten

Bitte rechnen Sie mit den im Symbolverzeichnis angegebenen Einheiten. Wird eine Grösse in einer anderen Einheit erfasst, muss sie umgerechnet werden.

## Hintergrund

Zur Bereitstellung von geheiztem Brauchwarmwasser können in Gegenden mit geeigneter Sonneneinstrahlung Solarkollektoren zum Einsatz kommen. Anstelle der Verbrennung fossiler Energieträger wird die Strahlung der Sonne genutzt. Hierbei wird dem Fluid, welches durch den Kollektor strömt (Solarfluid), Wärme zugeführt. Die aufgenommene Wärme kann dann mit Hilfe eines Wärmeübertragers wiederum dem Brauchwarmwasser zugeführt werden. Je nach Art des Kollektors wird eine Pumpe benötigt, um die Strömung des Solarfluids zu gewährleisten.

## Solarenergie: Grundlagen

Solarenergie trifft in Form von elektromagnetischer Strahlung auf die Erde. Die Strahlungsleistung der Sonne oberhalb der Erdatmosphäre wird als Solarkonstante bezeichnet und beträgt  $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ .

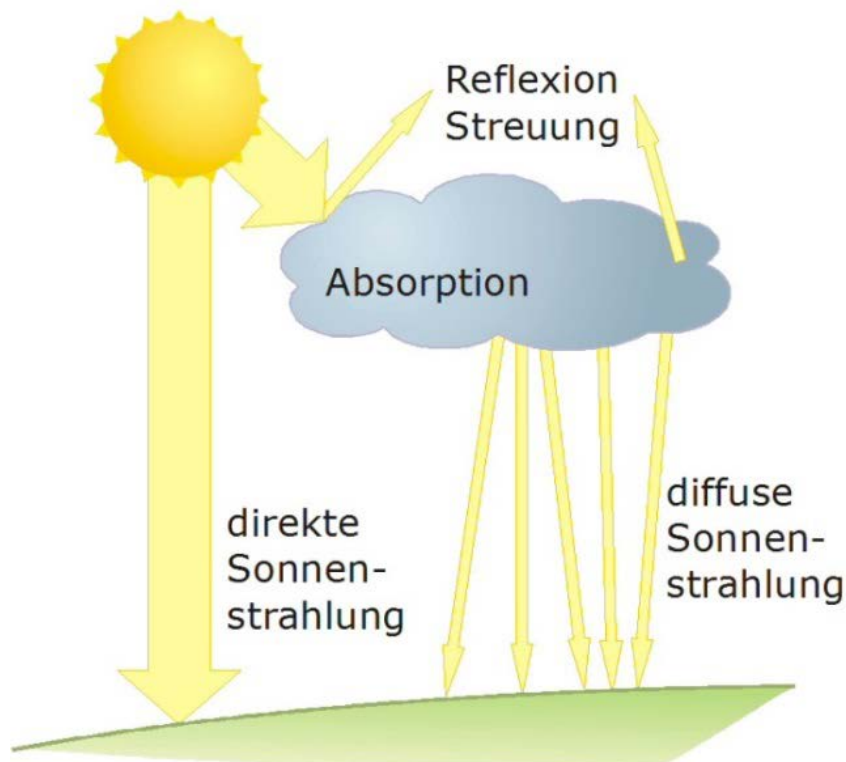


Abb. 1: Das Sonnenlicht beim Gang durch die Erde [Quaschnig 2009]

Ein Teil der Strahlung wird in der Atmosphäre an Wassertropfchen, Wasserdampf, Partikeln, Eiskristallen und Gasen reflektiert und gestreut, wodurch ein Teil der gerichteten Direktstrahlung in ungerichtete Diffusstrahlung grösserer Wellenlänge umgewandelt wird. Ein weiterer Teil wird von der Atmosphäre absorbiert und in Wärme umgewandelt. Der Rest gelangt zusammen mit der Diffusstrahlung bis auf die Erdoberfläche und wird dort teilweise reflektiert, teilweise durch Photosynthese zu Biomasse umgewandelt und zu einem grossen Teil absorbiert und dadurch in langwellige Infrarot-Strahlung und Wärme umgewandelt. Die Erde weist ihr Strahlungsmaximum bei einer grösseren Wellenlänge auf als die Sonne. Strahlung mit einer grösseren Wellenlänge wird von der Atmosphäre besser absorbiert als die kurzwellige Strahlung der Sonne, was den Treibhauseffekt zur Folge hat. An einem wolkenfreien Tag beträgt die Bestrahlungsstärke auf der Erdoberfläche  $E_e = 1000 \text{ W/m}^2$ .

Die jährlich auf die Erde eingestrahlte Sonnenenergie beträgt  $1.08 \cdot 10^{12} \text{ GWh}$ . Das entspricht etwa dem 10'000-fachen des weltweiten Bedarfs an Primärenergie. In der Energie der Sonne steckt riesiges Potenzial, wie in nachfolgender Abbildung (Abb. 2) zu sehen ist. Sie stellt das Verhältnis von Energiebedarf und Energieangebot verschiedener Energieträger grafisch dar. Zudem ist die Sonne eine aus unserer Sicht erneuerbare Energiequelle.



Abb. 2: Weltweite Energiemengen im Vergleich [BMW]

## Solarenergie: Technische Nutzung

Die technische Nutzung der Sonnenenergie hat zum Ziel, einen möglichst grossen Teil der direkten und teilweise auch der indirekten Strahlung in Wärme oder elektrische Energie umzuwandeln. Diese beiden Energieformen sollen entweder am Anlagenstandort als Nutzenergie zur Verfügung stehen oder im Falle einer Verteilung als Endenergie in Erscheinung treten.

Fotovoltaikzellen wandeln Solarenergie direkt in elektrische Energie (Exergie) um. Wirkungsgrade in der Praxis bewegen sich je nach Typ zwischen 8-18%. Bei der thermischen Nutzung wird zwischen konzentrierenden und nicht konzentrierenden solarthermischen Anlagen unterschieden.

Bei konzentrierter Nutzung wird die Sonnenstrahlung auf einen geometrischen Körper oder eine Leitung fokussiert und so ein Fluid erhitzt. Es können somit höhere Temperaturen als bei der nicht konzentrierten Nutzung erreicht werden. Anwendungen finden sich in der Verfahrenstechnik und der Stromerzeugung. Letzteres setzt Prozesstemperaturen in Wärmekraftanlagen von 300-400°C voraus.

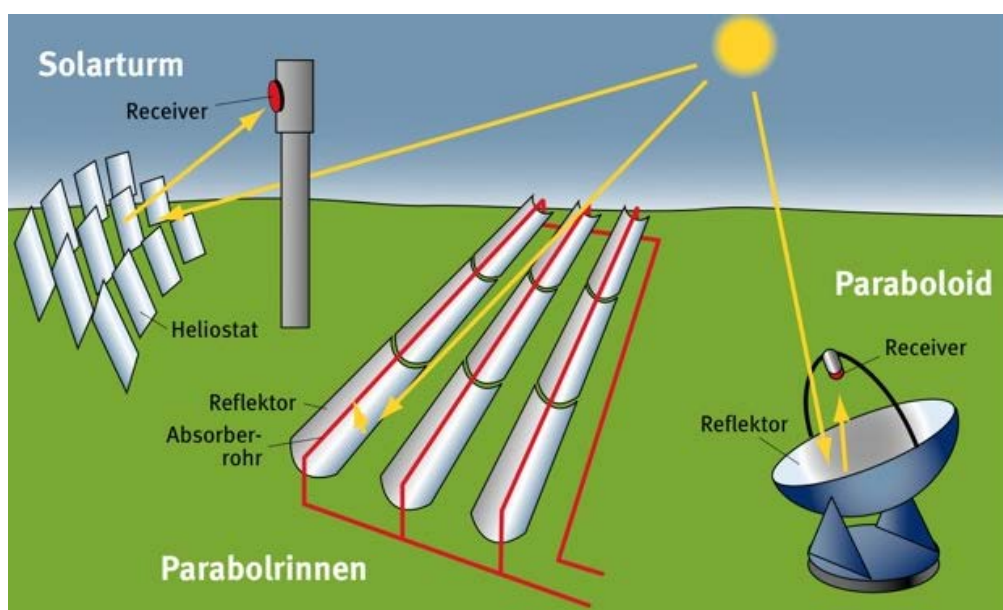


Abb. 3: Anwendungen von Solarkonzentratoren [Welt der Physik]

Auf die Fotovoltaik und die konzentrierende Nutzung wird hier jedoch nicht weiter eingegangen.

Bei der nicht konzentrierten Solarthermie trifft die Sonnenstrahlung gleichmässig auf die Kollektoroberfläche. In der nachfolgenden Abbildung (Abb. 5) eines Flachkollektors strömt das Solarfluid durch ein Kupferrohr, nimmt dabei Wärme auf und erhitzt sich.

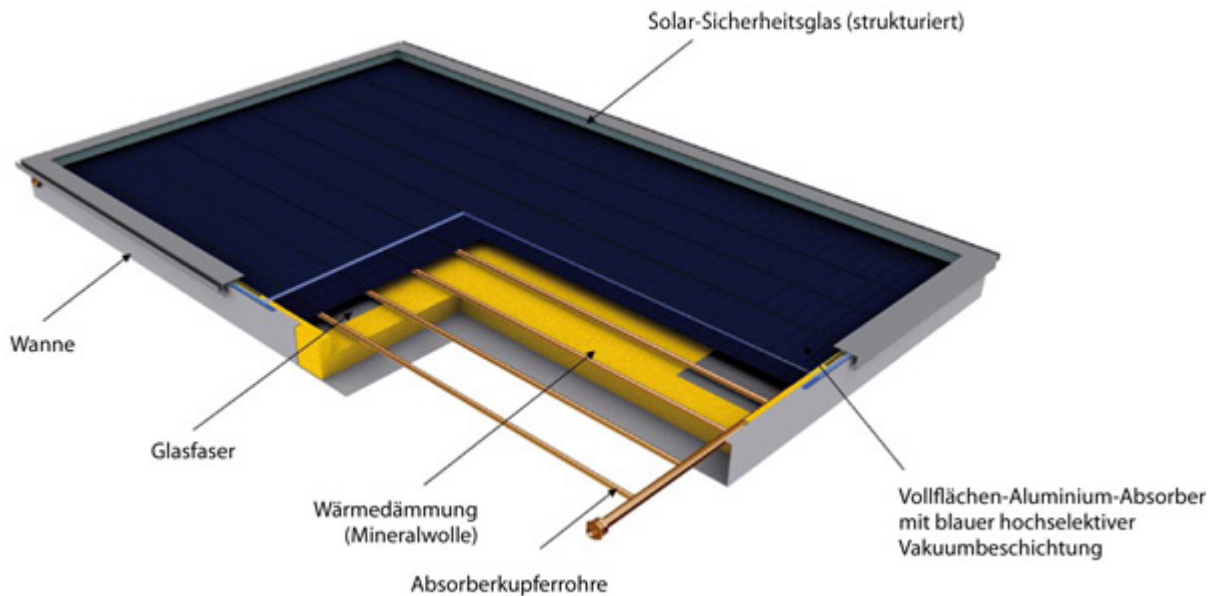


Abb. 4: Aufbau eines Flachkollektors [zewo therm]

In Abb. 5 sind die wichtigsten Energieströme eines typischen Flachkollektors aufgeführt. Bei den Verlusten wird zwischen optischen und thermischen Verlusten unterschieden. Optische Verluste entstehen durch Reflexion und Absorption der Sonnenstrahlung von der Glasabdeckung und der Absorberfläche. Thermisch geht Wärmeleistung durch Konvektion, Wärmeleitung und Strahlung verloren. Sinn der Glasabdeckung ist neben dem Schutz des Kollektors auch die Verringerung des Konvektionsverlustes.

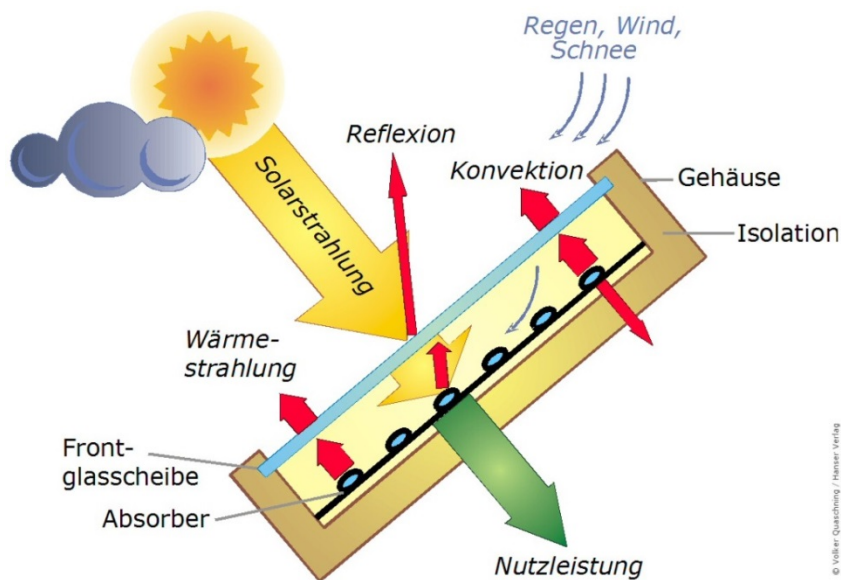


Abb. 5: Energieumwandlung am Kollektor [Quaschning]

Der experimentell ermittelte Wirkungsgrad eines Kollektors  $\eta_{K, \text{exp}}$  ist das Verhältnis zwischen Strahlungsleistung und thermischer Leistung. Die Strahlungsleistung ergibt sich aus dem Produkt der Strahlungsleistung und der Absorberfläche. Der vom Solarfluid aufgenommene Wärmestrom entspricht der thermischen Leistung.



$$\eta_{K, \exp} = \frac{\dot{Q}_{SF}}{\Phi_e} \quad [-]$$

$$\dot{Q}_{SF} = \dot{V}_{SF} \cdot \rho_{SF} \cdot c_{pSF} \cdot (T_o - T_i) \quad [W]$$

$$\Phi_e = E_e \cdot A_A \quad [W]$$

Der theoretische Kollektorkennwert  $\eta_{K,theo}$  ist von der Temperaturdifferenz des Kollektors zur Umgebung, der sogenannten Übertemperatur  $\Delta T$  abhängig. Sie kann als Mittelwert der Temperaturen von Kollektoreingang  $T_i$  und Kollektorausgang  $T_o$  abzüglich der Umgebungstemperatur  $T_a$  beschrieben werden:

$$\Delta T = \frac{T_i + T_o}{2} - T_a \quad [K]$$

Zur Berechnung des Kollektorkennwertes werden kollektorspezifische Kennwerte wie der optische Wirkungsgrad  $\eta_0$ , sowie der lineare und quadratische Verlustkoeffizient benötigt:

$$\eta_{K,theo} = \eta_0 - \frac{a_1 \cdot \Delta T}{E_e} - \frac{a_2 \cdot \Delta T^2}{E_e} \quad [-]$$

Die thermischen Verluste steigen mit zunehmender Übertemperatur bis zu dem Punkt, an dem die gesamten Verluste gleich dem Wert der Bestrahlungstärke sind, sodass der Wirkungsgrad 0 wird. Dieser Punkt wird Stagnationspunkt genannt und entspricht dem Wert der Stillstandstemperatur im Kollektor. Diese kann ebenfalls dadurch ermittelt werden, indem der Kollektor bestrahlt wird und kein Solarfluid zirkuliert.

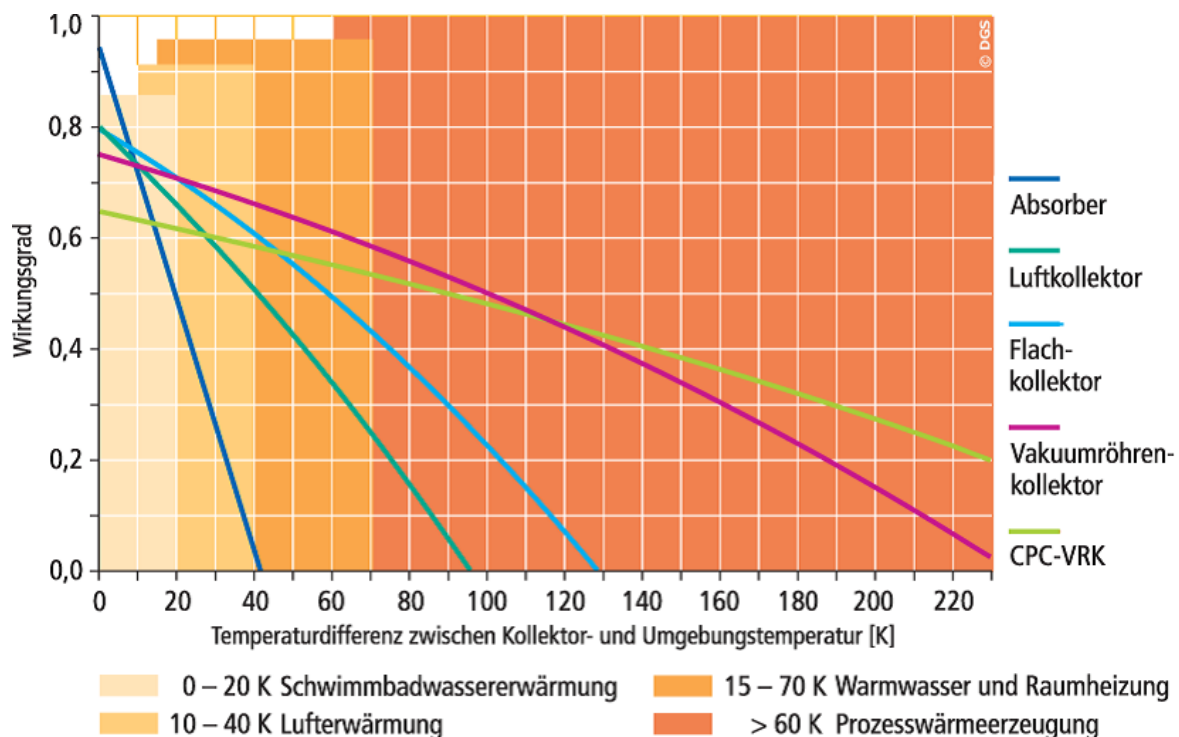


Abb. 6: Kollektorkennlinien und Anwendungsbereiche bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m<sup>2</sup>

[dgs Solarthermischer Leitfaden 2008]

Abb. 6 zeigt den Verlauf der Wirkungsgradlinie für verschiedene Kollektortypen. Beachten Sie, dass der Wirkungsgrad auch bei einer Übertemperatur von 0 kleiner als 1 ist. Dies ist durch die optischen Verluste der Kollektoren zu erklären.

## Solarenergie: Wärmeübertragung

Wärmeübertragung spielt in der Energietechnik in vielen Bereichen eine zentrale Rolle. Im Zusammenhang mit der Solarenergie betrifft dies zum Beispiel die Wärmeübertragung von der Sonne durch Strahlung auf die Erdoberfläche oder die Wärmeübertragung im Kollektor auf das Solarfluid.

Damit ein Wärmestrom zwischen zwei Stoffen fließt, muss ein Temperaturunterschied vorhanden sein. Da von der Natur ein thermisches Gleichgewicht angestrebt (gleiche Temperaturen) wird, fließt ein Wärmestrom vom warmen zum kalten Stoff.

Wärme kann grundsätzlich durch drei verschiedene Vorgänge übertragen werden:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Strahlung

In der nachfolgenden Abbildung (Abb. 7) werden die Verluste an einem Kollektor dargestellt.

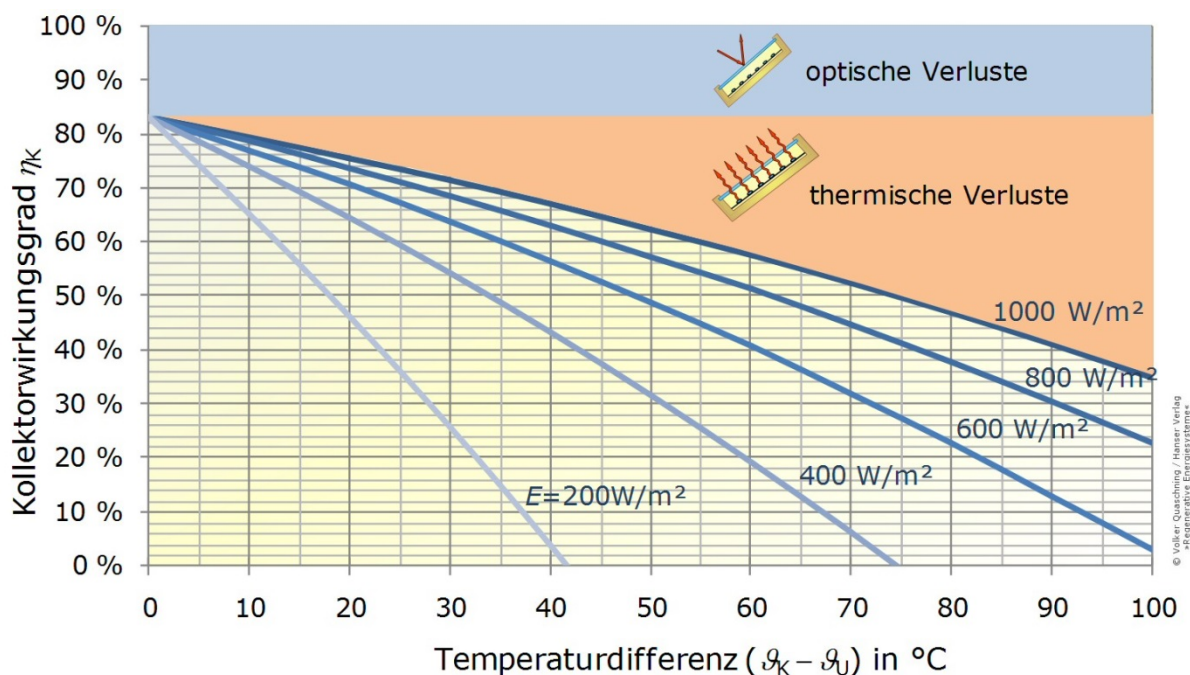


Abb. 7: Zusammensetzung der Verluste eines Kollektors [Quaschnig]

Der durchschnittliche Wärmestrom, der von einem „gespeicherten“ Fluid (z.B. Brauchwarmwasser im Boiler) aufgenommen wird, kann durch folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$\dot{Q}_W = \frac{V_W \cdot \rho_W}{\Delta t} \cdot c_{pW} \cdot (T_W(t_2) - T_W(t_1)) \quad [\text{W}]$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad [\text{W}]$$



## Demonstrationsanlage: Flachkollektor zur Brauchwassererwärmung

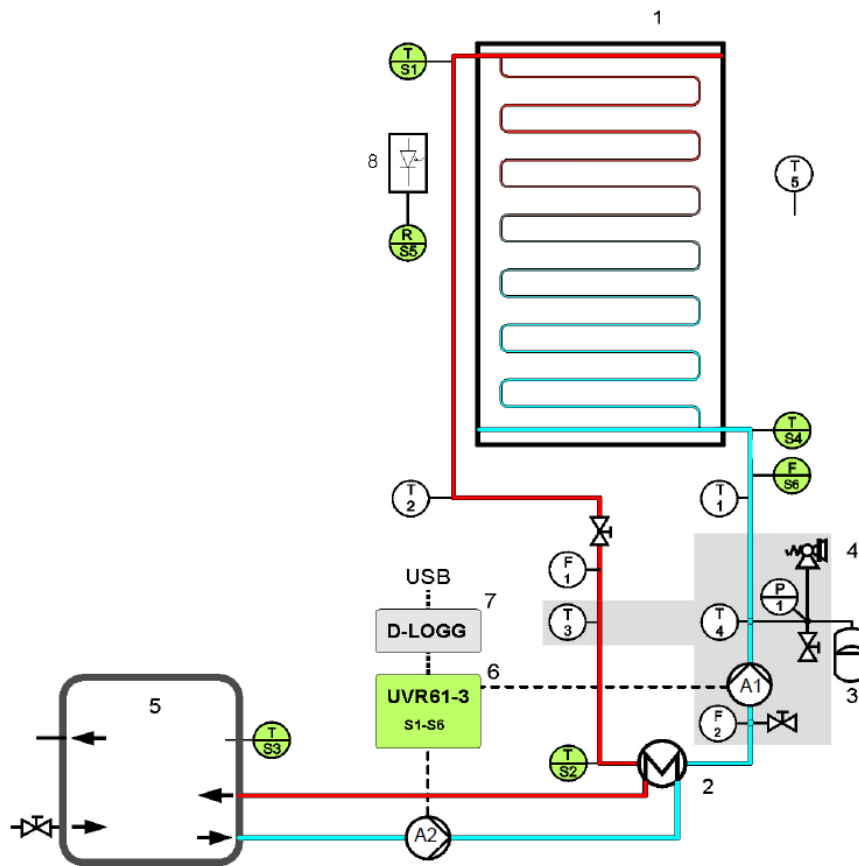


Abb. 8: Prozessschema Brauchwarmwassererwärmung

Die Anlage besteht aus 2 Strömungskreisläufen, dem Solarkreis (Solarfluid) und dem Wasserkreis (Speicherwasser). Das Solarfluid strömt durch den Kollektor und nimmt dabei Wärme auf. Anschliessend strömt es durch einen Wärmeübertrager, wo es Wärme an das kühlere Wasser des Speichers abgibt.

Um einen Druckanstieg des Solarfluids zu vermeiden, ist ein Ausdehnungsgefäß Teil des Solarkreises. Die beiden Kreisläufe werden jeweils durch eine Pumpe angetrieben.

Die grünen Kreise, welche auf Abb. 8 zu erkennen sind, sind Sensoren, mit dessen Hilfe man am Computer Temperaturen sowie Durchflussraten auslesen kann.

Pumpe A1 nimmt unter Volllast eine Leistung von 49 W auf, Pumpe A2 70 W. Der gesamte Versuchsaufbau inkl. Steuerung hat eine Leistungsaufnahme von 250 W.

## **Zieldefinition**

### **Zeitlimite:**

2 x 4 Lektionen

### **Aufgabe:**

Messen und errechnen Sie die geforderten Werte anhand der folgenden Arbeitsblätter mit Hilfe der WinSol-Software.

Bearbeiten Sie die folgenden Aufgabenblätter so selbständig wie möglich.

Bei Fragen wenden Sie sich an den zuständigen Assistenten oder Dozenten.

### **Abzugeben sind:**

- ☒ ausgefülltes Titelblatt
- ☒ bearbeitete Arbeitsblätter

Die Arbeitsblätter werden korrigiert und wenn nötig bei der Rückgabe mit Ihnen besprochen. Die Rückgabe findet Ende Semester statt.

### Aufgabe 1 – Bestimmung der Bestrahlungsstärke $E_e$

Um die folgenden Versuche durchführen zu können, muss zuerst die Bestrahlungsstärke bestimmt werden.

**VORSICHT: Schauen Sie nicht direkt in die Lampen und berühren Sie das Gehäuse nur mit Schutzhandschuhen.**

Hierfür wird die kleine Solarzelle am Metallstab genutzt und von Hand an 8 Punkten des Kollektors die Bestrahlungsstärke gemessen. Anschliessend kann aus den Ergebnissen der Mittelwert errechnet werden. Beachten Sie, dass die künstliche Lichtquelle in einem Abstand von ca. 1.6 m zum Kollektor steht.

Da das Strahlungsspektrum der Lichtquelle von dem der Sonne abweicht, müssen die gemessenen Werte jeweils mit dem Korrekturfaktor  $K = 1.8$  multipliziert werden.

$E_{e1}$	$E_{e2}$	$E_{e3}$	$E_{e4}$	$E_{e5}$	$E_{e6}$	$E_{e7}$	$E_{e8}$	Datum
[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	

Der Mittelwert der 8 gemessenen Bestrahlungsstärken:

Multipliziert mit  $K$  folgt die Bestrahlungsstärke  $E_e$ :

$$E_e =$$

Die Strahlungsleistung errechnet sich mit der Bestrahlungsstärke und der Kollektoroberfläche:

$$\Phi_e =$$

Die Resultate können für die weiteren Versuche verwendet werden.

## Aufgabe 2 – Bestimmung des Wirkungsgrades bei unterschiedlichen Solarfluid-Volumenströmen

Um den Wirkungsgrad des Kollektors zu bestimmen, müssen die Kollektoreintrittstemperatur  $T_i$  und die Kollektoraustrittstemperatur  $T_o$  des Solarfluids gemessen werden. Anstelle von natürlichem Sonnenlicht wird im Labor eine künstliche Lichtquelle verwendet.

**VORSICHT: Schauen Sie nicht direkt in die Lampen und berühren Sie das Gehäuse nur mit Schutzhandschuhen!**

Stellen Sie mit Hilfe der Betreuungsperson die in folgender Tabelle vorgegebenen Solarfluidmassenströme ein. Nach einer gewissen Zeit wird sich das System einem stationären Zustand annähern. Lesen Sie die Werte erst heraus, wenn diese stationär sind. Die Messdaten können mit Hilfe der Software WinSol gemessen werden.

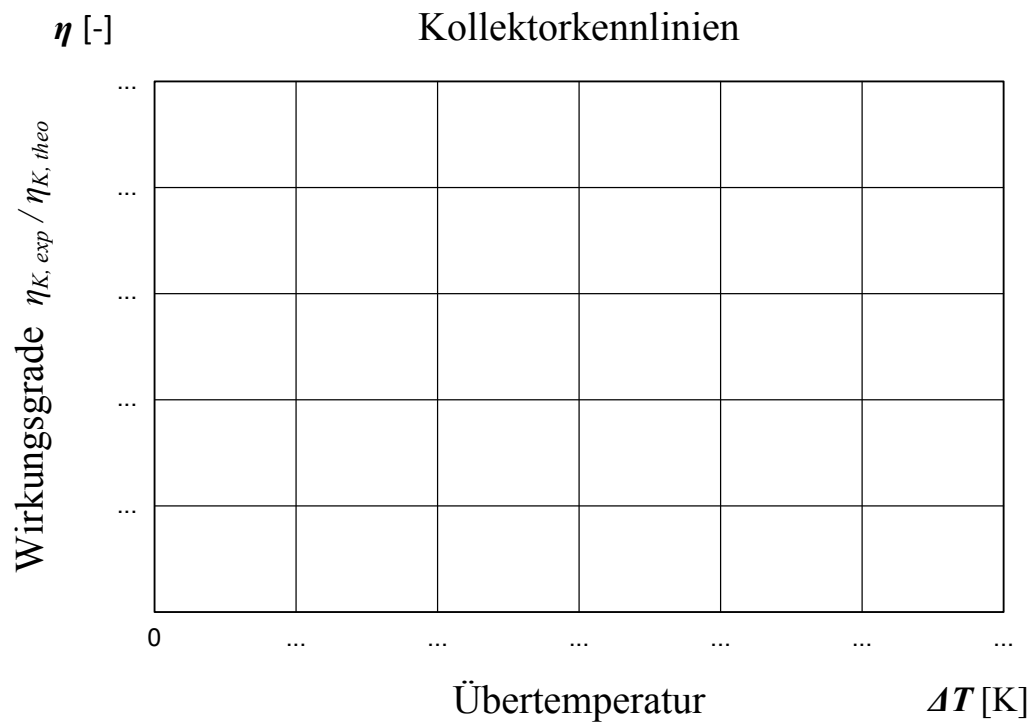
$T_i$	$T_o$	$\Delta T$	$\dot{V}_{SF\,soll}$	$\dot{V}_{SF\,ist}$	$\dot{Q}_{SF}$	$\dot{Q}_V$	$\eta_{K,\,exp}$	$\eta_{K,\,theo}$
[°C]	[°C]	[K]	[l/h]	[l/h]	[W]	[W]	[-]	[-]
			20					
			40					
			60					
			80					

$$T_a =$$

$$\Phi_e =$$

**Berechnungen:**

Tragen Sie im unten aufgeführten Diagramm die vier errechneten Wirkungsgrade ein. Beim Verbinden der Datenpunkte ist ein Trend ersichtlich, bitte beschreiben Sie was Ihnen auffällt.



Die künstliche Lichtquelle benötigt 8 kW elektrische Energie. Zeichnen Sie unten ein Energieflussbild für einen gemessenen Zustand, welches von der künstlichen Lichtquelle bis zum Wasser im Speicher führt.

### **Aufgabe 3 – Brauchwarmwassererwärmung**

Beim Versuch „Brauchwarmwassererwärmung“ wird nur das im Speicher enthaltene Wasser erwärmt. Ziel ist, das Wasser im Speicher auf eine gewünschte Temperatur zu erwärmen. Im Haushalt sind dies beispielsweise 60°C.

Bei der Erwärmung des im Speicher enthaltenen Wassers handelt es sich um einen instationären Zustand. Diskutieren und beantworten Sie zuerst Frage 1-4 in der Gruppe, bevor Sie mit dem Versuch starten.

**VORSICHT: Schauen Sie nicht direkt in die Lampen und berühren Sie das Gehäuse nur mit Schutzhandschuhen!**

**Frage 1:** Welchen Einfluss hat der Volumenstrom des Solarfluides auf den ans Brauchwarmwasser übertragbaren Wärmestrom? Spielen dabei die Temperaturen des Speichers eine Rolle?

**Frage 2:** Welche Temperaturen etc. müssen gemessen werden, um den das Brauchwarmwasser übertragene Wärmestrom zu errechnen?

**Frage 3:** Wie wird sich der vom Brauchwasser aufgenommene Wärmestrom mit der Zeit verändern? Was für Auswirkungen hat das auf die Übertemperatur und den Wirkungsgrad?

**Frage 4:** Wie können Sie die vom Brauchwarmwasser innert 60 Minuten aufgenommene Wärmemenge errechnen?



Stellen Sie nun wiederum mit der Begleitperson den Versuch so um, dass das Wasser im Speicher kontinuierlich erwärmt wird. Der Volumenstrom des Solarfluides wird konstant auf hohem Niveau gehalten. Lesen Sie alle 10 Minuten die Werte aus dem Anzeigeprogramm heraus. Tragen Sie in den Diagrammen auf der folgenden Seite die errechneten Werte ein. Beim Verbinden der Datenpunkte ist ein Trend ersichtlich, bitte beschreiben Sie, was Ihnen auffällt.

$t$	[hh:mm:ss]								
$\Delta t$	[s]	-							
$T_i$	[°C]								
$T_o$	[°C]								
$T_o - T_i$	[K]								
$\Delta T$	[K]								
$T_{\text{Speicher}}$	[°C]								
$\Delta T_{\text{Speicher}}$	[K]	-							
$\dot{V}_{SF}$	[l/h]								
$\overline{\dot{Q}_S}$	[W]								
$\dot{Q}_{SF}$	[W]								
$\eta_{K,exp}$	[%]								
$\eta_{Anlage}$	[%]								

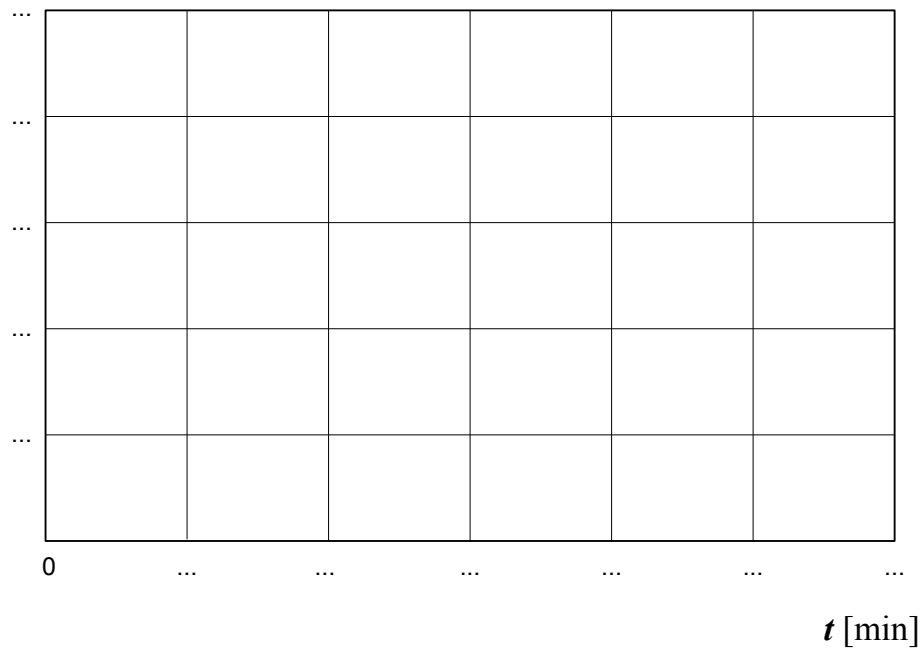
$$T_a =$$

$$\Phi_e =$$

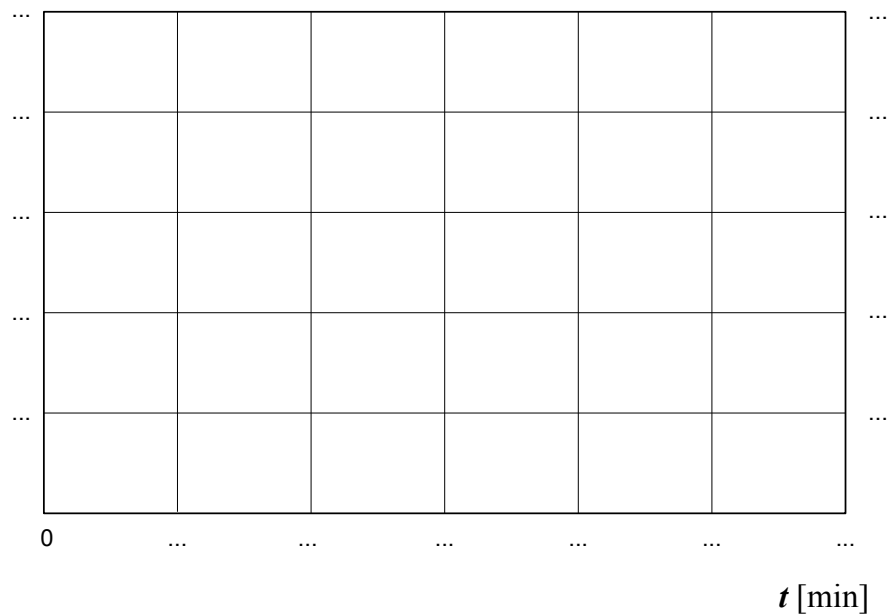
$$V_{\text{Speicher}} = l \cdot b \cdot z = 450 \text{ mm} \cdot 450 \text{ mm} \cdot \dots \text{ mm} = \dots \text{ mm}^3$$

**Berechnungen:**

# $T$ [°C]      Temperaturverlauf im Speicher



# $\Delta T$ [K]      Übertemperatur/Wirkungsgrad      $\eta$ [-]



#### Aufgabe 4 – Einfluss der Konvektion

Wie in den Berechnungen der Aufgabe 2 gesehen und in Abb. 5 beschrieben, entstehen thermische Verluste am Kollektor. Nebst den Strahlungsverlusten und den Verlusten über die Leitungen wird dem Kollektor mittels Konvektion Wärme abgeführt.

Konvektion ist definiert als „Strömungsbewegung in einem flüssigen oder gasförmigen Medium“. Angewendet auf den Solarkollektor bedeutet dies, dass ein Luftstrom, der über den Kollektor strömt, diesen abkühlen kann. Freie Konvektion entsteht durch die sich an der Oberfläche des Kollektors erwärmende und dadurch aufsteigende Luft, welche „kalte“ Umgebungsluft nachzieht.

Als erzwungene Konvektion kann im weitesten Sinne der Wind betrachtet werden, welcher über den Kollektor strömt. Der Wind wird im Labor mit einem Ventilator simuliert. Messen Sie nun den unten vorgegebenen Betriebspunkt mit freier und erzwungener Konvektion. Die Strömungsgeschwindigkeit über den Kollektor kann mit einem Anemometer gemessen werden. Beschreiben Sie mit eigenen Worten den Einfluss der Konvektion.

Konvektion	$T_i$	$T_o$	$\Delta T$	$\dot{V}_{SF}$	$c$	$\dot{Q}_{SF}$	$\dot{Q}_V$	$\eta_{K, \exp}$	$\eta_{K, theo}$
	[°C]	[°C]	[K]	[l/h]	[m/s]	[W]	[W]	[-]	[-]
1) frei				20					
2) erzwungen				20					
3) erzwungen <sup>1</sup>				20					

<sup>1</sup> mit grösserer Ventilatorenleistung als bei 2)

$$T_a =$$

$$\Phi_e =$$

**Berechnungen:**

