

Leibniz Universität Hannover Institut für Elektroprozess-technik	Name: Matr.-Nr.:
Elektrowärmelabor II	Gruppe: Datum:
Laborversuch Infraroterwärmung	Testat: Versuchsleiter:

Inhalt

1. Grundlagen der Infraroterwärmung
 - Strahlungsphysikalische Größen
 - Planck'sches Strahlungsgesetz
 - Stefan-Boltzmann'sches Strahlungsgesetz
 - Wien'sches Verschiebungsgesetz
 - Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz
 - Spektraler Emissionsgrad
 - Lambert'sche Gesetze
 - Strahlungsaustausch
 - Einstrahlzahl
2. Technische Infrarotstrahler
 - Keramikstrahler
 - Halogenstrahler
3. Leistungsregelung für Infrarotlasten
4. Versuchsvorbereitung
5. Aufgabenstellung

1. Grundlagen der Infraroterwärmung

Wärmestrahlung wird in der Literatur als ein „Energietransport durch elektromagnetische Wellen“ definiert. Die Frequenz der Welle bestimmt das aussendende Medium. Beim Transport wird die Geschwindigkeit der Welle durch den übertragenden Stoff festgelegt. Die Ausbreitung der Strahlung ist abhängig von der Geometrie des Strahlers in alle Richtungen oder auch gerichtet. Im Vakuum breitet sich die Welle mit Lichtgeschwindigkeit aus, in dem Fall gilt für die Wellenlänge (Gl. 1.1).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{Gl. 1.1}$$

Mit: c Lichtgeschwindigkeit
 f Frequenz

Durch Wärmestrahlung lassen sich feste, flüssige und zahlreiche gasförmige Stoffe erwärmen. Die Energie der Strahlung ist dabei von der vierten Potenz der Temperatur des Wärmestrahlers abhängig. Wärmestrahlung ist nicht an ein stoffliches Trägermedium oder Temperaturgradienten gebunden, weshalb auch ein Energietransport über weite Entfernungen wie beispielsweise von der Sonne zur Erde durch das Weltall, also ein Vakuum, möglich ist. Für Konvektion gilt dagegen eine lineare Temperaturabhängigkeit. Außerdem ist ein stoffliches Trägermedium erforderlich. Ein möglicherweise vorhandener konvektiver Anteil, der an einem Wärmeaustausch mit Strahlung und Konvektion beteiligt ist, wird aufgrund der verschiedenen Abhängigkeiten bei hohen Temperaturen vernachlässigbar.

Jeder Stoff, der eine Temperatur über 0 K besitzt, emittiert Strahlung durch Energieübergänge zwischen Atomen und Molekülen. Der Austausch von Wärmestrahlung findet bei nicht durchsichtigen Körpern über deren Oberfläche statt. Das Spektrum der Wärmestrahlung reicht von 0,1 μm bis 1000 μm . In diesem Bereich liegt auch das für das menschliche Auge sichtbare Licht (0,4 μm bis 0,8 μm).

Den größten Anteil am Spektrum der elektromagnetischen Strahlung hat die Infrarotstrahlung. Sie liegt oberhalb des sichtbaren Lichtes. Der Infrarotbereich wird nach DIN 5031 Teil 7 in folgende Klassen unterteilt (siehe Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Einteilung der Infrarotstrahlung in Klassen

Benennung der Strahlung	Kurzzeichen	Wellenlänge λ [μm]
Nahes Infrarot (NIR)	IR-A	0,78 bis 1,4
	IR-B	1,4 bis 3
Mittleres Infrarot (MIR)	IR-C	3 bis 50
Fernes Infrarot (FIR)		50 bis 1000

Strahlung, die auf einem Körper auftrifft, wird von diesem absorbiert, reflektiert oder durchgelassen, also transmittiert.

In Summe ergeben diese Anteile zusammen immer gleich eins (Gl. 1.2).

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad \text{Gl. 1.2}$$

Mit: α Absorptionsgrad
 ρ Reflexionsgrad
 τ Transmissionsgrad

Bei strahlungsundurchlässigen Körpern nimmt der Transmissionsgrad τ in Gl. 1.2 den Wert null an. Ein solches Medium reflektiert oder absorbiert den gesamten Strahlungsanteil. Zusätzlich wird für schwarze Körper auch die Reflexion $\rho = 0$, α nimmt den Wert eins an. Die schwarze Oberfläche wird als ein idealisiertes Modell betrachtet bei dem sie alle auftreffenden Strahlen absorbiert. Die Eigenschaft eines wirklich idealen schwarzen Körpers besitzt in der Natur kein realer Strahler. Diese Vorstellung wird im Bereich der technischen Nutzung von Strahlung stets nur näherungsweise erreicht.

Strahlungsphysikalische Größen

Die wichtigsten Strahlungsgrößen sind in Tabelle 1.2 zusammengefasst. In der Literatur sind teilweise unterschiedliche Bezeichnungen gewählt. Die geläufigsten sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 1.2: Strahlungsphysikalische Größen

Formelzeichen	SI-Einheit	Größe/Bezeichnung
Q	W·s	Strahlungsenergie, Strahlungsmenge
Φ	W	Wärmestrom, Strahlungsleistung
q	W/m ²	Wärmestromdichte
M	W/m ²	Spezifische Ausstrahlung, auch: Bestrahlungsstärke E
L	W/(m ² ·sr)	Strahldichte, Intensität
J	W/m ²	Helligkeit
R_{th}	K/W	Thermischer Widerstand
R_{Str}	1/m ²	Strahlungswiderstand

Planck'sches Strahlungsgesetz

Mit dem Planck'schen Strahlungsgesetz wird das idealisierte Modell eines schwarzen Strahlers dargestellt, das relativ einfach anwendbar ist. Ein schwarzer Körper absorbiert unabhängig von der Wellenlänge und Richtung die gesamte auf ihm eintreffende Strahlung. Es gibt keinen realen Körper gleicher Form, der mehr Strahlungsenergie absorbieren oder emittieren kann. Die Abweichungen zu diesem Modell bei realen Strahlern berücksichtigt der

Emissionsgrad. Die spektrale Strahldichte, also der auf die Oberfläche des schwarzen Körper bezogene Strahlungsenergie, berechnet sich nach dem Gesetz von Max Planck mit Gl. 1.3.

$$M_{S,\lambda}(T) = c_1 \cdot \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1} \quad \text{Gl. 1.3}$$

Mit: $M_{S,\lambda}$ Spektrale spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers
 c_1 1. Konstante des Planck'schen Strahlungsgesetzes
 c_2 2. Konstante des Planck'schen Strahlungsgesetzes

Grundlage der Gleichung (Gl. 1.3) bildet die Quantenphysik. Die Größen c_1 und c_2 sind Konstanten und berechnen sich jeweils aus Naturkonstanten (Gl. 1.4 und Gl. 1.5).

$$c_1 = 2\pi h c^2 0,374 \cdot 10^{-15} \text{Wm}^2 \quad \text{Gl. 1.4}$$

$$c_2 = \frac{h \cdot c}{k} 1,438 \cdot 10^{-2} \text{mK} \quad \text{Gl. 1.5}$$

Mit: c Lichtgeschwindigkeit
 h Planck'sches Wirkungsquantum
 k Boltzmann'sche Entropiekonstante ($k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$)
 n Brechzahl des umgebenen Mediums
 Ω_0 Einheitsraumwinkel

Für die Planck'sche Verteilung gilt, dass die emittierte Strahlung jeder Wellenlänge mit steigender Temperatur zunimmt. Der Bereich maximalen Ausstrahlung wird ebenfalls durch die Temperatur bestimmt. Für die Strahlung der Sonne, die nahezu ein schwarzer Strahler ist, lässt sich die Temperatur über ihr charakteristisches Maximum bestimmen. Diese liegt bei etwa $T = 5800 \text{ K}$.

Stefan-Boltzmann'sches Strahlungsgesetz

Das Stefan-Boltzmann'sches Strahlungsgesetz verbindet die spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers mit seiner Temperatur, indem $M_{S,\lambda}(T)$ über den gesamten Wellenlängenbereich integriert wird. Die von einem schwarzen Strahler emittierte Strahlungsenergie M_s in W/m^2 berechnet sich nach der Gl. 1.6 von Stefan Boltzmann. Die Ausstrahlung ist dabei proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur an der Oberfläche des Körpers.

$$M_S(T) = \int_0^{\infty} M_{S,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{Gl. 1.6}$$

Mit: E_S Ausstrahlung eines schwarzen Körpers
 σ Stefan-Boltzmann'sche Strahlungskonstante

Die Stefan-Boltzmann'sche Strahlungskonstante berechnet sich zu:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot h^3 \cdot c^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \quad \text{Gl. 1.7}$$

Für technische Strahler gilt meist eine andere Verteilung der Wellenlänge und eine geringere Intensität. Das Modell für graue Strahler (Gl. 1.8) ist hierbei für eine näherungsweise gute Berechnung geeignet. Für farbige Körper wird dabei vereinfacht ein mittlerer Emissionsgrad unabhängig von der Wellenlänge betrachtet.

$$M(T) = \epsilon \sigma T^4 \quad \text{Gl. 1.8}$$

Wien'sches Verschiebungsgesetz

Die Wellenlänge λ_{\max} , für die die spektrale Leistungsdichte maximal wird, ist nach dem Wien'schen Verschiebungssatz bestimmbar. Sie wird durch Differentiation der Planck'schen Gleichung festgelegt. Dafür gilt die Beziehung nach Gl. 1.9.

$$\lambda_{\max} = \frac{w}{T} \quad \text{Gl. 1.9}$$

Mit: λ_{\max} Wellenlänge zur maximalen Leistungsdichte
 w Wien'sche Verschiebungskonstante

$$w = 2897,8 \mu\text{m K} \quad \text{Gl. 1.10}$$

Bei höheren Temperaturen verschiebt sich das Maximum der spezifischen Ausstrahlung in Bereiche kleinerer Wellenlängen, sodass dort auch der Grenze zum sichtbaren Licht erreicht wird. Ab einer Temperatur von circa 4000 K liegt das Maximum der spektralen Leistungsdichte im sichtbaren Wellenlängenbereich.

Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz

Das Gesetz beschreibt die Beziehung der spektralen Leistungsdichte eines beliebigen Wärmestrahlers zur Leistungsdichte eines schwarzen Strahlers, der dem Planck'schen Gesetz

folgt. Voraussetzung für Gl. 1.11 ist, dass für beide Strahler die gleiche Temperatur, Wellenlänge und Strahlrichtung gemessen wird. Für diffuse Oberflächen entfällt die Richtungsabhängigkeit. Es gilt:

$$\frac{M_{\lambda}(T)}{M_{S,\lambda}(T)} = \varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) \quad \text{Gl. 1.11}$$

Bei grauen Körpern gilt diese Beziehung auch unabhängig von der Wellenlänge, daraus folgt Gl. 1.12.

$$\varepsilon(T) = \alpha(T) \quad \text{Gl. 1.12}$$

Schwarze Wärmestrahler haben immer einen Emissionsgrad von eins (Gl. 1.13), unabhängig von ihrer Temperatur.

$$\varepsilon = \alpha = 1 \quad \text{Gl. 1.13}$$

Neben dem schwarzen und grauen Strahlungsmodell gibt es auch den sogenannten weißen Körper. Dieser reflektiert alle Strahlen ideal. Farbige Objekte werfen dagegen bestimmte Wellenlängenbereiche besser zurück als andere.

Eine spiegelnde Oberfläche besitzt die Eigenschaft, dass auftreffende Strahlen im gleichen Winkel wieder abgestrahlt werden. Der Winkel ist dabei stets bezogen auf die Flächennormale. Matte Körper strahlen diffus in alle Richtungen.

Spektraler Emissionsgrad

Durch die molekulare Struktur eines Körpers wird sein Absorptionsspektrum festgelegt, also wie gut ein Stoff in einem bestimmten Wellenlängenbereich Strahlung aufnehmen kann. Ein Werkstoff kann in seinem Wellenlängenspektrum mehrere Absorptionsmaxima aufweisen. Daher ist es auch möglich, dass die Anteile der von einem Infrarotstrahler ausgesendeten Strahlungsanteile von einem Medium auf sehr unterschiedliche Weise absorbiert, durchgelassen oder reflektiert werden. Sowohl die Wellenlänge der Strahlung, die Strahlrichtung, die Temperatur des Körpers, als auch Material und Oberflächenstruktur haben einen Einfluss auf den „Gesamtabsorptionsgrad“.

Ebenso gilt dies für die Emission des Wärmestrahlers. Bei einem Selektivstrahler ist der spektrale Emissionsgrad abhängig von der Wellenlänge, welche wiederum selbst mit der Temperatur des Strahlers zusammen hängt.

Die DIN 5031 Teil 8 unterscheidet bei dem Emissionsgrad eines Temperaturstrahlers zwischen gerichteter und halbräumlicher Emission. In einem Modell für die Berechnung der komplexen Wellenlängenabhängigkeiten für gerichtete Emission wird in der Norm die

Ausstrahlung eines Flächenelementes in beliebige Richtungen in einem Halbraum betrachtet. Der Raumwinkel, in dem ein Energiestrom abgestrahlt wird, setzt sich dabei aus dem Polarwinkel β sowie dem Azimutalwinkel φ zusammen. Für den gerichteten spektralen Emissionsgrad gilt dann Gl. 1.14.

$$\epsilon(\lambda, T, \beta, \varphi) = \frac{L_\lambda(\beta, \varphi)}{L_{\lambda, S}} \quad \text{Gl. 1.14}$$

Mit: β Polarwinkel
 φ Azimutalwinkel

Bei praktischen Anwendungen in der Strahlungswärmeübertragung wird häufig mit dem hemisphärischen spektralen Emissionsgrad gerechnet. Die Winkelabhängigkeit lässt sich hierbei vernachlässigen, sodass für den hemisphärischen Gesamtemissionsgrad gilt:

$$\epsilon(T) = \frac{M(T)}{M_S(T)} \quad \text{Gl. 1.15}$$

Der spektrale Transmissionsgrad einer Fensterglasscheibe ist wellenlängenabhängig, wie Abbildung 1.1 zeigt. Für kurzwellige Infrarotstrahlung ist das Glas sehr durchlässig. Langwellige Strahlung wird fast vollständig absorbiert oder reflektiert.

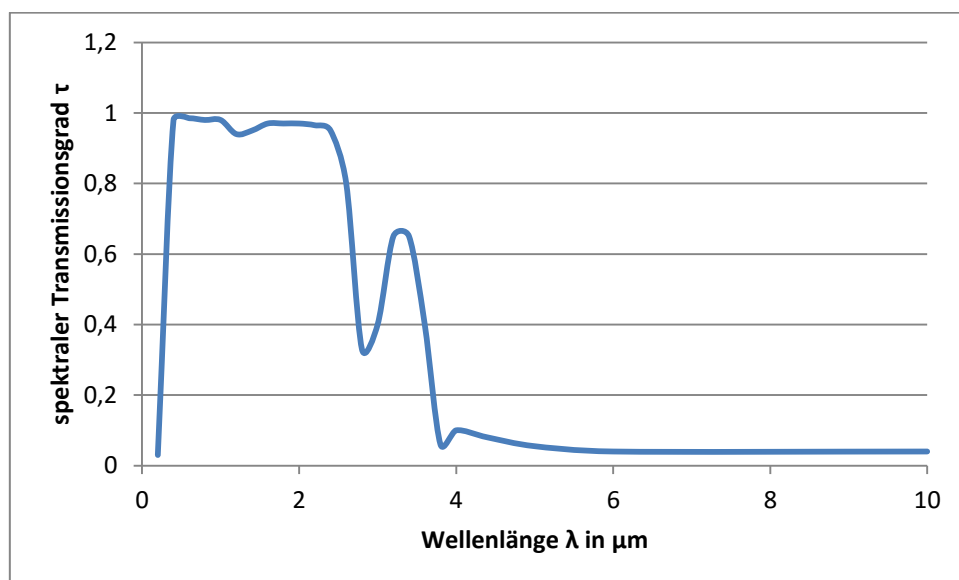


Abbildung 1.1 Spektraler Transmissionsgrad einer Fensterglasscheibe der Dicke 1 mm

Bei steigender Schichtdicken der Glasscheibe nimmt auch der Transmissionsgrad ab. Dafür gilt der Zusammenhang:

$$\tau = \frac{L}{L_0} = e^{-\alpha d} \quad \text{Gl. 1.16}$$

Mit:	τ	Transmissionsgrad
	L	Intensität der durchgelassenen Strahlung
	L_0	Intensität der Strahlung, die auf die Glasscheibe trifft
	α	Absorptionskoeffizient
	d	Schichtdicke

Lambert'sche Gesetze

Nach dem Entfernungsgesetz von Lambert nimmt die Strahlungsdichte einer punktförmigen Strahlenquelle mit dem Quadrat der Entfernung ab. Das Lambert'sche Cosinusetz beschreibt für graue Strahler die von diffusen Wärmestrahler ausgesendete Strahldichte in eine bestimmte Richtung. Im Gegensatz dazu wird beim Stefan-Boltzmann Gesetz nur die Strahlung über den gesamten Spektralbereich in alle Richtungen betrachtet.

Ein Flächenelement dA gibt nach dem Richtungsgesetz von Lambert Strahlung in Polarwinkel β und Raumwinkel ω ab, die im Raum in jede Richtung gleich groß ist. Für die Strahldichte folgt:

$$q_\beta = q_n \cdot \cos \beta \quad \text{Gl. 1.17}$$

Mit:	q_n	Strahldichte senkrecht zum Flächenelement dA
	q_β	Strahldichte in Richtung des Polarwinkels

Durch Integration der Gleichung über eine Halbkugel ergibt sich:

$$q = q_n \cdot \pi \quad \text{Gl. 1.18}$$

Strahlungsaustausch

Zwischen zwei Körpern unterschiedlicher Temperaturen fließen infolge der Temperaturdifferenz, also eines Potentialgefälles, Wärmeströme. Der Wärmestrom ist immer vom Körper mit der höheren zum Körper mit der niedrigeren Temperatur gerichtet. Die wärmere Oberfläche gibt somit durch Emission Energie ab, welche je nach dem Absorptionsvermögen von der anderen Oberfläche ganz oder teilweise aufgenommen wird. Das Stefan-Boltzmann Gesetz gilt dabei stets nur für Wärmestrahler, die Energie aussenden, jedoch keine absorbieren oder reflektieren.

Im Falle eines thermischen Gleichgewichtes ist der resultierende Wärmestrom zwischen den Oberflächen die am Strahlungsaustausch beteiligt sind gleich null. Trotzdem findet an den Oberflächen weiterhin Emission und Absorption statt.

Das Ersatzschaltbild in Abbildung 1.2 zeigt die Emission eines grauen Wärmestrahlers mit der Oberfläche A_1 . Für den grauen Strahler ergibt sich infolge eines Emissionsgrades, der kleiner als 1 ist, ein Strahlungswiderstand an der Oberfläche. Der Strahlungswiderstand trägt die Einheit $1/m^2$. Vor dem Wärmestrahler stellt sich die Helligkeit J_1 ein, die alle verlassenden sowie die auftreffenden Strahlungsanteile berücksichtigt.

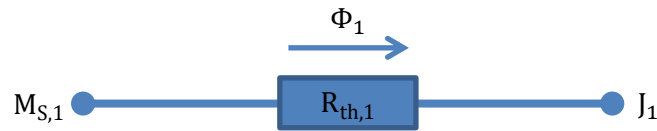


Abbildung 1.2 Strahlungswiderstand einer Oberfläche

Der Strahlungswiderstand ergibt sich nach Gl. 1.19 zu:

$$R_{th,1} = \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} \quad \text{Gl. 1.19}$$

Der Wärmestrom ϕ_1 berechnet sich nun in Analogie zum ohmschen Gesetz aus dem Widerstand R_1 und der Differenz $M_{S,1} - J_1$ (Gl. 1.20). Je nach Größe von Emission und Helligkeit zeigt der Richtungspfeil (Abbildung 1.2) des Wärmestroms für einen Energiegewinn in Richtung des Strahlers oder für eine Energieabgabe vom Strahler weg.

$$\phi_1 = \frac{M_{S,1} - J_1}{R_{th,1}} \quad \text{Gl. 1.20}$$

Ein schwarzer Strahler mit der Temperatur T_1 besitzt eine Ausstrahlung $M_{S,1}$, die sich nach dem Gesetz von Stefan-Boltzmann (Gl. 1.6) berechnet. Für schwarze Körper mit einem Emissionsgrad von 1 ist der Wärmewiderstand gleich null. In diesem Fall entspricht die Helligkeit J_1 der spezifischen Ausstrahlung $M_{S,1}$.

Der Wärmestrom zwischen zwei Punkten ist gleich null, wenn beide die gleiche Temperatur besitzen. Ebenso gilt dies für Oberflächen im stationären Fall, die die auftreffende Wärmestrahlung komplett zurückstrahlen, falls deren Rückseite ideal wärmegeämmt (adiabat) ist. Der Oberflächenwiderstand dieser Flächen spielt für diese Betrachtung keine Rolle.

Das zunächst nur für einen Strahler betrachtete Problem wird im Folgenden auf zwei und mehr Strahler erweitert. Einen einfachen Fall dieses Problems bildet die Anordnung zwei ebener paralleler schwarzer Platten gleicher Größe mit konstanten, jedoch unterschiedlichen Temperaturen T_1 und T_2 . Der Wärmestrom zwischen den Platten 1 und 2 wird durch Gl. 1.21 beschrieben. Die Größe A der Platten geht gegen unendlich, sodass die seitlichen Wärmeströme in den Raum vernachlässigbar sind.

$$\phi_{12} = \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{Gl. 1.21}$$

Für graue Strahler sind zusätzlich die Emissionsgrade der beiden Platten ϵ_1 und ϵ_2 nach Gl. 1.22 zu berücksichtigen.

$$\phi_{12} = C_{12} \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{Gl. 1.22}$$

Die Strahlungsaustauschkonstante C_{12} ergibt sich nach Gl. 1.23 zu:

$$C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad \text{Gl. 1.23}$$

Beliebige Anordnungen endlicher Größe lassen sich für zwei Körper mit dem thermischen Ersatzschaltbild in Abbildung 1.3 abbilden.

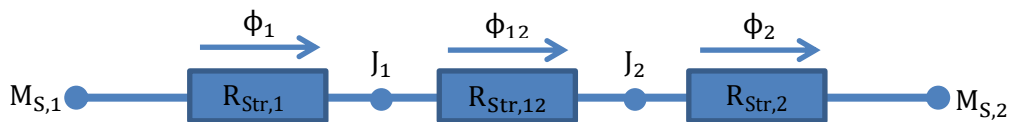


Abbildung 1.3 Strahlungswiderstand von zwei Oberflächen

Die beiden Wärmestrahler mit den Oberflächen A_1 und A_2 strahlen mit den Emissionsgraden ϵ_1 und ϵ_2 . Die Oberflächenwiderstände berechnen sich auf gleiche Weise, wie bei der vorherigen Problematik mit nur einem Strahler.

Zwischen den beiden Helligkeiten J_1 und J_2 liegt zusätzlich der Raumwiderstand $R_{\text{Str},12}$ (Gl. 1.24). Dieser Widerstand repräsentiert die geometrischen Verhältnisse der Anordnung für beliebig geformte und beliebig zueinander ausgerichtete Oberflächen. $R_{\text{Str},12}$ wird mit der Einstrahlzahl φ_{12} berechnet. Diese berücksichtigt den Anteil der Strahlung, der von der Oberfläche 1 ausgesendeteten gesamten Strahlung auf der Oberfläche 2 auftrifft.

$$R_{\text{Str},12} = \frac{1}{A_1 \cdot \varphi_{12}} \quad \text{Gl. 1.24}$$

Der Wärmestrom durch $R_{\text{Str},12}$ ist dann wieder analog zum ohmschen Gesetz die Differenz der Helligkeiten vor und nach dem Widerstand geteilt durch den thermischen Raumwiderstand (Gl. 1.25).

$$\phi_{12} = \frac{J_1 - J_2}{R_{\text{Str},12}} \quad \text{Gl. 1.25}$$

Im stationären Fall sind bei zwei strahlenden Oberflächen alle Wärmeströme gleich (Gl. 1.26).

$$\phi_1 = \phi_{12} = \phi_2 \quad \text{Gl. 1.26}$$

In der Realität stehen oft mehrere Körper miteinander im Strahlungsaustausch. Bei beliebig vielen Wärmestrahler mit der Anzahl n wird trotz teils komplizierter Anordnungen auf die bekannte Methode zurückgegriffen, die das Netzwerk ausreichend beschreiben. Dies führt zu einfach handhabbaren linearen Gleichungen. Für Netzwerkknoten gilt nach dem Kirchhoff'schen Gesetz die „Verzweigungspunktregel“. Die Summe aller auf einen Knoten fließenden Ströme ist im stationären Fall nach Gl. 1.27 gleich der Summe aller abfließenden Wärmeströme.

$$\sum \phi_{\text{zu}} = \sum \phi_{\text{ab}} \quad \text{Gl. 1.27}$$

Sind die Widerstände in einer Parallelschaltung gegeben folgt daraus Gl. 1.28.

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \sum_i \frac{1}{R_i} \quad \text{Gl. 1.28}$$

Bei Reihenschaltungen ergibt sich Gl. 1.29.

$$R_{\text{ges}} = \sum_i R_i \quad \text{Gl. 1.29}$$

Für einen Wärmestrahler der n verschiedene Objekte erwärmt bedeutet dies für den Wärmestrom am Knoten J_i :

$$\frac{E_{S,i} - J_i}{R_i} = \sum_{j=1}^n \frac{J_i - J_j}{R_{ij}} \quad \text{Gl. 1.30}$$

Ist die Oberflächentemperatur des Strahlers bekannt, vereinfacht sich die Gleichung zu Gl. 1.31.

$$J_i + \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \cdot \sum_{j=1}^n \phi_{ij} \cdot (J_i - J_j) = \sigma \cdot T_i^4 \quad \text{Gl. 1.31}$$

Bei einem gegebenen Wärmestrom ϕ_i ergibt sich Gl. 1.32.

$$A_i \cdot \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} \cdot (J_i - J_j) = \phi_i \quad \text{Gl. 1.32}$$

Einstrahlzahl

Neben den Temperatur und Emissionseigenschaften sind beim Austausch von Wärme zwischen zwei oder mehreren Objekten auch von den geometrischen Verhältnissen der Anordnung entscheidend. Die Einstrahlzahl, in der Literatur auch als Sichtfaktor oder Winkelverhältnis (englisch: view factor) bezeichnet, berücksichtigt die Form und Größe sowie die Orientierung von Körpern zueinander.

Am Beispiel von zwei Körpern mit den Flächen A_1 und A_2 wird die Bedeutung der Einstrahlzahl φ_{12} dargestellt. Es handelt sich dabei um eine reine Verhältnissgröße, die den Anteil des Wärmestroms wiedergibt, den A_2 von A_1 empfängt. Es gilt:

$$\varphi_{12} = \frac{\phi_{12}}{\phi_1} \quad \text{Gl. 1.33}$$

Betrachtet man jeweils zwei infinitesimale Elemente auf den Flächen A_1 und A_2 mit dem Abstand r zueinander, ergibt sich die differentielle Einstrahlzahl $d\varphi_{d1d2}$, die den Anteil der Strahlung angibt, den dA_2 von dA_1 empfängt.

$$d\varphi_{12} = \frac{d^2\phi_{12}}{d\phi_1} \quad \text{Gl. 1.34}$$

Für das infinitesimale Flächenelement dA_1 beträgt der Gesamtwärmestrom, der von dA_1 ausgeht, nach Gl. 1.35:

$$d\phi_1 = q_1 \cdot dA_1 \quad \text{Gl. 1.35}$$

Mit: q_1 Wärmestromdichte von A_1

Nach Anwendung der Lambert'schen Gesetze für die Strahldichte L_1 (Gl. 1.36), erhält man für den differentiellen Wärmestrom Gl. 1.37.

$$L_1 = \frac{\cos\beta_1}{\pi} \cdot q_1 \quad \text{Gl. 1.36}$$

Mit: β_1 Winkel zwischen der Flächennormalen an A_1 und der Verbindungslinie der Flächen

$$d^2\phi_{12} = L_1 \cdot \cos\beta_1 \cdot dA_1 \cdot d\omega_{21} \quad \text{Gl. 1.37}$$

Mit Hilfe des Raumwinkels $d\omega_{12}$ kann der Anteil der Strahlung dargestellt werden, der dA_1 verlässt und auf dA_2 auftrifft:

$$d\omega_{12} = \frac{dA_2 \cdot \cos\beta_2}{r^2} \quad \text{Gl. 1.38}$$

Durch die Annahme der Gültigkeit des Cosinusgesetzes und Integration ergibt sich:

$$d^2\phi_{12} = \iint_{A_2} \left(\iint_{A_1} \frac{L_1 \cdot \cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2}{r^2} dA_1 \right) dA_2 \quad \text{Gl. 1.39}$$

Der geometrische Faktor wird als die Einstrahlzahl ϕ_{12} zusammengefasst (Gl. 1.40).

$$\phi_{12} = \frac{1}{A_1 \cdot \pi} \cdot \iint_{A_1} \iint_{A_2} \frac{\cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2}{r^2} dA_1 dA_2 \quad \text{Gl. 1.40}$$

Für die Orientierung eines Wärmestroms von A_1 nach A_2 lautet der Sichtfaktor ϕ_{12} , bei umgekehrter Richtung ϕ_{21} (Gl. 1.41).

$$\phi_{21} = \frac{1}{A_2 \cdot \pi} \cdot \iint_{A_1} \iint_{A_2} \frac{\cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2}{r^2} dA_1 dA_2 \quad \text{Gl. 1.41}$$

Hieraus folgt für ein thermisches Gleichgewicht die Reziprozitätsbeziehung:

$$\phi_{12} \cdot A_1 = \phi_{21} \cdot A_2 \quad \text{Gl. 1.42}$$

Für gleiche Flächen ($A_i=A_j$) gilt somit, dass unabhängig von der Orientierung $\phi_{ij}=\phi_{ji}$ sein muss

Aus dem Energieerhaltungssatz folgt die Summationsbedingung (Gl. 1.43). Die von einer Fläche i abgegebene Strahlung muss sich in einem abgeschlossenen Raum auf alle Flächen aufteilen und somit in Summe eins ergeben. Dabei ist es auch möglich, dass sich die Oberfläche selbst anstrahlt, beispielsweise bei einer konkaven Bauweise. Das bedeutet, dass

die Fläche eine Eigeneinstrahlzahl besitzt und der Sichtfaktor zu sich selbst somit nicht null ist. Für ebene und konvexe Flächen ist die Eigeneinstrahlzahl stets gleich null, ebenso für Flächen, die das strahlende Objekt selbst nicht „sieht“, weil sie durch andere Flächen verdeckt sind.

$$\sum_{j=1}^n \varphi_{ij} = 1 \quad \text{Gl. 1.43}$$

Bei technischen Körpern ist die Geometrie meist komplizierter. Solche Körper lassen sich häufig mit bekannten Anordnungen darstellen, um so die Berechnung zu vereinfachen. Mit dem Superpositionsprinzip werden die Einstrahlzahlen einzelner Geometrien zu einer Gesamteinstrahlzahl für den technischen Körper zusammengefügt. Für die Superposition gilt:

$$\varphi_{ij} = \sum_{k=1}^m \varphi_{ik} \quad \text{Gl. 1.44}$$

$$\varphi_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^m A_k \cdot \varphi_{ki}}{\sum_{k=1}^m A_k} \quad \text{Gl. 1.45}$$

Eine einfache Geometrieconfiguration sind zwei parallele rechteckige Flächen gleicher Länge L und Breite B mit dem Abstand H voneinander. Die Einstrahlzahl für diese Anordnung lautet:

$$\varphi_{12} = \frac{2}{\pi \cdot \xi \cdot \eta} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{(1+\xi^2) \cdot (1+\eta^2)}{1+\xi^2+\eta^2} + \xi \cdot \sqrt{1+\eta^2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\xi}{\sqrt{1+\eta^2}} \right) + \eta \sqrt{1+\xi^2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\eta}{\sqrt{1+\xi^2}} \right) - \xi \cdot \tan^{-1} \xi - \eta \cdot \tan^{-1} \eta \right] \quad \text{Gl. 1.46}$$

mit

$\xi = B / H$	Hilfsgröße für die Berechnung
$\eta = L / H$	Hilfsgröße für die Berechnung
H	Abstand der Flächen
B	Breite der Flächen
L	Länge der Flächen

2. Technische Infrarotstrahler

Die bekannteste in der Natur vorkommende Strahlungsquelle ist die Sonne. Durch ihre hohe Temperatur von etwa 5900 K besitzt sie ihre größte Intensität im Bereich des sichtbaren Lichts. Obwohl die Sonne als nahezu schwarzer Strahler angesehen wird, weist ihr Spektrum durch Absorptionen in der äußeren Sonnenschicht und unserer Erdatmosphäre keinen konstanten Verlauf der Intensität auf.

Bei allen Infrarotstrahlern wird zunächst grob zwischen natürlichen, wie beispielsweise der Sonne und Feuer, und technischen Infrarotstrahlern unterschieden. Technische Strahler wandeln elektrische Energie oder fossile Brennstoffe in Wärme um und geben diese über eine Oberfläche ab. Auf diese Weise ist es möglich, Wärme gezielt für technische Prozesse einzusetzen. Die technischen Wärmequellen unterteilen sich in drei Klassen:

- Bis 1,5 μm Wellenlänge spricht man von kurzwelligen Strahlern, deren ausgesendete Strahlung etwa 5 mm Eindringtiefe hat.
- Im Bereich zwischen 1,5 μm bis 3 μm liegt die mittelwellige und ab 3 μm die langwellige Variante mit einer Eindringtiefe bis 2 mm.

Die Angabe der Wellenlänge bezieht sich stets auf die Lage des Wellenlängenmaximums, das der Strahler emittiert. Dieses Maximum hängt sowohl von den Strahlungseigenschaften des Emittermaterials als auch seiner Oberflächentemperatur ab.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal bei technischen Wärmequellen ist die Einteilung in Hell- und Dunkelstrahler. Während Hellstrahler größtenteils bei hoher Temperatur arbeiten und ihre Emission im sichtbaren Bereich liegt, sind Dunkelstrahler weniger heiß und emittieren eher langwellige Infrarotstrahlung. Grund dafür ist, dass die Heizwendel der Dunkelstrahler oft in einer Keramik eingegossen sind.

Ein entscheidendes Kriterium für die Auswahl des Strahlertyps sind Eigenschaften des Erwärmungsgutes und die Anforderungen an den Aufheizprozess. Es wird grundsätzlich immer eine gute Energieeffizienz gefordert. Der thermische Wirkungsgrad ist von der Absorption der IR-Strahlung durch das Erwärmungsgut abhängig. Durch Kenntnis des Absorptionsspektrums ist es möglich, einen geeigneten Strahlertyp auszuwählen. Infrarotstrahler kommen in diversen industriellen Herstellungsprozessen zum Einsatz und übernehmen dort unter anderem Erwärmungs- und Trocknungsaufgaben, beispielsweise für Lacke oder Klebstoffe. Ein bekanntes Beispiel für ein Verfahren, bei dem Infrarotstrahlung benötigt wird, ist die Herstellung von PET Flächen. Die Flaschen aus einem thermoplastischem Material werden aus einem Rohling produziert, der zunächst in einem Aufheizprozess auf eine Temperatur von über 90 °C gebracht und anschließend durch Streckblasen in eine Form gedrückt wird. PET hat im Bereich zwischen 7 bis 15 μm die besten Absorptionseigenschaften. Bei diesem Prozess bietet es sich daher an, einen langwelligen IR-Strahler auszuwählen. Mittelwellige Strahlung eignet sich dagegen gut für die Trocknung, da Wasser diesen Bereich des Wellenlängenspektrums am besten absorbiert.

Neben diesem Beispiel gibt es noch viele weitere Thermoformprozesse, bei dem Infrarotstrahler benötigt werden. Daneben können auch, je nach Anwendungsgebiet Prozessgeschwindigkeiten und die Reaktionszeiten des Strahlers, also Aufheiz- und Abkühlverhalten, eine wichtige Bedeutung haben. Durch kurze Reaktionszeiten wird die Erwärmung schneller regelbar, was wiederum zu einer Energieeinsparung beitragen kann.

Auch die Form und Leistung des IR-Strahlers sind wichtige Größen für den Erwärmungsprozess. Sie tragen dazu bei, dass der Werkstoff auf die gewünschte Weise ideal erwärmt wird. Die Abgabe von Wärme an die Umgebung ist dadurch reduziert.

In industriellen Prozessen wird häufig eine Vielzahl von IR-Strahlern zusammengeschaltet und auf Prozesstemperatur, Produktdurchsatz und Prozessraum abgestimmt. Die Ansteuerung der Strahler erfolgt meist über moderne Industrieregler, wie zum Beispiel den Leistungsregler GFX4-IR (Fa. Gefran), der auch in diesem Versuch eingesetzt wird.

Keramikstrahler

Für die Versuchsreihen zu diesem Laborversuch steht ein keramischer Flächenstrahler vom Typ HTS der Firma Elstein zur Verfügung. Bei diesem Strahler wird ein Widerstandsheizleiter von einem Strom durchflossen und erzeugt Wärme, die an das keramische Material abgegeben wird, in das der metallische Widerstand eingegossen ist. Für eine möglichst hohe Energieeffizienz sollte der Widerstand seine Wärme gut an die Keramik abgeben. Der HTS-Strahler ist dafür im Keramik-Hohl-gussverfahren hergestellt und oberhalb des Widerstandsheizleiters mit einem Wärmeisolationmaterial gefüllt, welches die Aufheizzeit laut Hersteller im Gegensatz zu älteren Modellen deutlich reduziert.

Die Keramik dient gleichzeitig als elektrischer Isolator. Sie schützt den Widerstandsheizleiter vor Einflüssen aus der Umgebung, was eine höhere Lebensdauer zur Folge hat. Laut Hersteller erreicht der HTS-Strahler etwa 8000 Stunden.

In Tabelle 1.3 sind einige technische Daten des hier verwendeten HTS Flächenstrahlers aufgeführt. Der Keramikstrahler arbeitet im mittel- bis langwelligen Bereich. Die zulässige Betriebstemperatur von 900 °C darf nicht überschritten werden, um die Haltbarkeit der Keramik nicht zu gefährden. Gemessen wird die Temperatur über ein in den Strahler integriertes Thermoelement vom Typ K (NiCr-Ni). Dieser Temperatursensor befindet sich zwischen der Heizwendel und der keramischen Abstrahlfläche.

Tabelle 1.3: Technische Daten des HTS-Strahlers (Fa. Elstein)

Leistung	1000 W
Betriebsspannung	230 V
Installierbare Flächenleistung	64 kW/m ²
Maximal zulässige Temperatur	900 C
Wellenlängenbereich	2-10 µm
Länge	245 mm
Breite	60 mm

Die Strahlungsleistung des keramischen Flächenstrahlers hängt neben der Temperatur auch von seiner Oberfläche ab. Der Keramikstrahler besitzt aus optischen Gründen eine weiße Glasur. Für höhere Temperaturen wirkt sich diese gegenüber einer schwarzen Beschichtung

bei der Emission eher negativ aus. Den Emissionsgrad in Abhängigkeit der Strahlertemperatur zeigt Abbildung 1.4.

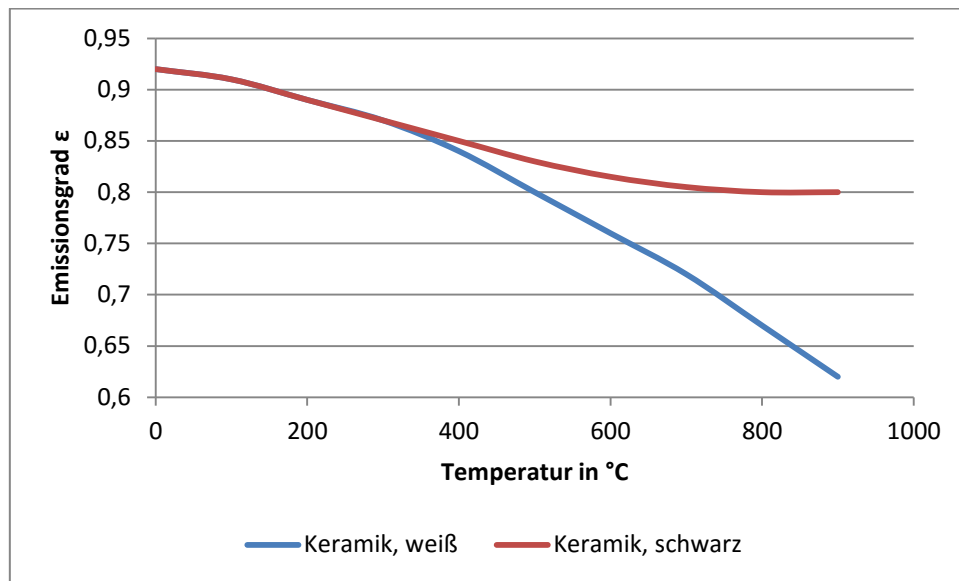


Abbildung 1.4 Emissionsgrad des HTS-Strahlers (Fa. Elstein) für verschiedene Lackierungen in Abhängigkeit der Temperatur

Für diesen Laborversuch ist der HTS-Strahler in einem Aluminiumgehäuse vom Typ EBF (Fa. Elstein) verbaut. In dem Gehäuse befinden sich auch die Anschlussklemmen für die Energieversorgung und das Thermoelement des Strahlers. Zur besseren Energieeffizienz und um die Erwärmung des Gehäuses zu reduzieren, ist zwischen Gehäuse und Heizelement ein Edelstahlreflektor eingebaut, der die Wärmestrahlung aufgrund seines hohen Reflexionsgrades zurück zum Flächenstrahler reflektiert und so für eine gute Wärmedämmung der Strahlerrückseite sorgt.

Halogenstrahler

Der Halogenstrahler IRK der Firma Philips wird im Folgenden ebenfalls für Erwärmungsaufgaben eingesetzt. Ein dünnes Drahtfilament aus Wolfram befindet sich mittig in einem Glaskolben und wird in regelmäßigen Abständen durch Wolframstützen gehalten, um ein Durchhängen des Drahtes zu verhindern. Das Glasrohr selbst ist mit einem Inertgas gefüllt, das die Eigenschaft besitzt, sehr reaktionsträge zu sein.

Der Wolframdraht erreicht während des Heizvorganges relativ schnell Temperaturen um 1800 °C. Aufgrund der hohen Temperatur des Drahtfilaments sendet der Halogenstrahler neben kurzweiliger IR-Strahlung auch noch sichtbares Licht aus. Der Anteil davon an der Gesamtstrahlungsleistung beträgt in etwa 5-7 %. Abbildung 1.5 zeigt den Anstieg des Emissionsgrades für höhere Temperaturen. Umgekehrt proportional zur Emissionskurve verhält sich die Lebensdauerkurve.

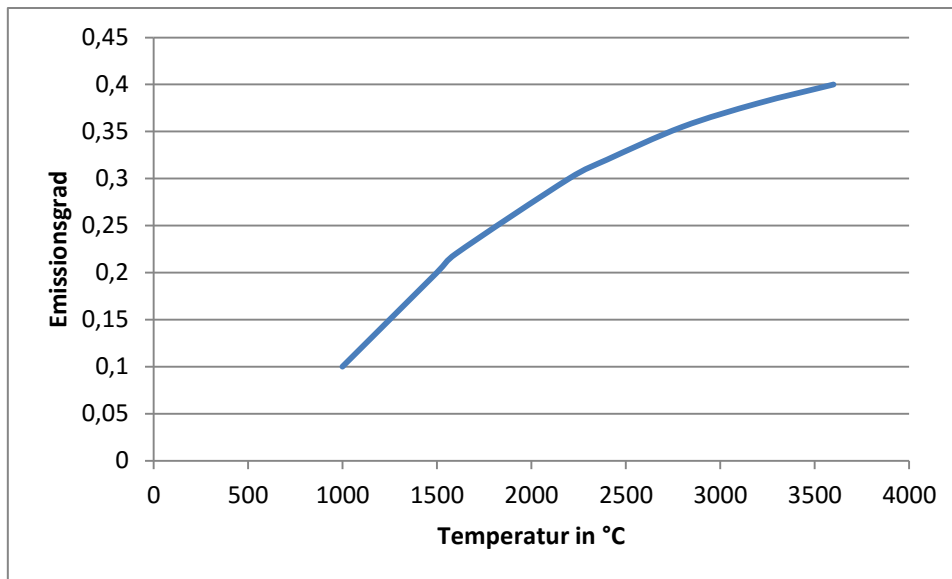


Abbildung 1.5 Emissionsvermögen für Wolfram

Die Vorteile des Halogenstrahlers liegen klar in der Reaktionszeit. Leistungsänderungen lassen sich im Vergleich zum Keramikstrahler sehr schnell realisieren. Nachteilig sind hingegen die geringere mechanische Stabilität und die deutlich kürzere Lebensdauer der IRK-Strahler.

Die technischen Daten der im Folgenden verwendeten Halogenstrahler sind in Tabelle 1.4 aufgeführt. Die Strahler unterscheiden sich lediglich durch eine beim Typ 13169Z/98 aufgetragene Reflexionsschicht. Dieser Reflektor besteht aus einer weißen Keramikschicht, die von außen um das halbe Glasrohr des Halogenstrahlers aufgebracht ist. Während des Heizvorgangs reflektiert der Keramikreflektor einen Teil der Infrarotstrahlung. Der übrige Anteil wird absorbiert und trägt dazu bei, dass sich der Reflektor erwärmt und aufgrund seiner (im Vergleich zum Wolframfilament) geringeren Temperatur mit einer langwelligeren Strahlung ebenfalls zur Erwärmung eines Werkstücks beiträgt.

Tabelle 1.4: Technische Daten der Halogenstrahler von Typ IRK (Fa. Philips)

	Typ 13169Z/98	Typ 13169Z
Leistung	500 W	500 W
Spannung	220-250 V	220-250 V
Reflektor	nicht vorhanden	180° Keramikreflektor

Ähnlich wie beim Keramikstrahler sind die Halogenstrahler für die Versuche auch in einem EBF Gehäuse (Fa. Elstein) verbaut. Die Anschlussklemmen des Strahlers befinden sich ebenfalls in dem Gehäuse. Eine Messung der Temperatur des Wolframdrahtes mit einem Thermoelement ist hier nicht möglich, da es aufgrund der hohen Temperatur des Wolframdrahtes und seiner Glasummantelung keine Möglichkeit gibt, einen geeigneten Messfühler anzubringen. Daher wird in diesem Laborversuch nur eine Leistungssteuerung oder Regelung des Halogenstrahlers über die Werkstofftemperatur möglich.

3. Leistungsregelung für Infrarotlasten

Zur Ansteuerung der unterschiedlichen Infrarotlasten in diesem Laborversuch steht ein modularer Leistungsregler (GFX4-IR der Firma Gefran) für Infrarotstrahler und induktive Lasten zu Verfügung. Anwendung finden solche Regler in der Industrie beispielsweise bei Thermoform- und Blasformenprozessen sowie bei Öfen für Wärmebehandlungen. Der Leistungsregler hat eine maximale Gesamtleistung von 30 kW für insgesamt vier unabhängige Lastzonen, die alle zusätzlich mit einer Sicherung versehen sind. Pro Zone sind so Ströme bis maximal 16 A möglich. Anschließbar sind sowohl ein- als auch dreiphasige Lasten. Neben den Leistungskanälen verfügt der Regler über diverse Kommunikationsschnittstellen zum Anschluss an eine SPS oder einen Computer.

Die Prozesseingänge des Reglers dienen als Anschlussmöglichkeit für Thermoelemente, Widerstandsthermometer oder lineare Strom- sowie Spannungssignale. In diesem Laborversuch werden lediglich Thermoelemente vom Typ K verwendet. Hierfür ist die korrekte Polung der Anschlüsse zu beachten.

Für die Regelung auf einen Sollwert verfügt der Leistungsregler über mehrere Auswahlmöglichkeiten. Es stehen die Optionen Kühlen oder Heizen zur Auswahl, wobei im Folgenden für die Infrarotstrahler nur die Funktion Heizen näher betrachtet wird. Neben dem voreingestellten PID-Regler, sind auch PI oder P-Regler und der Modus ON/OFF auswählbar. Bei dem ON/OFF-Regler heizt der Regler mit voller Leistung bis zu einem internen Grenzwert, schaltet sich dann aus und wieder ein, sobald ein Grenzwert erneut unterschritten ist.

Bei der Leistungssteuerung stehen insgesamt vier Varianten zur Verfügung, drei Impulspaketsteuerungsarten und die Phasenanschnittsteuerung. Für die Impulspaket- oder auch Nulldurchgangssteuerung wird die Leistung über die Anzahl der Durchschalt- und Sperrzyklen geregelt. Diese bilden zusammen die Zykluszeit T_C . Geschaltet wird stets nur im Nulldurchgang der Spannung. Beim Modus ZC liegt eine konstante Zykluszeit vor. Diese ist standardmäßig für den Regler bei 1 s und lässt sich auf einen Wert zwischen 1 bis 200 s einstellen. Der Anteil der Durchschaltzeit an der Zykluszeit entspricht dem prozentualen Anteil der Leistung. Also wird beispielsweise für eine Zykluszeit von 5 s für eine Sekunde eingeschaltet und für 4 s ausgeschaltet, so entspricht dies einer Leistung von $20\% \cdot P_n$. Dies führt für geringere Leistungen sowie größere Zykluszeiten zu Flicker-Erscheinungen der Last und kann bei Hellstrahlern störend sein.

Die Ansteuerungsart BF verbessert den vorhergehenden Modus dadurch, dass anstelle einer festen Wiederholungsperiode die Periode T_C auf ein Minimum reduziert wird. Die variable Zykluszeit erhält den Wert null. Der Quotient aus den Durchschaltzyklen zu den Sperrzyklen ist dabei wieder proportional zur abgegebenen prozentualen Leistung.

Die dritte Variante bei der Impulspaketsteuerung bildet der Modus Halber-Periode-Zyklus oder auch kurz HSC (Half Single Cycle). Dieser verhält sich ähnlich wie BF, nur dass die

Mindesteinschaltzeit nur eine halbe Periode einer Sinusschwingung beträgt. Allerdings ist diese Betriebsart nur für ohmsche Lasten zulässig. Zur Vermeidung von Gleichanteilen sind die Anteile von positiven und negativen Halbwellen stets gleich.

Bei der Phasenanschnittsteuerung ist durch Modulation des Zündwinkels θ ebenfalls eine Steuerung der Leistung möglich. Bei der Phasenanschnittsteuerung fließt auch nach dem Nulldurchgang bis zum Erreichen des Zündwinkels weiter kein Strom. Der Effektivwert der Spannung an der Last U_L wird durch späteres Einschalten gesteuert. So ist eine verlust- und stufenlose Änderung der Verbraucherleistung möglich. Erst nach der Zündung wird die Last mit Strom versorgt, die Spannung springt in diesem Moment zurück auf ihre übliche Sinuskurve. Der Effektivwert der Spannung berechnet sich nach Gl. 1.47.

$$U_L = U_N \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\pi - \theta + \frac{\sin(2\theta)}{2} \right)} \quad \text{Gl. 1.47}$$

Mit: U_L Effektivwert der Spannung an der Last
 U_N Effektivwert der Netzspannung
 θ Zündwinkel

4. Versuchsvorbereitung

Die folgende Aufgabe ist im Vorfeld des Laborversuchs zu bearbeiten und am Versuchstag mitzubringen:

Ein oberseitig schwarzlackiertes Aluminiumblech liegt, wie in Abbildung 1.6 gezeigt, in einem Abstand von $H = 15\text{ cm}$ mittig unter einem ebenen keramischen Flächenstrahler (HTS). Das Blech wird auf der Oberseite von dem Wärmestrahler (Strahlertemperatur $\vartheta_{\text{HTS}} = 450\text{ °C}$) angestrahlt und seitlich sowie unterseitig als adiabatisch betrachtet. Die leicht geschwungene Oberfläche des Flächenstrahlers wird als Ebene vereinfacht. Die Umgebungstemperatur beträgt 20 °C , und alle Reflexionen in der Umgebung werden vernachlässigt. Für die Berechnung liegen folgende Daten vor:

Emissionsgrad des Strahlers	$\epsilon_{\text{HTS}} = 0,4$
Emissionsgrad des schwarzlackierten Alublechs	$\epsilon_{\text{Alu}} = 0,97$
Länge des Strahlers und des Blechs	$L = 24,5\text{ cm}$
Breite des Strahlers und des Blechs	$B = 6\text{ cm}$

- Zeichnen Sie zunächst das thermische Ersatzschaltbild der Anordnung und vereinfachen Sie es.
- Berechnen Sie alle Einstrahlzahlen und die Strahlungswiderstände.
- Bestimmen Sie die stationäre Temperatur, die sich an dem schwarzlackierten Blech einstellt.

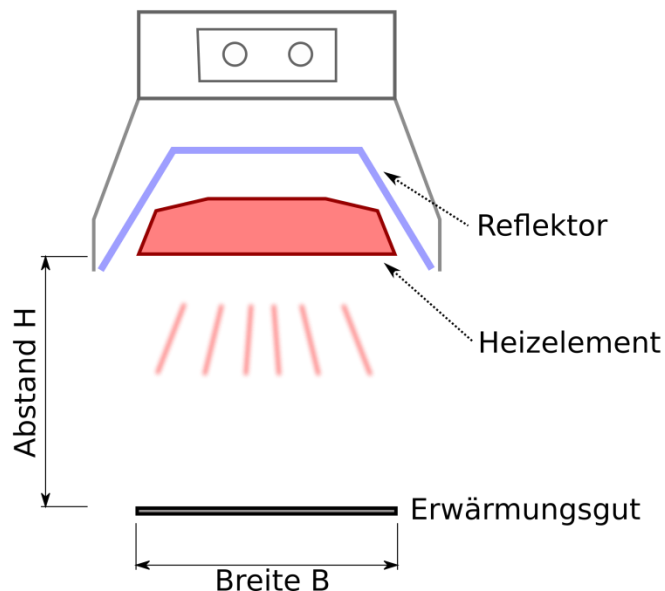


Abbildung 1.6 Skizze der Strahleranordnung

5. Aufgabenstellung

Hinweis:

- Schalten Sie den Leistungsregler erst nach Abnahme des Versuchsaufbaus durch den Versuchsbetreuer ein.
- Einige Gehäuseteile der Infrarotstrahler können bei den Aufheizvorgängen sehr heiß werden.

Starten Sie zunächst die „GF_eXpress“ Software und verbinden Sie den Leistungsregler mit dem Computer am Versuchsplatz. Schließen Sie eine 200 W Glühlampe an den Leistungsregler an, nutzen Sie hierfür die Spannungsmessklemmen des Schaltschranks und steuern Sie die Leistung der Last mit den verschiedenen Ansteuerungsarten (BF, ZC, HSC, PA).

Aufgabe 1 - Halogenstrahler

- a. Schließen Sie nun einen der 500 W Halogenstrahler an den Lastausgang des Leistungsreglers an. Geben Sie für die Last im Phasenanschnitts- (PA) und Impulspaketmodus (BF) jeweils 40, 50, 60, 70, 80, 90 und 100 % über die manuelle Leistungssteuerung (Man.P) vor, und messen Sie den Strom und die Spannung an der Last mit je einem Multimeter gleichzeitig. Vergleichen Sie die Messung der Multimeter mit der internen Messung des Leistungsreglers („GF_eXpress“ Ausgabe), und zeichnen Sie die Leistung an der Last in Abhängigkeit von der manuell vorgegebenen Leistung. Berechnen und begründen Sie mögliche Abweichungen. Erwärmen Sie während der Messung zusätzlich ein schwarzlackiertes Blech bei einer vom Versuchsbetreuer vorgegebenen Leistung mit jeweils beiden Ansteuerungsarten. Nehmen Sie die Aufheizkurven des Blechs auf und vergleichen Sie die Strahlungsleistung mit der elektrischen Leistung an der Last.
- b. Erwärmen Sie das schwarzlackierte Aluminiumblech für verschiedene vom Versuchsbetreuer vorgegebene Leistungen und Abstände zum Halogenstrahler. Nehmen Sie die stationären Temperaturen am Ende des Aufheizvorgangs auf und stellen Sie diese über dem Abstand dar. Erklären Sie den Kurvenverlauf?
- c. Heizen Sie das schwarzlackierte Blech auf, indem Sie seine Temperatur des Bleches über den PID-Regler einstellen. Optimieren Sie die Reglerparameter am Computer händisch. Wie ändern sich diese mit steigender Temperatur und warum? Nehmen Sie für alle Temperaturen die Aufheizkurven auf, und ermitteln Sie deren Zeitkonstanten.

Aufgabe 2 - Keramikstrahler:

- a. Schließen Sie den Keramikstrahler an den Lastausgang und sein Thermoelement an Zone 1 des Leistungsreglers an. Stellen Sie als Sollwert für den Strahler die Temperatur und zum Erwärmungsgut den Abstand aus der Versuchsvorbereitung ein. Wählen Sie hierfür den PID-Regler, und lassen Sie die optimalen Reglerparameter durch die Software ermitteln. Erwärmen Sie das Blech mittig unter dem Keramikstrahler und nehmen Sie zusätzlich die Aufheizkurve auf.

- b. Erwärmen Sie das schwarzlackierte Blech für verschiedene vom Versuchsbetreuer vorgegebene Leistungen und Abstände vom Keramikstrahler. Stellen Sie den Verlauf der stationären Endtemperaturen in Abhängigkeit vom Abstand grafisch dar. Vergleichen Sie Ihre Messergebnisse mit dem Modell aus der Versuchsvorbereitung, und treffen Sie eine Aussage, ob das Modell geeignet ist.
- c. Vergleichen Sie Halogen- und Keramikstrahler in Bezug auf die Aufheizzeit und den Energieeinsatz für das schwarze Blech. Ermitteln Sie dazu auch die Zeitkonstante des Aufheizvorgangs.

Aufgabe 3 - Reflektorgeometrie und Temperaturverlauf

Ein quadratisches Peltierelement mit der Kantenlänge 2 cm ist mit seiner unteren Fläche mit Wärmeleitkleber auf einen Kühlkörper geklebt. Die Oberseite des Peltierelements ist schwarz lackiert ($\epsilon = 0,97$) und wird im folgenden Versuch von einem 500 W Halogenstrahler angestrahlt. Für den Strahler sind bei gleichem Abstand verschiedene Leistungen einzustellen.

- a. Stellen Sie zwischen dem Halogenstrahler und dem Peltierelement einen Abstand von 10 cm ein. Notieren Sie die stationäre Spannung, die sich am Peltierelement nach kurzer Zeit für Leistungen zwischen 40 und 100 % einstellt. Stellen Sie den Verlauf der Spannungen grafisch dar und interpretieren Sie die Darstellung.
- b. Messen Sie die stationäre Spannung am Peltierelement für verschiedene Positionen unter dem Strahler, indem Sie das Element auf der Spindel verschieben. Zeichnen Sie den Verlauf. Führen Sie den Versuch mit einem zweiten Halogenstrahler mit einem anderen Reflektor durch und vergleichen Sie die Reflektorgeometrien miteinander.
- c. Schalten Sie nun beide Halogenstrahler gleichzeitig ein, und ermitteln Sie den Verlauf der Spannung am Peltierelement für verschiedene Positionen. Was bewirkt ein größerer Abstand zwischen Strahler und Erwärmungsgut?

Aufgabe 4 - Reflexionsschutz für Infrarotstrahlung

Platzieren Sie einen Halogenstrahler im Abstand von 10 cm mittig über dem Peltierelement. Stellen Sie eine Glasscheibe direkt über das Peltierelement, und nehmen Sie die Spannung in Abhängigkeit von der Zeit auf. Wiederholen Sie die Messung für einen Aufbau mit dem Sonnenschutzglas und ohne Glasscheibe. Wie wirken sich die Glasscheiben auf die Erwärmung des Peltierelements aus?