

PRAKTIKUM

Umdruck zum Versuch V3

Bestimmung der Wirkungsgradkennlinie und Leistungskurve eines Sonnenkollektors



Bestimmung der Wirkungsgradkennlinie und Leistungskurve eines Sonnenkollektors

Thermische Sonnenkollektoren wandeln Sonnenstrahlung in Wärme um. Je nach Anwendungsbereich werden unterschiedliche Bauformen von Sonnenkollektoren eingesetzt. Die für solare Trinkwassererwärmung am häufigsten verwendete Bauform ist der Flachkollektor. In Bild 1 sind schematisch der Aufbau eines Flachkollektors und die physikalischen Vorgänge in einem Sonnenkollektor dargestellt.

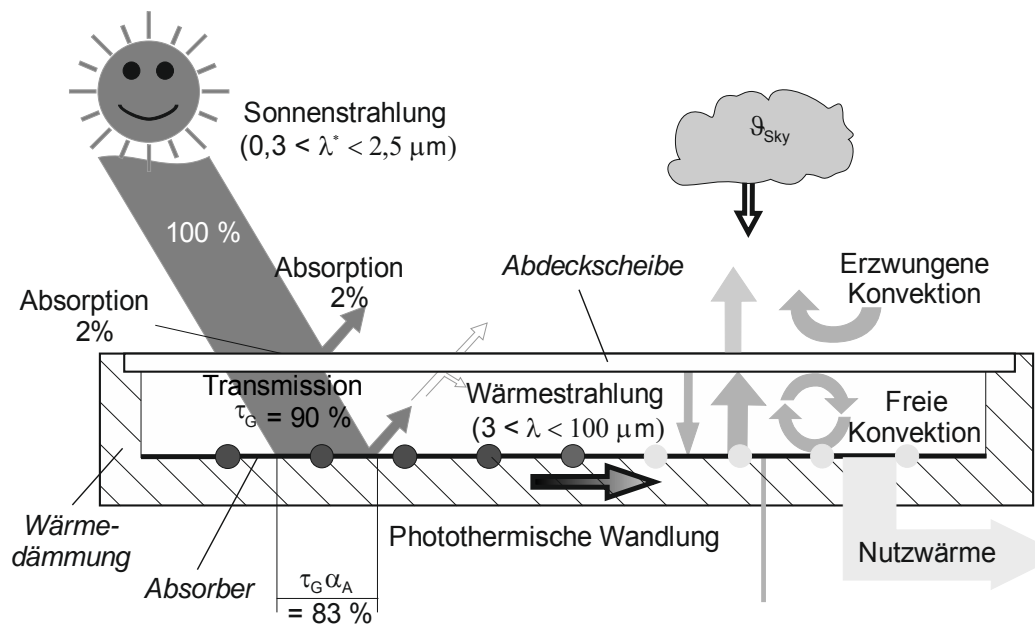


Bild 1: Aufbau und Energieströme an einem Sonnenkollektor (Flachkollektor)

Das Kernstück eines Flachkollektors ist die Absorberplatte (kurz: Absorber) mit Rohrregister. Durch photothermische Wandlung wird die auf den Absorber treffende Sonnenstrahlung in Wärme umgewandelt. Ein im Rohrregister zirkulierendes Wärmeträgermedium führt diese Wärme als Nutzwärme ab. Um Wärmeverluste des Absorbers zu vermindern, ist dieser meist an den Seiten und an der Rückseite von einem wärmeisolierten Rahmen umgeben. Die Frontseite ist meist mit einer transparenten Abdeckung versehen. Die auf den Flachkollektor auftreffende Sonnenstrahlung wird von der transparenten Abdeckung teilweise reflektiert und absorbiert. Der weitaus größte Teil erreicht jedoch den Absorber und wird dort absorbiert. Ein Teil der Wärme geht rückseitig über Wärmeleitung sowie frontseitig durch Konvektion und Strahlung an die Umgebung verloren.

1. Wirkungsgrad, Wirkungsgradkennlinie

Ziel einer Kollektorleistungsprüfung ist es, den Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors für unterschiedliche Betriebszustände zu ermitteln und diesen als sogenannte Wirkungsgradkennlinie darzustellen. Eine solche Prüfung kann im Labor entweder mit einem Sonnensimulator (wie im Praktikumsversuch) oder unter freiem Himmel durchgeführt werden. Die Prüfung dient dazu charakteristische Kennwerte zu ermitteln, anhand derer verschiedene Sonnenkollektoren miteinander verglichen werden können. Diese kollektorspezifischen Kennwerte können auch zur einfachen Modellierung des thermischen Verhaltens von Kollektoren in Simulationsprogrammen verwendet werden.

1.1 Wärmebilanz des Sonnenkollektors

Die instationäre Wärmebilanz eines Sonnenkollektors lautet:

$$\frac{dQ_{Sp}}{dt} = \dot{Q}_{rd} - (\dot{Q}_{Nutz} + \dot{Q}_V) \quad (1)$$

mit:

\dot{Q}_{Nutz}	an das Wärmeträgermedium abgeführter Nutzwärmestrom [W]
\dot{Q}_{rd}	auf die transparente Eintrittsfläche eingestrahelter Wärmestrom [W]
\dot{Q}_V	Verlustwärmestrom [W]
Q_{Sp}	im Sonnenkollektor gespeicherte Wärmemenge [J]

Der Verlustwärmestrom \dot{Q}_V kann in thermische und optische Verluste des Sonnenkollektors aufgeteilt werden:

$$\dot{Q}_V = \dot{Q}_{V,th} + \dot{Q}_{V,opt} \quad (2)$$

mit:

$\dot{Q}_{V,th}$	thermische Verluste [W]
$\dot{Q}_{V,opt}$	optische Verluste [W]

Zur Beschreibung der thermischen Verluste (Gl. 3) wird der Gesamtwärmedurchgangskoeffizient zwischen Absorber und Umgebung $k_{eff,m}$ definiert. Dabei wird der Wärmeverluststrom auf die transparente Fläche, d.h. die Aperturfläche des Sonnenkollektors A_t bezogen.

$$\dot{Q}_{V,th} = A_t \cdot k_{eff,m} \cdot (\vartheta_{A,m} - \vartheta_{am}) \quad (3)$$

mit:

A_t	transparente Fläche des Sonnenkollektors [m ²]
$k_{eff,m}$	mittlerer Gesamtwärmedurchgangskoeffizient [W/(m ² K)]
$\vartheta_{A,m}$	mittlere Absorbenttemperatur [°C]
ϑ_{am}	Umgebungstemperatur [°C]

Die optischen Verluste werden hingegen durch den solaren Transmissionsgrad der Abdeckung τ_G^* und dem solaren Absorptionsgrad des Absorbers α_A^* bestimmt und durch das sogenannte Transmissions-Absorptionsprodukt ($\tau_G^* \cdot \alpha_A^*$) beschrieben (Gl. 4).

Aufgrund der an der transparenten Abdeckung des Kollektors und am Absorber auftretenden Mehrfachreflexion ist $(\tau_G^* \cdot \alpha_A^*) \neq \tau_G^* \cdot \alpha_A^*$.

$$\dot{Q}_{V,opt} = \dot{Q}_{rd} \cdot (1 - (\tau_G^* \cdot \alpha_A^*)) \quad (4)$$

mit:

τ_G^*	Transmissionsgrad der transparenten Abdeckung [-]
α_A^*	Absorptionsgrad des Absorbers [-]

Das Produkt ($\tau_G^* \cdot \alpha_A^*$) gibt demnach an, welcher Anteil der auftreffenden Solarstrahlung vom Absorber effektiv absorbiert wird.

Die Einstrahlung in Kollektorfläche berechnet sich aus dem Produkt zwischen hemisphärischer Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene G^* und der transparenten Fläche des Sonnenkollektors (Gl. 5).

$$\dot{Q}_{rd} = G^* \cdot A_t \quad (5)$$

mit:

G^*	hemisphärische Bestrahlungsstärke in Kollektorebene [W/m ²]
-------	---

1.2 Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors

Der Kollektorwirkungsgrad ist das Verhältnis zwischen dem abgeführten Nutzwärmestrom und dem auf den Sonnenkollektor auftreffende Wärmestrom der Solarstrahlung (Gl. 6).

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{rd}} \quad (6)$$

Unter stationären Bedingungen kann der Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors in einem gegebenen Betriebspunkt ermittelt werden. Im stationären Zustand ändert sich die im Sonnenkollektor gespeicherte Wärme nicht (das heißt $\frac{dQ_{Sp}}{dt} = 0 \text{ W}$). Der Wirkungsgrad im stationären Zustand ergibt sich durch Einsetzen der (Gl. 1) bis (Gl. 5) in (Gl. 6) zu (Gl. 7):

$$\eta = (\tau_G^* \cdot \alpha_A^*) - k_{eff,m} \cdot \frac{(\vartheta_{A,m} - \vartheta_{am})}{G^*} \quad (7)$$

1.3 Kollektorwirkungsgradfaktor

Da die Absorbtemperatur $\vartheta_{A,m}$ nur schlecht messbar ist, wird der Wirkungsgrad meist in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Fluidtemperatur $\vartheta_{FL,m}$ und der Umgebungstemperatur ϑ_{am} bestimmt. Wobei:

$$\vartheta_{FL,m} = \frac{(\vartheta_{K,i} + \vartheta_{K,o})}{2} \quad (8)$$

mit:

- $\vartheta_{FL,m}$ mittlere Temperatur des Wärmeträgers im Sonnenkollektor [°C]
- $\vartheta_{K,i}$ Temperatur des Wärmeträgers am Eintritt in den Sonnenkollektor [°C]
- $\vartheta_{K,o}$ Temperatur des Wärmeträgers am Austritt aus dem Sonnenkollektor [°C]

Um den Zusammenhang zwischen mittlerer Absorbtemperatur $\vartheta_{A,m}$ und mittlerer Fluidtemperatur $\vartheta_{FL,m}$ zu beschreiben wird an dieser Stelle der sogenannte Kollektorwirkungsgradfaktor F' eingeführt. (Gl. 7) wird somit zu:

$$\eta = F' \cdot \left((\tau_G^* \cdot \alpha_A^*) - \frac{k_{eff,m} \cdot (\vartheta_{FL,m} - \vartheta_{am})}{G^*} \right) \quad (9)$$

bzw. nach Umstellen zu:

$$\eta = \eta_o - F' \cdot k_{eff,m} \cdot \Omega \quad (10)$$

wobei:

$$\eta_o = F' \cdot (\tau_G^* \cdot \alpha_A^*) \quad (11)$$

$$\Omega = \frac{(\vartheta_{FL,m} - \vartheta_{am})}{G^*} \quad (12)$$

mit:

F'	Kollektorwirkungsgradfaktor [-]
η_o	optischer Wirkungsgrad oder Konversionsfaktor [-]
Ω	Betriebskoeffizient [(m ² K)/W]

(Gl. 9) verdeutlicht, dass der Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors vom Betriebspunkt abhängig ist, welcher durch die drei Größen $\vartheta_{FL,m}$, ϑ_{am} und G^* definiert wird. Aus diesem Grund wird der Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors in Form einer Wirkungsgradkennlinie dargestellt.

1.4 Wirkungsgradkennlinie eines Sonnenkollektors

Üblicherweise wird eine Wirkungsgradkennlinie grafisch mit dem Wirkungsgrad als Ordinate und dem Betriebskoeffizient als Abszisse dargestellt (siehe Bild 2). In der hier betrachteten, einfachsten Form entspricht die Wirkungsgradkennlinie einer Geraden (vgl. Gl. 10). Üblicherweise werden Wirkungsgradkennlinien allerdings mit einem zusätzlichen quadratischen Faktor beschrieben, sodass der charakteristische Verlauf wie in Bild 2 entsteht.

Der optische Wirkungsgrad $\eta_o = F' \cdot (\tau_G^* \cdot \alpha_A^*)$ ist der Ordinatenabschnitt der Wirkungsgradkennlinie und gibt an, welcher Anteil der in der Eintrittsebene gemessenen Strahlungsenergie maximal in Wärme umgewandelt und abgeführt werden kann. Der Schnittpunkt der Wirkungsgradkennlinie mit der Abszisse gibt die Stagnationstemperatur (Leerlaufstemperatur) des Sonnenkollektors an. Ab diesem Punkt Ω_{stag} entspricht die gesamte zugeführte Energie den Wärmeverlusten (die Nutzwärme ist 0 W).

Über die Kennwerte η_o und $F' \cdot k_{eff,m}$ aus (Gl. 10) können verschiedene Sonnenkollektoren miteinander verglichen werden. In Abhängigkeit von der Temperatur im Sonnenkollektor $\vartheta_{FL,m}$, der Umgebungstemperatur ϑ_{am} und der Strahlung in Kollektorebene G^* kann der Wirkungsgrad des Sonnenkollektors anhand dieser Kennwerte eindeutig bestimmt werden.

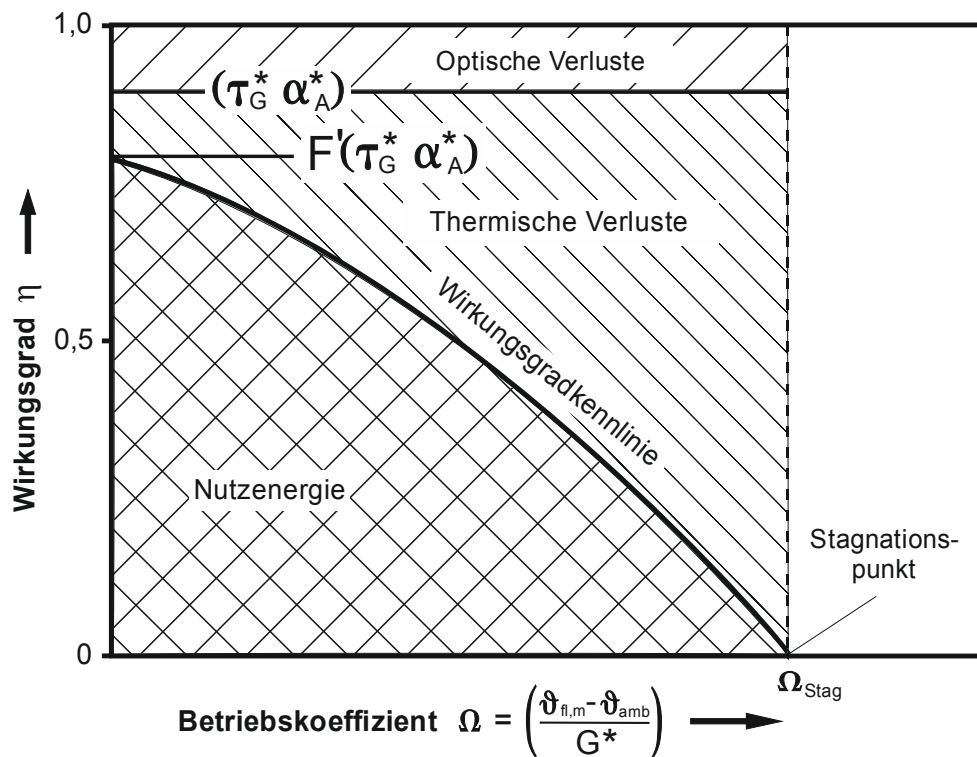


Bild 2: Darstellung der Wirkungsgradkennlinie eines Sonnenkollektors

1.5 Leistungskurve eines Sonnenkollektors

Ein Nachteil bei der Charakterisierung der thermischen Leistungsfähigkeit von Sonnenkollektoren mittels einer Wirkungsgradkennlinie ist es, dass zur Berechnung dieser eine Bezugsfläche benötigt wird. Die hier verwendete transparente Fläche A_t bzw. die Aperturfläche des Sonnenkollektors, ist jedoch bei bestimmten Kollektortypen, wie z. B. kombinierten photovoltaischen und solarthermischen Kollektoren (kurz PVT-Kollektoren genannt) oder auch Kollektoren die mit Spiegeln zur Konzentration der Solarstrahlung versehen sind, nur schwer bestimmbar. Außerdem ist es insbesondere für den Nutzer bzw. die Nutzerin von Sonnenkollektoren primär entscheidend, welche thermische Leistung der Kollektor liefert und nicht wie hoch sein Wirkungsgrad ist.

Um diese Aspekte zu berücksichtigen, wurde vor einigen Jahren beschlossen, die entsprechenden Prüfnormen dahingehend zu ändern, dass die thermische Leistungsfähigkeit von Sonnenkollektoren heute mittels einer sogenannten Leistungskurve angegeben wird (siehe Bild 3). Diese gibt den pro Kollektor bzw. Kollektormodul abgeführten Nutzwärmestrom bzw. die abgegebene thermische Leistung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Fluidtemperatur und Umgebungstemperatur an. Da diese Leistung, im Gegensatz zum Kollektorwirkungsgrad, auch direkt von der hemisphärischen Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene (G^*) abhängt, muss diese gemeinsam mit der Leistungskurve angegeben werden.

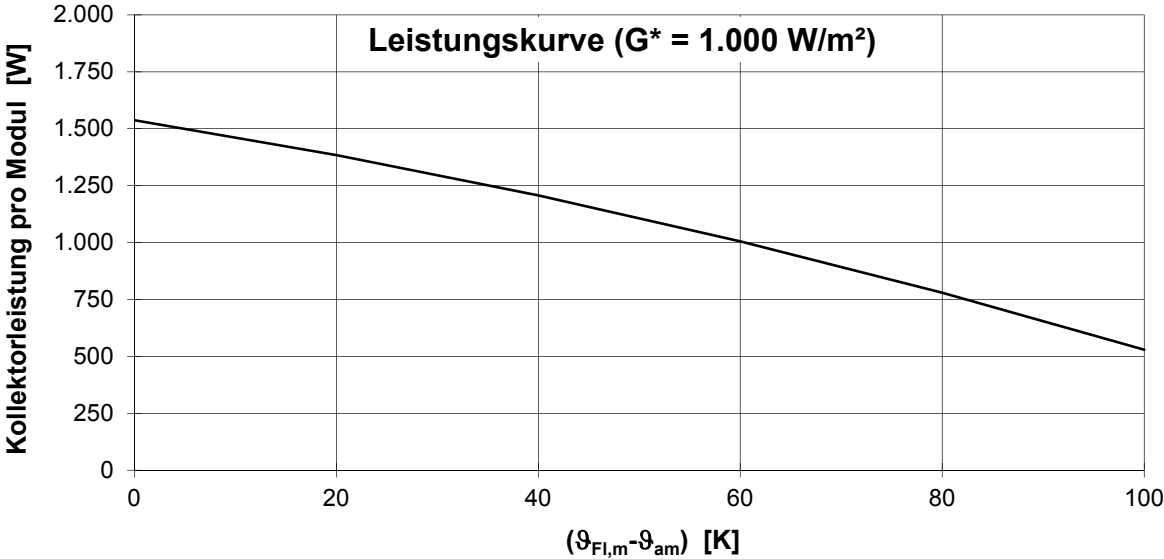


Bild 3: Exemplarische Darstellung der Leistungskurve eines Sonnenkollektors

2. Experimentelle Bestimmung der Kollektorleistung und des Wirkungsgrades

Experimentell wird der Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors in einem bestimmten Betriebspunkt durch Messung des Nutzwärmestroms bzw. der vom Kollektor abgegebenen Wärmeleistung und der auf die Kollektorfläche auftreffenden Bestrahlungsstärke unter Berücksichtigung von (Gl. 6) bestimmt. Wobei:

$$\dot{Q}_{Nutz} = \rho_{Fl} \cdot \dot{V}_{Fl} \cdot c_{p,Fl} \cdot (\vartheta_{K,o} - \vartheta_{K,i}) \quad (13)$$

mit:

\dot{V}_{Fl}	Volumenstrom des Wärmeträgers im Sonnenkollektor [m ³ /s]
ρ_{Fl}	Dichte des Wärmeträgerfluids [kg/m ³]
$c_{p,Fl}$	spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgerfluids [J/(kg K)]

Um \dot{Q}_{Nutz} bestimmen zu können müssen demnach der Volumenstrom und die Eintritts- und die Austrittstemperatur des Wärmeträgers gemessen werden. Zusätzlich müssen die Bestrahlungsstärke G^* und die Umgebungstemperatur ϑ_{am} messtechnisch ermittelt werden. Dabei ist zu beachten, dass während der Messung stationäre Betriebsbedingungen herrschen (d. h. alle Messgrößen bleiben über den Messzeitraum konstant und $\frac{dQ_{Sp}}{dt} = 0$ W). Der Wirkungsgrad ergibt sich zu:

$$\eta = \frac{\rho_{Fl} \cdot \dot{V}_{Fl} \cdot c_{p,Fl} \cdot (\vartheta_{K,o} - \vartheta_{K,i})}{G^* \cdot A_t} \quad (14)$$

Anhand der aufgenommenen Messgrößen und Gleichung (14) kann der Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors in verschiedenen Betriebspunkten bestimmt werden und in ein Koordinatensystem eingetragen werden (vgl. Bild 2). Mit Berücksichtigung von (Gl. 10) und einer geraden Wirkungsgradkennlinie können die Messpunkte mit einer Geraden angenähert werden und die Werte η_o und $F' \cdot k_{eff,m}$ bestimmt werden.

Unter Verwendung der für η_o und $F' \cdot k_{eff,m}$ ermittelten Werte können zudem für eine bestimmte hemisphärische Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene und unterschiedliche Temperaturdifferenzen zwischen mittlerer Fluidtemperatur und Umgebungstemperatur die jeweils vom Kollektor abgegebenen Nutzwärmeströme berechnet werden. Werden diese in ein entsprechendes Diagramm eingetragen und die einzelnen Punkte durch Interpolation verbunden, so ergibt sich die Leistungskurve des Kollektors (siehe Bild 3).

3. Beschreibung der Versuchsanlage

Der Kollektorprüfstand (siehe Bild 4) besteht aus einem Gestell, in dem der Sonnenkollektor und das Lampenfeld montiert sind. Die Sonnenstrahlung wird mit 56 Halogenlampen (17 V/150 W) simuliert. Der eingebaute Sonnenkollektor hat eine transparente Fläche von $A_t = 1 \text{ m}^2$. Eine Umwälzpumpe lässt Wasser in einem geschlossenen Kreislauf von einem Speicher mit dem Volumen 75 l zum Sonnenkollektor fließen. Allerdings fließt nur ein kleiner Teil des Gesamtdurchflusses (etwa 10 %) durch den Sonnenkollektor, wird in diesem erwärmt und danach oben in den Speicher zurückgeführt. Der größte Teil wird über einen Bypass direkt in den Speicher zurückgeleitet. Durch die rasche Umwälzung des Speichers über den Bypass, wird der Speicher sehr gut durchmischt und im Speicher herrscht eine annähernd einheitliche Temperatur. Dadurch lässt sich eine konstante Eintrittstemperatur am Sonnenkollektor erreichen und dieser unter stationären Bedingungen betreiben.

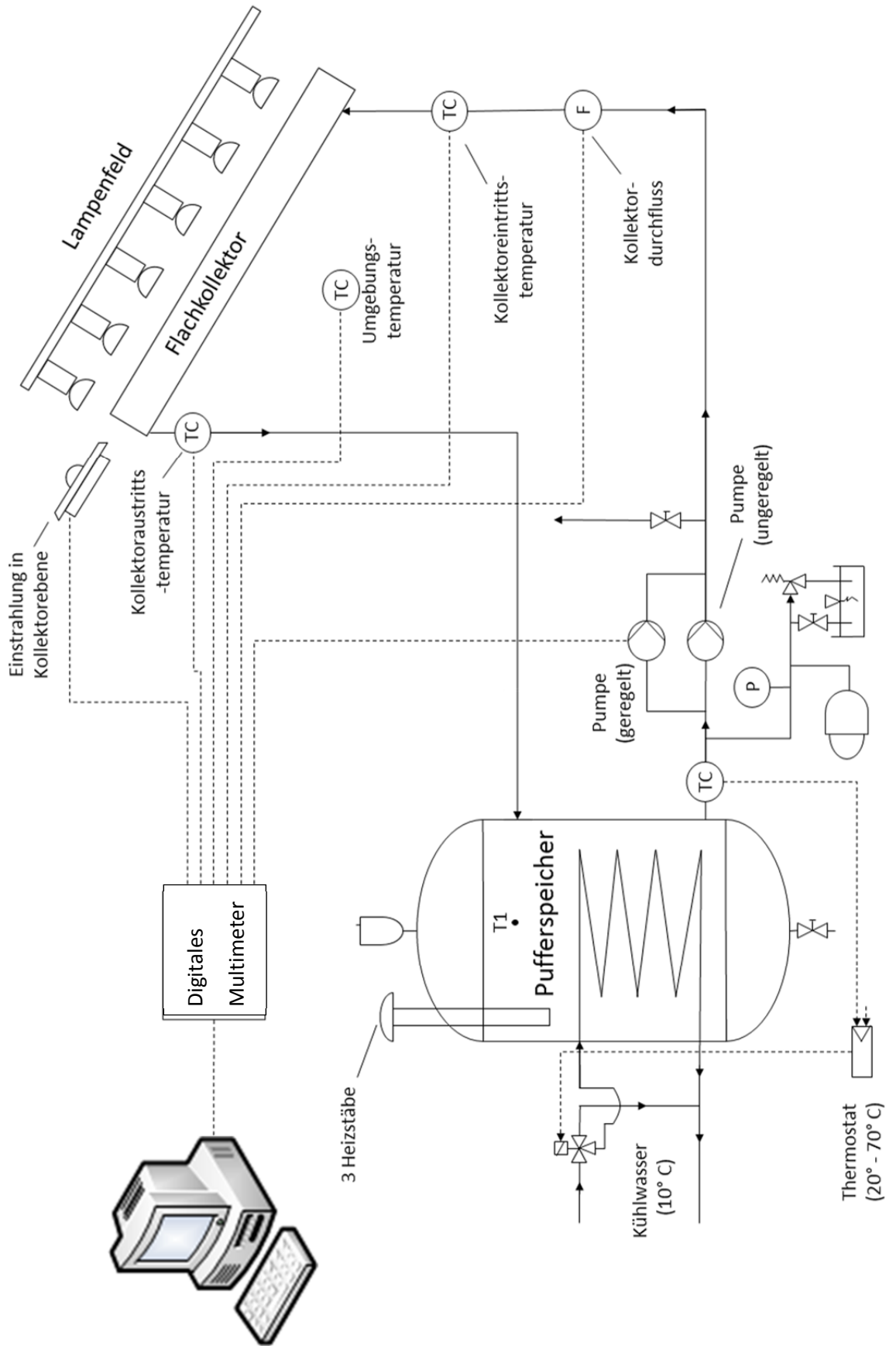
Im Versuchsaufbau sind zwei unterschiedliche Umwälzpumpen installiert, anhand welcher der unterschiedliche Energiebedarf zwischen hocheffizienten, modernen Pumpen und nach wie vor häufig verwendeten Standard-Pumpen demonstriert werden kann.

Zur Abkühlung und Aufheizung des Speicherwassers und somit zur gezielten Einstellung verschiedener Betriebszustände sind im Speicher ein Wärmeübertrager, der mit Kühlwasser durchströmt wird, und drei elektrische Heizstäbe eingebaut. Der Massenstrom des Kühlwassers durch den Wärmeübertrager wird über ein Thermostatventil geregelt, dessen Temperaturfühler am Speicheraustritt angebracht ist. Dadurch können Eintrittstemperaturen in den Sonnenkollektor zwischen 20 °C und 70 °C eingestellt werden.

Die Bestrahlungsstärke in Kollektorebene kann über die Spannung der Lampen eingestellt werden. Der Volumenstrom \dot{V}_{Fl} durch den Sonnenkollektor kann durch Öffnen und Schließen eines Absperrventils im Kollektorkreis eingestellt werden.

Die Bestrahlungsstärke G^* wird mit einem Pyranometer gemessen. Die Eintritts- und Austrittstemperatur des Sonnenkollektors und die Umgebungstemperatur werden mit Pt100-Widerstandsthermometern erfasst. Zur Messung des Volumenstromes durch den Sonnenkollektor wird ein magnetisch induktiver Durchflussmesser (MID) verwendet. Alle Sensoren werden an ein digitales Multimeter angeschlossen und die Messwerte in digitale Signale umgewandelt, welche an den Messrechner weitergeleitet werden. Die Messdatenerfassung wird über einen Messrechner gesteuert und die Messdaten in einer Textdatei auf dem Messrechner abgespeichert. Die beiden Pumpen und die drei Heizstäbe sind über das Messprogramm direkt an- und abschaltbar.

Bild 4: Versuch 5: „Leistungsmessung am Sonnenflachkollektor“



4. Hinweise zur Versuchsausarbeitung

Die folgenden Punkte sind in kurzer Form auszuarbeiten. Die Ausarbeitung ist zur Erlangung der Teilnahmebescheinigung vorzulegen (Hauptfachpraktikum und Spezialisierungsfachpraktikum).

1. Beschreibung des Versuchs und der Versuchsanlage.
2. Berechnung des Kollektorwirkungsgrades. Bitte verwenden Sie hierzu die Messdaten, die Ihnen vom Betreuer bzw. der Betreuerin des Versuchs zur Verfügung gestellt werden.
2. Grafische Darstellung der Kollektorwirkungsgradkennlinie (η in Abhängigkeit von Ω). Alle stationären Messpunkte sind in Bild 5 einzuzeichnen.
3. Berechnung des Konversionsfaktors η_o und des mittleren Wärmeverlustkoeffizienten $F' \cdot k_{eff,m}$ des Sonnenkollektors aus den 2 Messpunkten mit dem höchsten und niedrigsten Ω .
4. Berechnung der Stagnationstemperatur für $\vartheta_{am} = 30 \text{ °C}$ und $G^* = 1000 \text{ W/m}^2$.
5. Berechnung und graphische Darstellung der Leistungskurve des Kollektors in Bild 6.

Messergebnisse:

Messpunkt Nr.	ϑ_{aus} [°C]	ϑ_{ein} [°C]	G^* [W/m ²]	ϑ_{amb} [°C]	\dot{V} [l/h]	η [-]	Ω [(m ² K)/W]
1							
2							
3							
4							

Berechnungen bzw. Notizen:

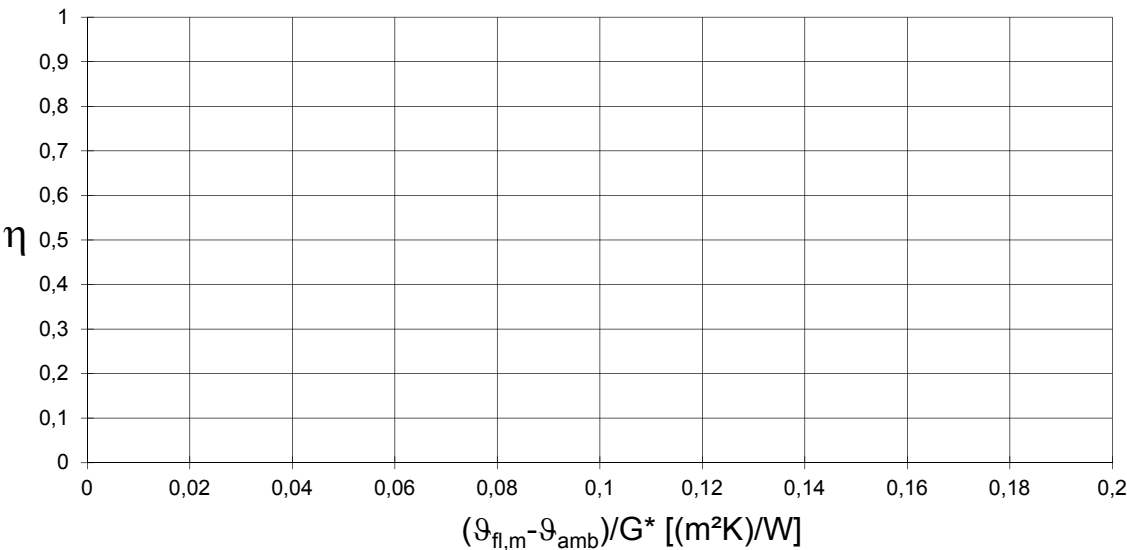


Bild 5: Wirkungsgradkennlinie des Versuchskollektors

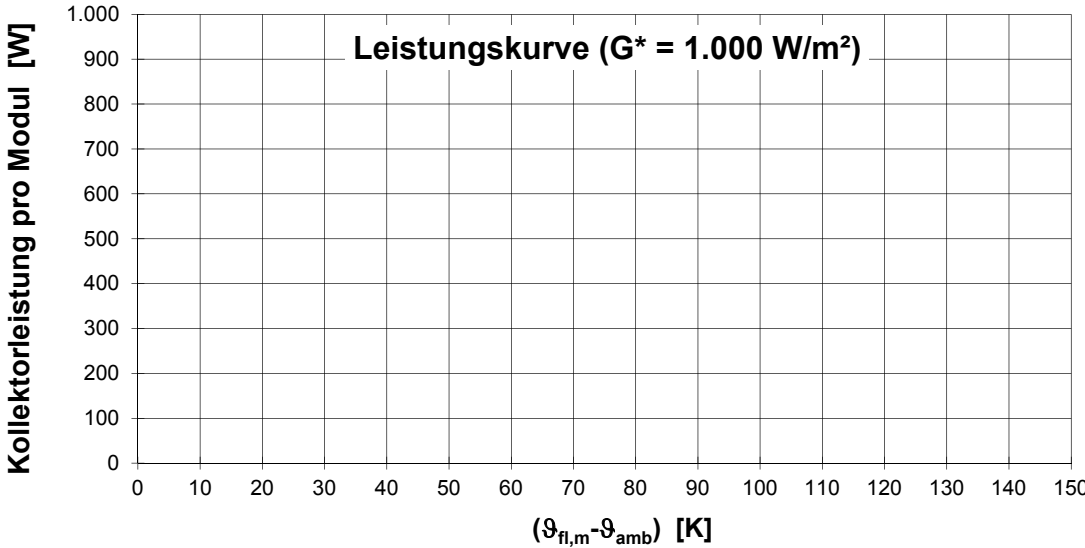


Bild 6: Leistungskurve des Versuchskollektors