

W12 Temperaturmessung mit der Wärmebildkamera	
Name:	Matrikelnummer:
Fachrichtung:	Versuchsdatum:
Mitarbeiter/in:	Gruppennummer:
Assistent/in:	Endtestat:

Dieser Fragebogen muss von jedem Teilnehmer **eigenständig** (keine Gruppenlösung!) handschriftlich beantwortet und vor Beginn des Versuchs abgegeben werden. Die Vorbereitung wird zusätzlich durch einen Test bzw. eine mündliche Prüfung über die physikalischen Grundlagen des Versuchs kontrolliert.
(Version: 16. Oktober 2021)

Versuchsziel und Versuchsmethode:

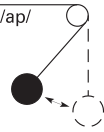
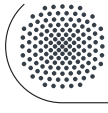
- 1.) Nennen und erläutern Sie drei mögliche Arten der Wärmeausbreitung!
- 2.) Erklären Sie das Funktionsprinzip einer Wärmebildkamera!
- 3.) Welchen Einfluss hat der Emissionsgrad einer Oberfläche auf die Abstrahlung und somit auf die Temperaturmessung mit einer Wärmebildkamera?

4.) Nennen Sie Vor- und Nachteile der Temperaturbestimmung mit Hilfe einer Wärmebildkamera verglichen mit der Messung mit einem Kontaktthermometer.

5.) Wie unterscheiden sich folgende Materialien in ihrem Transmissionsverhalten für Strahlung im sichtbaren und im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums? - Glas, Germanium, Silicium, Plastik, Metall

6.) Welche Materialeigenschaften beeinflussen die Wärmeleitfähigkeit eines Körpers? Warum sind Metalle wesentlich bessere Wärmeleiter im Vergleich zu anderen Feststoffen?

7.) Es besteht eine Analogie zwischen dem elektrischen Strom ($\frac{dq}{dt}$) und dem Wärmestrom ($\frac{dQ}{dt}$). Formulieren Sie diese! Wie ist dabei der Wärmewiderstand definiert?



W Wärmelehre

W12 Temperaturmessung mit der Wärmebildkamera

Diese Anleitung kann und soll kein Lehrbuch ersetzen. Die beschriebenen Grundlagen stellen einen kurzen Überblick dar und sind daher zum Erlernen der physikalischen Grundlagen nicht ausreichend. Genauere Beschreibungen finden sich in:

- [1] *Kapitel 10.2 Wärmetransport.* In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme.* Springer, 2015. – E-Book
- [2] *Kapitel 12.2 Strahlungsgesetze.* In: MESCHÉDE, D.: *Gerthsen Physik.* Springer, 2010. – E-Book
- [3] *Kapitel 17. Wärmeübertragung.* In: TIPLER, P.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure.* Springer, 2015. – E-Book

Stichworte

Infrarot-Strahlung [1], Plancksches Strahlungsgesetz [2], Stefan-Boltzmann-Gesetz [2], Schwarzer Körper [2], Emissivität [2], Kirchhofsches Gesetz [2], Temperaturbestimmung [2], Thermografie [3], Wärmebildkamera, Wärmeausbreitung [1], Wärmeleitung in Metallen [1], stationärer Wärmefluss [1]

Grundlagen

Wärmestrahlung

Jeder Körper, der eine Temperatur über dem absoluten Nullpunkt besitzt, sendet elektromagnetische Strahlung aus, die als Wärmestrahlung bezeichnet wird. Wärmestrahlung liegt im Bereich zwischen 780 nm und 1 mm und grenzt somit an das sichtbare Spektrum im roten Bereich an (s. Abb. W12-1). Thermographiekameras arbeiten in einem Wellenlängenbereich, der bei ca. $10\ \mu\text{m}$ liegt.

Der Mechanismus der thermischen Abstrahlung sieht folgendermaßen aus: Die Atome des Körpers führen thermische Schwingungen aus und geben diese auch an das umgebende Medium weiter. Schwingende Atome sind klassisch gesehen beschleunigte Ladungen, die elektromagnetische Strahlung aussenden. Umgekehrt kann ein Körper durch Einstrahlung elektromagnetischer Wellen in thermische Schwingungen versetzt werden. Thermische Energie und Strahlungsenergie sind miteinander gekoppelt.

Das Plancksche Strahlungsgesetz gibt die spektrale Energiestromdichte eines Schwarzen Körpers (s. u.) in Abhängigkeit von der Wellenlänge an:

$$S_\lambda(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \left(\exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1} \tag{W12-1}$$

$S_\lambda(T)$: spektrale Energiestromdichte in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m}}$ λ : Wellenlänge in μm
 T : Temperatur in K $c_1 = 2hc^2 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$ $c_2 = hc/k_B = 14,387 \cdot 10^{-3} \text{ Km}$

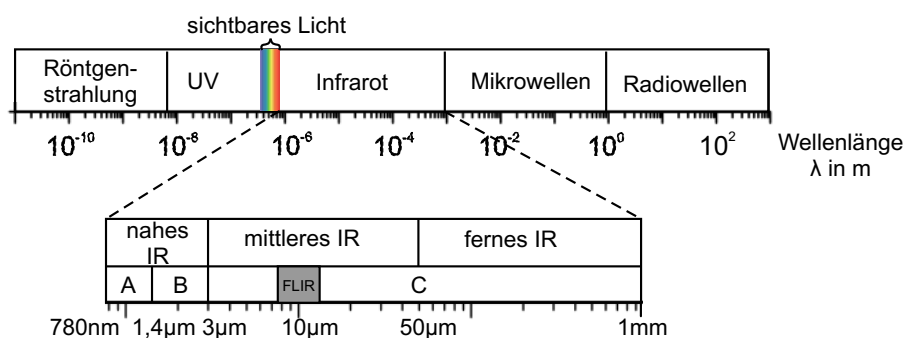


Abb. W12-1: Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums und Empfindlichkeitsbereich der Wärmebildkamera des Herstellers FLIR.

In Abbildung W12-2 ist die nach Gleichung W12-1 berechnete spektrale Strahlungsdichte für verschiedene Temperaturen T dargestellt. Demnach hängt die von einem Körper abgestrahlte Leistung sehr stark von seiner Temperatur ab. Die Lage des Strahlungsmaximums verschiebt sich, wie es das Wiensche Verschiebungsgesetz beschreibt, mit zunehmender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen: $\lambda_{\text{max}} = \frac{2900 \mu\text{m}\cdot\text{K}}{T}$. Je höher die Temperatur des Körpers, desto kurzwelliger ist die Wärmestrahlung. Gelb hervorgehoben ist die Kurve für 5777 K, die der Effektivtemperatur der Sonne entspricht. Ihr Strahlungsmaximum liegt genau im sichtbaren Teil des Spektrums. Bei kleineren Temperaturen strahlt ein Körper auch. Bei Temperaturen bis zu ca. 600°C ist die Strahlung noch mit dem Auge sichtbar (Rot- bis Weißglut). Bei typischen Umgebungstemperaturen von ca. 300 K (rote Kurve) liegt das Maximum der Planck-Kurve bei 10 μm . Diese Strahlung kann mit geeigneten Detektoren sichtbar gemacht und zur berührungslosen Temperaturmessung genutzt werden.

Durch Integration des Planckschen Strahlungsgesetzes (Gl. W12-1) über den Wellenlängenbereich von $\lambda = 0$ bis $\lambda = \infty$ erhält man die Strahlungsleistung P eines Schwarzen Körpers (Stefan-Boltzmann-Gesetz):

$$P_B = \sigma AT^4 \tag{W12-2}$$

mit der Stefan-Boltzmann-Konstanten $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$.

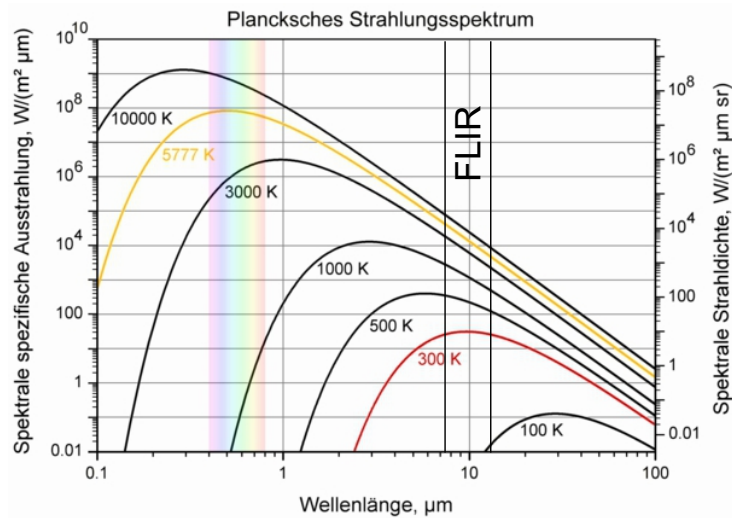


Abb. W12-2: Plancksche Strahlungsdichte eines Schwarzen Körpers bei verschiedenen Temperaturen nach Gl. W12-1 in doppeltlogarithmischer Auftragung. Quelle: Wikipedia

Elektromagnetische Strahlung kann von einem Körper absorbiert, emittiert, reflektiert oder transmittiert werden. Absorptionsgrad α , Reflexionsgrad ρ und Transmissionsgrad τ müssen zusammen 1 ($\hat{=}$ 100%) ergeben:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (\text{W12-3})$$

Obige Beziehungen wurden für einen Schwarzen Körper definiert. Als Schwarzen Körper bezeichnet man einen idealisierten Körper, der elektromagnetische Strahlung im gesamten Spektralbereich vollständig absorbiert ($\alpha = 1$). Die absorbierte Energie sendet der Schwarze Körper als elektromagnetische Strahlung wieder aus. Nach dem Kirchhoffschen Gesetz gilt:

$$\varepsilon = \alpha \quad (\text{W12-4})$$

wobei der Emissionsgrad ε definiert ist als Verhältnis

$$\varepsilon = \frac{P}{P_B} \quad (\text{W12-5})$$

Alle anderen Körper absorbieren weniger und strahlen somit auch weniger ab, als der Schwarze Körper. Ist $0 < \alpha < 1$, nennt man einen Körper grau. Der Emissionsgrad ε liegt ebenfalls zwischen 0 und 1 und ist vom Material und von der Oberflächenbeschaffenheit des strahlenden Körpers abhängig. Raue matte Oberflächen absorbieren und emittieren viel stärker als glatte spiegelnde Objekte.

Hinweis: Im allgemeinen sind ε wie α , τ und ρ wellenlängenabhängig.

Die Ausstrahlung eines grauen Körpers hängt ebenfalls von T^4 ab:

$$P = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (\text{W12-6})$$

Da der Körper mit der Temperatur T nicht nur strahlt, sondern gleichzeitig Strahlung aus der Umgebung mit der Temperatur T_0 absorbiert, wird nicht die gesamte abgestrahlte Leistung P , sondern die dem Körper durch Strahlung entzogene Leistung P' gemessen:

$$P' = \varepsilon\sigma A(T^4 - T_0^4) \quad (\text{W12-7})$$

Entspricht die Temperatur des Körpers der Umgebungstemperatur T_0 , so ist also $P' = 0$. Man bezeichnet diesen Zustand als Strahlungsgleichgewicht.

Funktionsprinzip der Wärmebildkamera

Die Infrarot-Kamera FLIR i7 erfasst einen Wellenlängenbereich zwischen $7,5$ und $13 \mu\text{m}$. Die von einem Objekt ausgesendete Infrarotstrahlung wird von einer Linse aus Germanium auf einen Bildsensor (Focal Plane Array, FPA) fokussiert, der aus ungekühlten Mikrobolometern besteht. Dies sind winzige Brücken aus einem Material, dessen elektrischer Widerstand stark von der Temperatur abhängt. Diese Mikrobolometer werden in Abhängigkeit von der Leistung der auf sie einfallenden Infrarotstrahlung erwärmt und ändern entsprechend ihren elektrischen Widerstand. Dies kann dann letztlich, wenn der Emissionskoeffizient der Oberfläche des Gegenstandes bekannt ist, in eine Temperatur der abgebildeten Stelle der Oberfläche umgerechnet werden.

Durch den Zusammenhang zwischen der Emission und der Temperatur eines Körpers kann somit ein Bild berechnet werden, das die tatsächliche Temperaturverteilung in einem Falschfarbenbild wiedergibt.

Die von der Infrarot-Kamera aufgenommene Strahlungsleistung setzt sich aus

- der Eigenstrahlung des Messobjektes: $\varepsilon\tau W_{\text{obj}}$
- der am Messobjekt reflektierten Strahlung (Umgebung): $(1 - \varepsilon)\tau W_{\text{refl}}$
- der Eigenstrahlung der Luftstrecke: $(1 - \tau)W_{\text{atm}}$

zusammen. Bei kurzen Entfernungen von Messobjekt und Kamera kann der Störeinfluss der Luftschicht vernachlässigt werden. Ebenso sollten Strahlungsquellen in der Umgebung möglichst gut abgeschirmt werden, sodass die aufgenommene Strahlung lediglich vom Messobjekt selbst abhängt.

Wärmeübertragung

In geschlossenen Systemen erfolgt zwischen den Bereichen unterschiedlicher Temperatur ein Wärmeausgleich. Neben der *Wärmestrahlung* nach Stefan-Boltzmann gibt es noch zwei weitere Mechanismen der Übertragung thermischer Energie. Während Wärmeübertragung durch Strahlung auch im Vakuum erfolgt, sind zwei weitere Mechanismen an die Materie gebunden:

- Bei *Wärmeleitung*, oder Konduktion, wird kinetische Energie zwischen benachbarten Atomen oder Molekülen durch Stoß *ohne* Materialtransport übertragen. Auch der Wärmetransport durch die Bewegung freier Elektronen im Metall wird als Wärmeleitung bezeichnet.

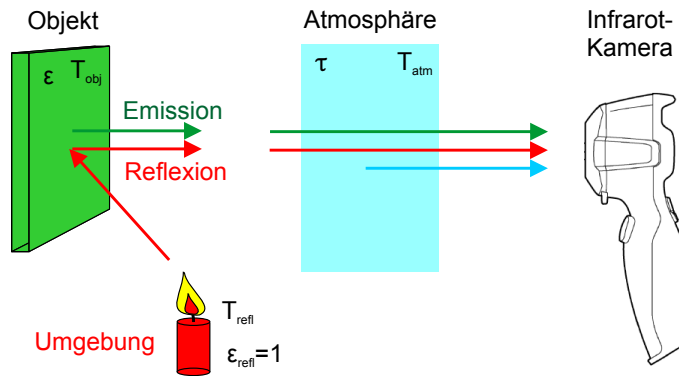


Abb. W12-3: Schematische Darstellung der allgemeinen Messsituation

- Bei der *Konvektion* oder Wärmeströmung wird Wärme von einem strömenden Fluid (Gas, Flüssigkeit) als innere Energie oder Enthalpie mitgeführt. Konvektion tritt immer dann auf, wenn ein strömendes Fluid Wärme von einer Oberfläche aufnimmt oder an sie abgibt.

Wärmeleitung - Stationärer Zustand

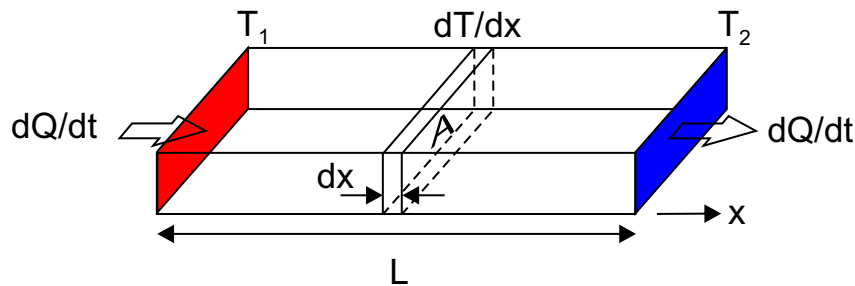


Abb. W12-4: Wärmeleitung in einem Stab

Ein Stab der Länge L mit dem Querschnitt A werde an seinen beiden Enden durch Wärmekontakt mit zwei Wärmereservoirs ständig auf den Temperaturen T_1 bzw. T_2 gehalten (wobei $T_1 > T_2$). Dabei wird die Wärmeenergie vom wärmeren zum kälteren Ende geleitet. Nach hinreichend langer Zeit stellt sich ein stationärer Zustand ein, bei dem im Stab ein konstantes Temperaturgefälle dT/dx vorliegt, das von der Temperaturdifferenz $\Delta T = T_1 - T_2$ und der Länge L abhängt. Wenn die Wärmeverluste durch die Seitenwände des Stabes vernachlässigt werden können, fließt pro Zeiteinheit eine konstante Wärmemenge Q durch die Querschnittsfläche A :

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{W12-8})$$

Die Proportionalitätskonstante λ ($[\lambda] = \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$) ist vom Material abhängig und wird als *Wärmeleitvermögen* bezeichnet.

Integration von Gl. W12-8 ergibt einen linearen Temperaturverlauf, der, wie der Wärmestrom, zeitlich konstant ist:

$$T(x) = -\frac{dQ/dt}{\lambda \cdot A}x + C \quad (\text{W12-9})$$

Die Integrationskonstante C ergibt sich aus den Randbedingungen $T(0) = T_1$ zu $C = T_1$ und die notwendige Wärmezufuhr aus $T(L) = T_2$ zu

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda A \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (\text{W12-10})$$

Versuchsaufbau

1. Kamera

Bei der FLIR-i7 Kamera handelt es sich um eine leichte, einfach zu bedienende Wärmebildkamera, die z. B. bei der thermografischen Inspektion von Gebäuden eingesetzt werden kann. Im Praktikum bietet die Kamera die Möglichkeit, physikalische Grundlagen der Wärmeausbreitung und Wärmebildgebung zu untersuchen. Die FLIR-Kamera erzeugt Wärmebilder im JPEG-Format, die zunächst intern gespeichert, anschließend auf einen PC übertragen und mithilfe der FLIR-Software bearbeitet und analysiert werden können.

Kenndaten der FLIR i7 Kamera

- Spektralbereich: 7,5 bis 13 μm
- Auflösung: 120x120 Pixel
- Fix-Fokus (mind. 0,6 m Abstand zum Objekt, keine Fokussierung notwendig)

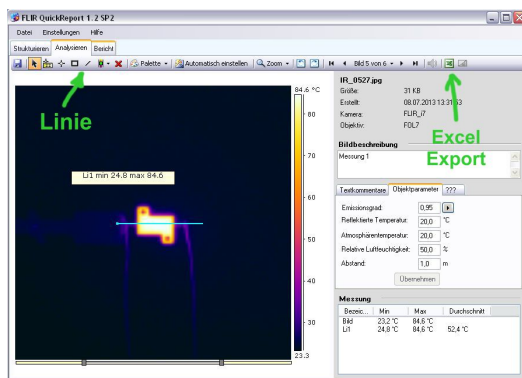
Objektparameter

Zur korrekten Bestimmung der Temperatur benötigt die Kamera die Eingabe einiger Objektparameter. Diese können entweder direkt vor der Bildaufnahme über das Menüsystem der Kamera (K), oder bei der anschließenden Nachbearbeitung mit der FLIR-Software (SW) angepasst werden.

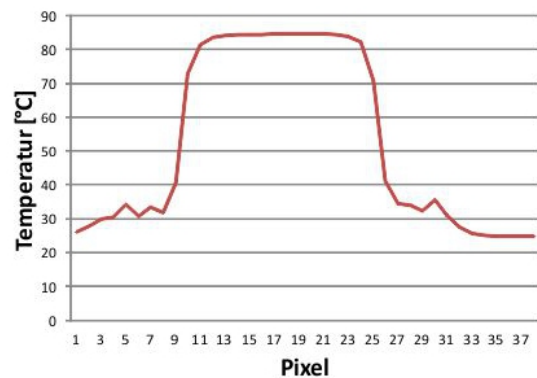
Parameter	Default-Wert	Anpassung
Emissionsgrad ε	1,00	K, SW
Reflektierte Temperatur	20°C	K, SW
Atmosphärentemperatur	20°C	SW
relative Luftfeuchtigkeit	50%	SW
Abstand	1,0 m	SW

Emissionsgrad ε : s. Grundlagen

Reflektierte scheinbare Temperatur: Dieser Parameter spielt eine besonders wichtige Rolle bei der Thermografie von Objekten mit einem niedrigen Emissionsgrad, wenn sich in der



(a) FLIR-QuickReport Software



(b) Temperaturprofil

Abb. W12-5: Temperaturprofil mit QuickReport erstellen

Umgebung des Messobjekts andere heiße Gegenstände befinden.

Um eine bestmögliche Korrektur zu erhalten, gehen Sie wie folgt vor: Emissionsgrad auf 1,0 setzen → Kamera in die entgegengesetzte Richtung des Objekts richten → Bild aufnehmen → Durchschnittswert des Bildes = reflektierte scheinbare Temperatur!

Atmosphärentemperatur: Notieren Sie den aktuellen Wert der Umgebungstemperatur
relative Luftfeuchtigkeit, Abstand: unkritische Parameter für kurze Abstände

FLIR-Quick-Report Software

Mit Hilfe der FLIR-Quick-Report Software können Sie die FLIR-Bilder bearbeiten und analysieren. Verbinden Sie dazu die Kamera mit einem USB-Kabel mit dem PC und laden Sie Ihre Daten.

- Im Register *Strukturieren* können Sie Aufnahmen aussuchen, die Sie bearbeiten möchten
- Im Register *Analysieren* können Sie
 - Objektparameter anpassen
 - Farbpalette ändern
 - Mit den Buttons *Punkt*, *Fläche* oder *Linie* Bereiche im Bild markieren
 - Im Feld 'Messung' die Daten zu den markierten Objekten ablesen
 - Temperaturwerte in Form einer Excel-Tabelle exportieren: $T(x)$ bzw. $T(x,y)$

Bestimmung eines Temperaturprofils

- Mit dem Werkzeug 'Linie' eine Linie zeichnen
- Mit dem Excel-Button 'Bild oder Messung nach Excel exportieren'
- Export: 'Li1' und 'Objektparameter exportieren' auswählen, mit 'Ok' bestätigen

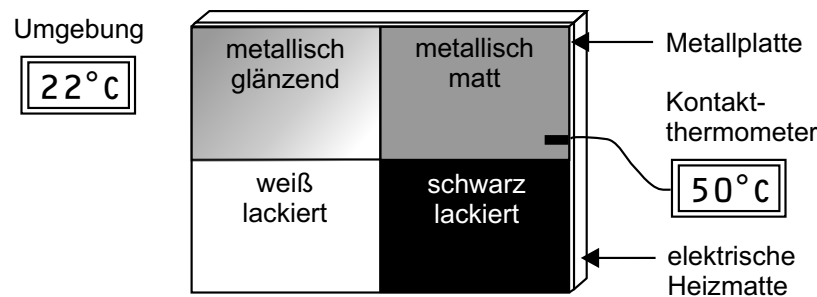


Abb. W12-6: Bestimmung des Emissionsgrads einer Oberfläche

- Es öffnet sich ein Excel-Fenster mit den exportierten Daten
- Temperaturprofil in Excel zeichnen bzw. Daten aus Excel exportieren und mit einem anderem Programm bearbeiten.
- **Hinweis:** 'Pixel' müssen in 'cm' umgerechnet werden!

2. Emissivität der Oberflächen Zur Untersuchung des Abstrahlungsverhaltens unterschiedlicher Oberflächen wird eine Metallplatte verwendet, die nach dem Prinzip des sog. "Leslie-Würfels" konstruiert ist (s. Abb. W12-6). Die Platte hat vier Teilflächen mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit und somit unterschiedlichem Emissionsgrad. Eine Oberfläche ist metallisch matt, eine metallisch glänzend, eine schwarz und eine weiß lackiert. Die Platte wird (regelbar) mit einer elektrischen Heizmatte geheizt ($T_{\max} = 100^\circ\text{C}$). Die tatsächliche Temperatur der Metalloberfläche wird mit einem Kontaktthermometer gemessen. Die Temperaturverteilung aller vier Teilflächen ist (näherungsweise) homogen. Die Temperatur der Metalloberfläche kann ebenfalls mit Hilfe der Wärmebildkamera gemessen werden, wobei die von der Oberfläche emittierte Strahlung detektiert und in Temperatur umgerechnet wird. Was können Sie feststellen, wenn Sie die mit der Kamera angezeigte Temperatur mit der tatsächlichen Temperatur der Platte vergleichen? Welche Rolle spielt dabei die Oberflächenbeschaffenheit der unterschiedlichen Teilflächen?

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, den Emissionsgrad einer Oberfläche zu bestimmen. Überlegen Sie sich eine geeignete Messmethode und bestimmen Sie den ε -Wert der vier Teilflächen.

Hinweise:

- Mit *QuickReport* können Sie die mittlere Temperatur über einer Teilfläche bestimmen, indem Sie diese mit dem Bereichswerkzeug markieren.
- Um den ε -Wert in den Kameraeinstellungen zu verändern: Menü-> Objekt messen -> Erweitert -> Emissionsgrad (mit +/-Taste den Wert einstellen). Alternativ kann der Emissionsgrad ε bei der anschließenden Auswertung mit der *QuickReport*-Software am PC angepasst werden.

3. Wärmeleitung in Metallen

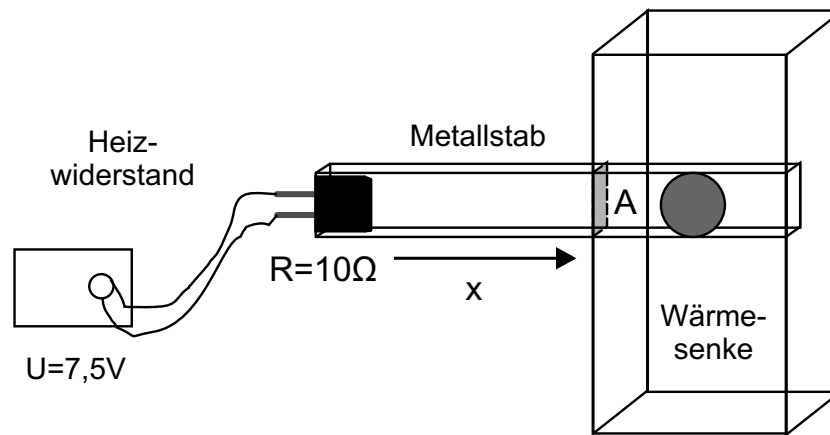


Abb. W12-7: Wärmeleitung in einem Stab

Ein Metallstab mit einer Querschnittsfläche A wird auf der einen Seite durch einen elektrischen Widerstand R geheizt. Am anderen Ende ist der Stab mit einem Aluminiumblock verbunden, der als ein Wärmereservoir dient. Nach einer hinreichend langen Zeit (5-10 min) stellt sich entlang des Stabes ein stationäres Temperaturgefälle ein.

Mit Hilfe der Wärmebildkamera können Sie das Temperaturprofil entlang des Stabes aufzeichnen. Überlegen Sie sich, wie Sie daraus die Wärmeleitfähigkeit des Materials bestimmen können! Sie können unterschiedliche Metalle untersuchen, zur Auswahl stehen Kupfer, Messing und Stahl.

- Alle Metallstäbe sind auf der Vorderseite schwarz lackiert, alle anderen Seiten sind jeweils poliert. (Warum?)
- Im wesentlichen entspricht die zugeführte Leistung der elektrischen Leistung des Heizwiderstands ($P = U \cdot I$)
- Welche Wärmeverluste können bei der Messung auftreten? Wie stark beeinflussen diese die obige Annahme und somit das Ergebnis?
- Verwenden Sie eine Isolierung aus Kunststoff, um die Wärmeverluste zu reduzieren!
- Vergleichen Sie die Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Metalle!
- Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den Literaturwerten!

4. Transmissions- und Reflexionsverhalten unterschiedlicher Materialien

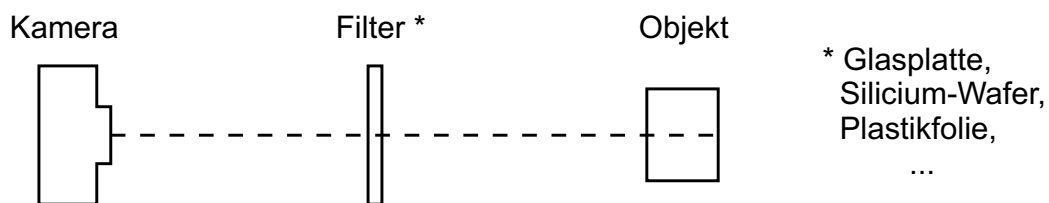


Abb. W12-8: Transmissionsverhalten der Materialien im IR-Bereich

Untersuchen Sie das Transmissionsverhalten unterschiedliche Materialien im IR-Bereich, indem Sie diese zwischen der Kamera und einem Objekt positionieren! Welche Unterschiede können Sie feststellen, wenn Sie das Transmissionsverhalten von einem Material im infraroten und im sichtbaren Teil des Spektrums miteinander vergleichen? Suchen Sie in Literatur nach Transmissionslinien für die von Ihnen untersuchten Materialien!

Beobachten Sie in einer 90°-Anordnung von Objekt und Kamera das Reflexionsverhalten, indem Sie unterschiedliche Materialien als Spiegel einsetzen.

Folgende Materialien stehen zur Verfügung:

- Glasplatte
- Silicium-Wafer
- Plastikfolie

Welche Materialien werden demzufolge bei der Konstruktion der IR-Optiken (Linsen, Objektive, usw.) verwendet?

Messprogramm

Im Rahmen dieses Versuchs können Sie das Modell des *freien Experimentierens* ausprobieren und ausgewählten Fragestellungen aus den Bereichen *Wärmestrahlung* und *Wärmeausbreitung* nachgehen (s.u.). Mit Hilfe einer Wärmebild-Kamera und Ihnen zur Verfügung stehenden experimentellen Aufbauten können Sie eine Reihe unterschiedlicher physikalischer Effekte untersuchen:

- Temperaturbestimmung mit Hilfe einer Wärmebildkamera: mögliche Fehlerquellen und korrekte Parameterwahl
- Einfluss der Oberflächeneigenschaften eines Körpers auf die Emission der Strahlung
- Bestimmung der Emissivität unterschiedlicher Oberflächen
- Wärmeausbreitung in Metallen - Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Metalle
- Transmissions- und Reflexionsverhalten unterschiedlicher Materialien im IR-Bereich

Überlegen Sie sich im Rahmen der Versuchsvorbereitung ein detailliertes Messprogramm und sprechen Sie dieses vor Versuchsbeginn mit Ihrem Assistenten ab!

Sie können sich mit mehreren der oben aufgeführten Themen befassen oder zusätzlich ihr eigenes Themengebiet aussuchen. Alle Schritte Ihrer Untersuchungen sollen protokolliert und Ihre Beobachtungen sollen physikalisch erläutert werden. Dabei soll **mindestens** eine der von ihnen untersuchten Fragestellungen **eine systematische Messreihe**, eine **Auswertung** mit mindestens einem **Diagramm**, eine **Fehlerbetrachtung**, und ggf. ein Vergleich mit Literaturwerten enthalten.