

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W5
Institut für Physik	Sonnenkollektor	Seite 1

1. Aufgabenstellung

- 1.1. Die Wirkungsgrade eines Sonnenkollektors bei Zimmertemperatur sind mit und ohne Glasabdeckung zu bestimmen, durch Vergleich beider ist der Transmissionsgrad der Glasscheibe abzuschätzen.
- 1.2. Bei Wasserkreislauftemperaturen unter der Zimmertemperatur ist die Wärmeaufnahme des Kollektors ohne direkte Lichteinstrahlung zu untersuchen.
- 1.3. Die Wirkungsgrade des Kollektors für Wasserkreislauftemperaturen oberhalb der Zimmertemperatur sind für verschiedene äußere Einflüsse zu bestimmen und zu diskutieren.

Literatur:

	Stroppe, H.	Physik für Studenten der Natur- und Technikwissenschaften Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag 11. Auflage 1999, S. 402-410
	Kleemann, M. Meliss, M.	Regenerative Energiequellen Springer Verlag 2. Auflage 1993, S. 50-58

2. Grundlagen

Ein Sonnenkollektor dient der Gewinnung von Wärme direkt aus der Strahlungsenergie der Sonne. Die solare Bestrahlungsstärke $E_{s,0}$ der Erde beträgt außerhalb der Erdatmosphäre im Mittel 1367 W/m^2 , die spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung kann in guter Näherung mit derjenigen eines schwarzen Körpers mit einer Temperatur von $T_s \approx 5800 \text{ K}$ beschrieben werden. Mit dem aus dem Planckschen Strahlungsgesetz folgenden Wienschen Verschiebungsgesetz lässt sich das Maximum der Strahlungsemission mit $\lambda_{\text{max}} \approx 500 \text{ nm}$ angeben, 90% der abgestrahlten Energie entfallen auf den Bereich zwischen 300 nm und $1,5 \mu\text{m}$.

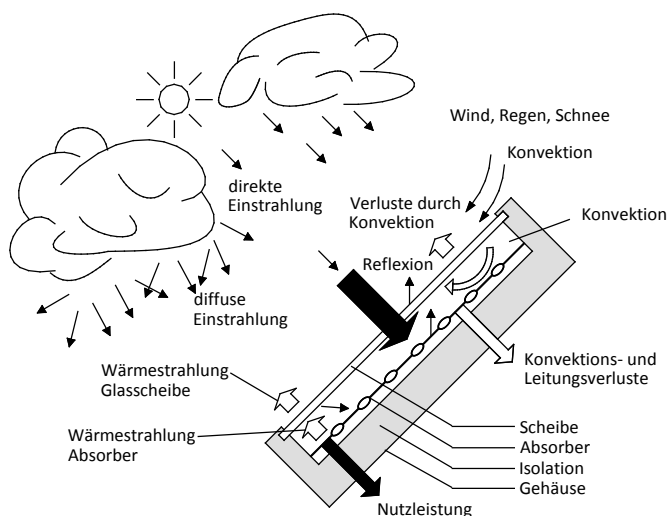


Abb. 1: Aufbau eines Sonnenkollektors

Die vom Kollektor aufgenommene Energie hängt außer vom sorgfältigen Aufbau des Systems stark vom Sonnenstand (Auftrittswinkel der Strahlung auf den Kollektor) und den vorherrschenden Wetterbedingungen (Windstärke und -richtung, Bewölkung, Niederschläge) ab.

Der prinzipielle Aufbau eines Sonnenkollektors ist in Abb. 1 skizziert. Im Wesentlichen besteht dieser aus einem Absorber, der für den Hauptteil der auftretenden Sonnenstrahlung einen hohen (integralen) Absorptionsgrad α aufweist. Die absorbierte Strahlungsenergie wird an einen Wärmeträger (z. B. Wasser) abgegeben und als Nutzwärme einem Sekundärkreislauf zugeführt. Zur Minimierung von Wärmeverlusten durch Wiederabstrahlung und Konvektion befindet sich der Absorber in einem wärmeisolierten Gehäuse mit einer für die Sonnenstrahlung

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W5
Institut für Physik	Sonnenkollektor	Seite 2

Transmissionsgrad τ und Reflexionsgrad ζ der Glasabdeckung müssen wellenlängenabhängig an die Erfordernisse eines Sonnenkollektors angepasst sein (selektive Kollektorabdeckung). Betrachtet man den Absorber als schwarzen Strahler, dann liegt das Emissionsmaximum der reemittierten Temperaturstrahlung bei einer angenommenen Absorbtemperatur von 100°C in der Nähe von $7,8\mu\text{m}$. Um die Abstrahlungsverluste gering zu halten, sollte der Reflexionsgrad in diesem langwelligen Spektralbereich hoch sein. Bei gleichzeitig hohem Transmissionsgrad im kurzwelligeren Sonnenspektrum bewirken beide Materialeigenschaften zusammen einen Treibhauseffekt im Sonnenkollektor.

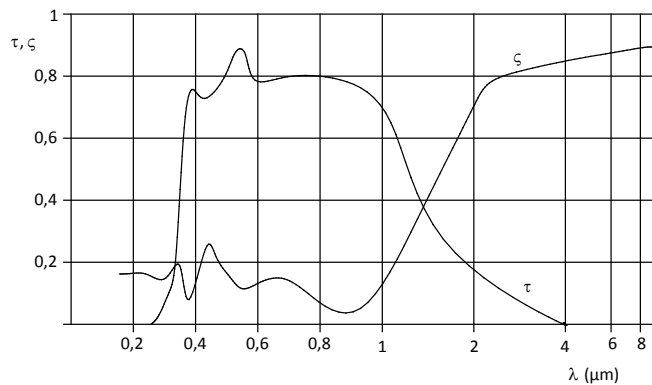


Abb. 2: $\tau(\lambda)$ und $\zeta(\lambda)$ für eine selektive Kollektorabdeckung

Zur quantitativen Beschreibung der Verhältnisse wird von einer konstanten Bestrahlungsstärke E_s des Kollektors ausgegangen. Die die Abdeckung pro Zeit- und Flächeneinheit passierende Strahlungsenergie trifft auf den Absorber, wird hier zum größten Teil absorbiert und in Wärme umgewandelt:

$$\dot{Q}_A = A \tau \alpha E_s, \quad (1)$$

A ist die als homogen bestrahlt angenommene Kollektorfläche. Die Wärmeleistung \dot{Q}_A steht allerdings nicht vollständig nutzbar als \dot{Q}_N zur Verfügung, vielmehr geht noch ein Anteil \dot{Q}_V als Verlustleistung durch Wärmestrahlung, -leitung und -strömung verloren. Diese Verluste sind umso größer, je höher die Temperaturdifferenz zwischen Absorbtemperatur ϑ_{Abs} und Umgebungstemperatur ϑ_U ist. Die rückseitige Isolierung bestimmt hierbei die Wärmeleitungsverluste, an der Vorderseite treten bevorzugt Verluste durch Strahlung und Konvektion auf. Bei konstanter Absorbtemperatur können die Verluste vereinfachend durch den Ausdruck

$$\dot{Q}_V = A_V k (\vartheta_{Abs} - \vartheta_U) \quad (2)$$

beschrieben werden, k ist hierbei der Wärmedurchgangskoeffizient und A_V die effektive Fläche, die für die Verluste verantwortlich ist. Zusammen mit $\dot{Q}_N = \dot{Q}_A - \dot{Q}_V$ lässt sich jetzt ein Wirkungsgrad η abgeben, der das Verhältnis von nutzbarer Wärmeleistung zu eingestrahelter Strahlungsleistung beschreibt:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_N}{A E_s} = \tau \alpha - \frac{A_V k}{A E_s} (\vartheta_{Abs} - \vartheta_U). \quad (3)$$

Da die Absorbtemperatur nicht direkt bekannt ist, wird dafür die mittlere Wassertemperatur ϑ_w eingesetzt. Die dadurch bedingte Abweichung in (3) und die bisher noch nicht betrachtete Wärmeübergangszahl vom Absorber an das Wasser wird durch einen pauschalen Faktor, den Absorberwirkungsgradfaktor f , berücksichtigt:

$$\eta = f \left[\tau \alpha - \frac{A_V k}{A E_s} (\vartheta_w - \vartheta_U) \right]. \quad (4)$$

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W5
Institut für Physik	Sonnenkollektor	Seite 3

3. Messanleitung und Auswertung

Im vorliegenden Versuchsaufbau stellt ein Thermostat/Kryostat Wasser mit einer vorwählbaren Ausgangstemperatur bereit. Eine Umwälzpumpe pumpt das Wasser über wärmeisolierte Schlauchleitungen durch ein einstellbares Nadelventil mit Durchflussmesser oder alternativ durch einen Bypass in den Absorber und dann zurück in den Thermostaten. Der Temperaturmessung dienen Pt100-Widerstandsthermometer am Absorbereinlauf (ϑ_E , blau gekennzeichnet) und an seinem Auslauf (ϑ_A , rot gekennzeichnet). Das Temperaturmessgerät bietet verschiedene Anzeigemodi (vgl. Anleitung am Versuchsplatz):

- Anzeige der Temperaturen ϑ_A und ϑ_E jeweils in °C (empfohlen)
- Anzeige der Temperaturdifferenz $\vartheta_A - \vartheta_E$ in K sowie der Einlauftemperatur ϑ_E in °C, in diese Betriebsart darf für diesen Versuch nur dann umgeschaltet werden, wenn beide Temperaturen zum Umschaltzeitpunkt gleich waren

Über die mit dem Durchflussmesser bestimmbare Volumenstromstärke \dot{V} lässt sich die abgeführte Wärmeleistung bei Kenntnis von Massedichte ρ und spezifischer Wärmekapazität c des Wassers als Nutzleistung \dot{Q}_N messen:

$$\dot{Q}_N = c\rho\dot{V}(\vartheta_A - \vartheta_E). \quad (5)$$

Für alle Versuchsteile ist die Volumenstromstärke $\dot{V} = 200 \text{ cm}^3/\text{min}$ einzustellen. Diese liest man am horizontalen Durchmesser der Schwebkugel an der Messrohrskala ab.

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades nach (3) wird noch die Absorberfläche A benötigt, diese ist durch Abmessen der hierfür relevanten Längen selbst zu bestimmen. Die mittlere Bestrahlungsstärke in einem senkrechten Abstand $r = 0,5 \text{ m}$ von der Lichtquelle (Streuscheibe einer Halogenleuchte) beträgt $\bar{E}_s = 935 \text{ W}/\text{m}^2$. Man erhält schließlich:

$$\eta = \frac{c\rho\dot{V}(\vartheta_A - \vartheta_E)_{stat}}{AE_s}. \quad (6)$$

Für die Berechnung des Wirkungsgrades nach (6) wurde ein stationärer Zustand des Systems Kollektor/Verbraucher vorausgesetzt. In der zur Verfügung stehenden Praktikumszeit ist ein Abwarten dieses Zustands nach Veränderung äußerer Bedingungen jedoch praktisch nicht realisierbar. Es sind daher stets Temperatur-Zeit-Kurven $\vartheta_A - \vartheta_E = f(t)$ aufzunehmen und grafisch darzustellen. Für den exponentiell verlaufenden, in eine Asymptote mündenden Teil der Messung kann dann eine nichtlineare Regression, d. h. numerische Anpassung von Parametern der Funktion „ $y = a \exp(bx) + c$ “ an die Messwerte vorgenommen werden, der Parameter „ c “ dieser Anpassung ist als wahrscheinlicher stationärer Wert für $(\vartheta_A - \vartheta_E)_{stat}$ zu verwenden.

3.1. Transmissionsgrad der Glasabdeckung

Gl. (4) vereinfacht sich stark, wenn der Sonnenkollektor bei einer Absorbertemperatur $\vartheta_{Abs} \approx \vartheta_W = \vartheta_U$ betrieben wird. Als Solltemperatur des Thermostaten ist daher die im Praktikumsraum abgelesene Umgebungstemperatur einzustellen. Nach dem Öffnen des Bypasses (Hahnknebel senkrecht) verfolgt

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W5
Institut für Physik	Sonnenkollektor	Seite 4

man die angezeigten Temperaturen ϑ_E und ϑ_A bis zu hinreichender Konstanz, das Kühlaggregat bleibt hierbei eingeschaltet, die Lichtquelle noch ausgeschaltet.

Die erste Messung erfolgt mit dem vollständigen Kollektor. Nach Schließen des Bypasses und Kontrolle des vorgegebenen Volumenstroms \dot{V} ist die im Abstand $r = 0,5m$ zur Glasabdeckung des Kollektors platzierte Halogenleuchte einzuschalten.

- Zu notieren sind die Temperaturen ϑ_A und ϑ_E über einen Zeitraum von 15min in Abständen von $\Delta t = 0,5min$, während der ersten Minute in Abständen von $\Delta t = 10s$.

Auf die gleiche Weise wird eine zweite Messreihe, diesmal mit abgenommener Glasabdeckung des Sonnenkollektors, vorbereitet und durchgeführt. Da die Kollektortemperatur nur wenig von der Umgebungstemperatur abweicht, sind die Wärmeverluste während beider Messreihen gering. Die Wirkungsgrade nach (4) betragen daher für die Messung mit Glasabdeckung $\eta_1 = f \tau \alpha$, für die ohne Glasabdeckung $\eta_2 = f \alpha$. Beide Wirkungsgrade sowie der Transmissionsgrad der eingesetzten Glasscheibe sind in Prozent anzugeben.

Sofort nach Beendigung der Messungen zu 3.1 sind als Solltemperatur 5°C vorzuwählen, die Glasabdeckung am Kollektor anzubringen und der Bypass am Strömungsmesser zu öffnen. Die Wartezeit beträgt ca. 30 min.

3.2. Wärmeaufnahme ohne direkte Lichteinstrahlung

Dieser Versuchsteil veranschaulicht auf einfache Weise die Möglichkeit der Energieaufnahme eines Sonnenkollektors ohne direkte Sonneneinstrahlung. Die Vorbereitung der Messreihe erfolgt wie unter 3.1 beschrieben. Sobald die Solltemperatur erreicht ist, werden der Bypass geschlossen und der Volumenstrom kontrolliert.

Bedingt durch die nicht ideale Wärmeisolierung der Schlauchleitungen und wegen der jetzt geringeren Strömungsgeschwindigkeit des Wassers in ihnen erhöht sich die Wassertemperatur auf dem Weg vom Thermostaten zum Kollektor geringfügig. Es sind daher zunächst ca. 5min abzuwarten, bis sich stabile Temperaturverhältnisse am Wassereinlauf und -auslauf eingestellt haben.

- Spätestens, wenn ϑ_A den Wert von ϑ_E übersteigt, wird mit dem Notieren beider Temperaturen in Abständen von $\Delta t = 0,5min$ begonnen. Die Messreihe erstreckt sich wieder über einen Zeitraum von 15min.

Die Ermittlung des wahrscheinlichen stationären Wertes $(\vartheta_A - \vartheta_E)_{stat}$ erfolgt wie oben beschrieben. Hieraus ist nach (5) die Nutzleistung des Sonnenkollektors ohne direkte Lichteinstrahlung zu berechnen.

Sofort nach Beendigung der Messungen zu 3.2 sind als Solltemperatur 50°C vorzuwählen, der Bypass am Strömungsmesser zu öffnen und das Kühlaggregat auszuschalten. Falls sich Kondenswasser im Kollektor gebildet hat, ist bei Erreichen der Zimmertemperatur die Glasabdeckung abzunehmen.

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W5
Institut für Physik	Sonnenkollektor	Seite 5

3.3. Wirkungsgrade unter verschiedenen äußeren Einflüssen

Sobald Thermostat und Sonnenkollektor ihre Solltemperatur erreicht haben, sind die Glasabdeckung anzubringen und der vorgegebene Volumenstrom zu kontrollieren. Zur Verbesserung des Temperaturregelverhaltens ist zusätzlich das Kühlaggregat des Thermostaten einzuschalten. In ähnlicher Weise wie im Versuchsteil 3.2 wird sich eine geringfügig verringerte Temperatur ϑ_E wegen der Abkühlung des Wassers auf dem Weg vom Thermostaten zum Kollektor einstellen. Nach Abwarten stabiler Temperaturverhältnisse des Wasserkreislaufs wird die Beleuchtung eingeschaltet und mit der Erfassung der Messwerte begonnen.

- a) Vollständiger Kollektor bei Windstille: Zu notieren sind wieder die Temperaturen ϑ_A und ϑ_E über einen Zeitraum von 15min in Abständen von $\Delta t = 0,5\text{min}$, während der ersten Minute in Abständen von $\Delta t = 10\text{s}$.
- b) Simulation Wind: Die begonnene Messreihe wird bei eingeschaltetem Gebläse fortgesetzt, zu notieren sind ϑ_A und ϑ_E über einen Zeitraum von weiteren 15min in Abständen von $\Delta t = 0,5\text{min}$.
- c) Isolationwirkung der Glasabdeckung: Wie unter b) wird die Messreihe weitere 15min ohne Glasabdeckung, aber mit ausgeschaltetem Gebläse fortgesetzt.

Mithilfe der unter a) bis c) gefundenen stationären Temperaturdifferenzen $(\vartheta_A - \vartheta_E)_{stat}$ sind die zugehörigen Wirkungsgrade des Sonnenkollektors unter den simulierten Bedingungen zu berechnen und zu diskutieren. Darüber hinaus sind die Ergebnisse von a) und c) mit den in 3.1 gefundenen Werten zu vergleichen.