

Praktikumsversuch zur Wärmestrahlung - Vorbereitung

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	1
1.1	Wärmeübertragung	1
1.2	Modell des schwarzen Strahlers	3
1.3	Kirchhoffsches Strahlungsgesetz	4
1.4	Stefan-Boltzmann-Gesetz	6
1.4.1	Geschichtliche Entstehung	6
1.4.2	Stefan-Boltzmann-Gesetz bei nicht-schwarzen Körpern	7
2	Messprinzipien	9
2.1	Temperaturmessung mithilfe eines Thermoelements	9
2.2	Messung der Strahlungsleistung durch eine Thermosäule	11
2.3	Temperaturmessung mit dem Infrarot-Thermometer	13

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Wärmeübertragung

Immer wenn eine Temperaturdifferenz zwischen zwei physikalischen Systemen (z.B. Körper 1 und Körper 2 mit Temperaturen $T_1 \neq T_2$) vorhanden ist, so findet ein Transport von Wärmeenergie statt. Dabei wird thermische Energie (Wärme) von dem wärmeren System auf das kältere übertragen, wodurch das wärmere System sich abkühlt und das kältere System sich erwärmt. Dieser Wärmetransport findet so lange statt, bis sich die beiden Systeme im **thermischen Gleichgewicht** befinden [vgl. Demtröder 2008, S.298]. Das thermische Gleichgewicht ist erreicht, wenn die Temperatur in allen beteiligten Systemen gleich ist. Die Temperatur (in Kelvin) ist dabei ein Maß für die mittlere kinetische Energie, die die einzelnen Teilchen in dem jeweiligen Körper besitzen. Im Falle von Körper 1 mit Temperatur T_1 und Körper 2 mit Temperatur $T_2 \neq T_1$ zu Beginn, wird im thermischen Gleichgewicht somit $T_1 = T_2$ erreicht [vgl. Meschede 2010, S.252, S.590].

Die Übertragung von Wärmeenergie kann prinzipiell durch drei verschiedene Mechanismen stattfinden:

1. Konvektion

Bei der Konvektion wird die thermische Energie durch die Bewegung von Teilchen transportiert. Aus diesem Grund ist diese Art der Wärmeübertragung nur in Flüssigkeiten oder Gasen möglich. Ursache für den Teilchentransport können Dichteunterschiede (zum Beispiel aufgrund von unterschiedlich warmen Schichten), Konzentrationsunterschiede oder auch ein Ventilator sein.

2. Wärmeleitung

Im Gegensatz zur Konvektion wird bei der Wärmeleitung kein Massetransport benötigt, um Wärmeenergie zu transportieren, weshalb sie auch in Festkörpern stattfinden kann. Voraussetzung ist lediglich eine örtliche Temperaturdifferenz. Die einzelnen Moleküle besitzen aufgrund der verschiedenen Temperaturen eine unterschiedlich große Molekülenergie. Durch Stöße miteinander kommt es zur Energieübertragung und somit zu einem Wärmetransport [vgl. Meschede 2010, S.270/271].

3. Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung benötigt für den Wärmetransport keine Materie und ist somit die einzige Übertragungsmöglichkeit im Vakuum. Die Grundlage ist hierbei, dass jeder Körper mit $T > 0 \text{ K}$ elektromagnetische Strahlung emittiert. [vgl. ETHzürich oJ, S.49]

Da in diesem Versuch nur die Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung von Bedeutung ist, wird diese im Folgenden genauer betrachtet.

Bei der Wärmestrahlung überträgt ein wärmeres System an ein kälteres System in Form von elektromagnetischen Wellen thermische Energie und andersherum, da jedes System

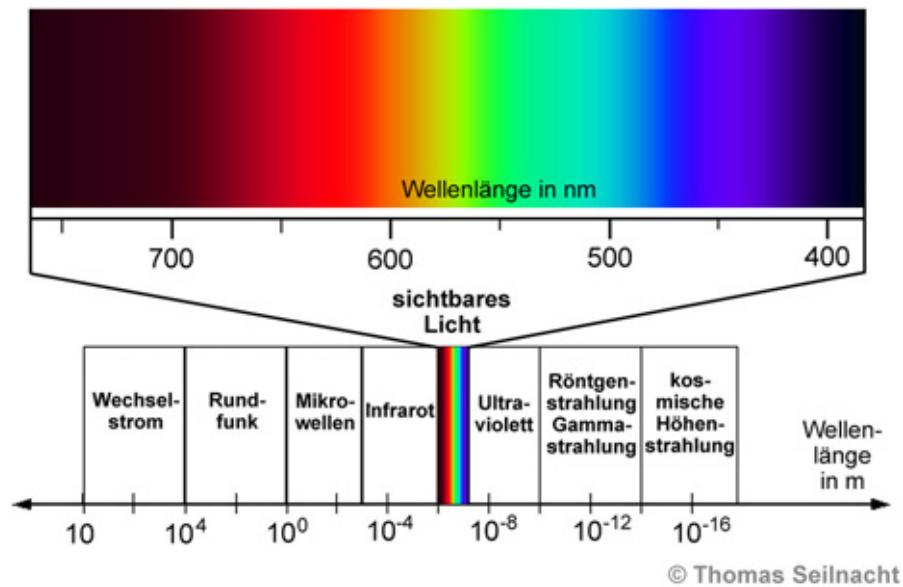


Abbildung 1: Elektromagnetisches Spektrum ¹

über dem absoluten Nullpunkt Wärmestrahlung emittiert. Die Form des Strahlungsspektrums ist allerdings von der Temperatur des Systems abhängig.

Grob gesagt emittiert ein wärmeres System mehr Wärmestrahlung als ein kälteres, wodurch sich ein thermisches Gleichgewicht einstellt [vgl. von Böckh u. Wetzels 2015, S.217]. Wichtig ist hierbei, dass nach Erreichen des thermischen Gleichgewichts die Systeme nicht aufhören zu strahlen. Denn an diesem Punkt emittieren beide Systeme gerade so viel Wärmestrahlung, wie sie selbst absorbieren. In diesem Zustand muss also der Netto-Energietransfer zwischen den beiden Systemen gleich null sein, wodurch die Temperatur unverändert bleibt, die Systeme aber weiterhin strahlen [vgl. Meschede 2010, S.590].

In Abbildung 1 ist das optische Spektrum von Licht dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass das sichtbare Licht Wellenlängen zwischen 380 nm und 780 nm besitzt und angrenzend die Infrarotstrahlung einen Wellenlängenbereich von ca. 780 nm bis 1 mm umfasst. Fälschlicherweise wird Wärmestrahlung oft allgemein mit Infrarotstrahlung gleichgesetzt. Dies ist allerdings nicht ganz korrekt, da zwar ein großer Teil der Wärmestrahlung eines Körpers im Infrarotbereich liegt, allerdings kann sich die Wärmestrahlung über das ganze Spektrum elektromagnetischer Strahlung erstrecken [vgl. Hollandt 2009]. Die Temperatur des Körpers spielt hierbei eine entscheidende Rolle.

¹https://www.seilnacht.com/Lexikon/f_licht2.JPG[01.01.2021]

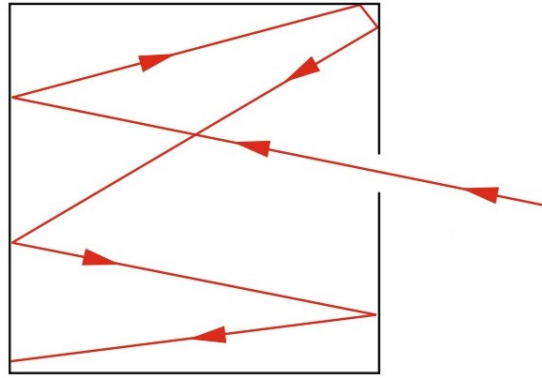


Abbildung 2: Hohlraum, dessen Öffnung sehr viel kleiner als seine gesamte Größe ist ³

1.2 Modell des schwarzen Strahlers

Der „schwarze Strahler“ ist ein Modell, das einen Körper beschreibt, der elektromagnetische Strahlung jeder Wellenlänge vollständig absorbiert und somit keinen Teil reflektiert. Dabei spielt es keine Rolle, in welchem Winkel die Strahlung auf den Körper trifft. Durch diese Idealisierung hängt die spektrale Energiedichte² $\rho(\nu, T)$ der elektromagnetischen Strahlung, die ein schwarzer Körper emittiert, neben der Frequenz nur von der Temperatur T des Körpers ab, und nicht beispielsweise von Materialeigenschaften des Körpers [vgl. ETHzürich oJ, S.50/51].

Ein solch schwarzer Strahler mit den genannten Eigenschaften existiert in der Realität nicht. Am besten lässt sich das Modell des schwarzen Strahlers durch einen Hohlraum realisieren, der aber nur näherungsweise die idealisierten Eigenschaften erfüllt.

Der Hohlraum muss absorbierende Wände und eine sehr kleine Öffnung im Vergleich zu seiner eigenen Größe besitzen. Gelangt nun Strahlung durch die kleine Öffnung in den Hohlraum, so wird diese hauptsächlich durch die Wände absorbiert und nur ein verschwindend geringer Teil der Strahlung wird sehr oft an den Wänden reflektiert, bis diese wieder auf die Öffnung trifft (vgl. Abbildung 2). Dadurch kann die Öffnung des Hohlraums in guter Näherung als eine Fläche angesehen werden, die sämtliche Strahlung vollständig absorbiert und somit die geforderte Eigenschaft eines schwarzen Strahlers erfüllt.

Werden nun die Wände des Hohlraums auf eine bestimmte Temperatur T erhitzt, so entsteht eine Strahlungsquelle, die in etwa die spektrale Energiedichte eines schwarzen Strahlers besitzt [vgl. Demtröder 2008, S.312].

Obwohl ein schwarzer Strahler in der Natur nicht auftreten kann, hat dieses Modell als Grundlage für viele Forschungen mit elektromagnetischer Strahlung gedient [vgl.

²Gibt die Strahlungsenergie pro m^3 und Frequenzintervall $d\nu$ an, wenn der Körper die Temperatur T besitzt.

³[Demtröder 2008, S.312]

1.3 Kirchhoffsches Strahlungsgesetz

Im Gegensatz zu einem schwarzen Körper hängt die Strahlungsleistung P eines realen Körpers nicht nur von der Temperatur ab, sondern auch von der Beschaffenheit der Oberfläche des Körpers. Abhängig von dieser Oberflächenbeschaffenheit eines Körpers ist der sogenannte **Emissionsgrad** ϵ und der **Absorptionsgrad** α .

Um die Bedeutung des Emissionsgrades und des Absorptionsgrades zu verstehen, wird das folgende Gedankenexperiment betrachtet:

Wie in Abbildung 3a) gezeigt, befinden sich zwei ebene Platten im Vakuum gegenüber, wobei beide Platten die Temperatur T besitzen. Der Bereich zwischen den Platten wird mit Spiegeln begrenzt, sodass die gesamte Strahlung im Versuchsaufbau bleibt. Platte 1 besitzt den Absorptionsgrad $\alpha_1 < 1$ und den Emissionsgrad $\epsilon_1 < 1$, Platte 2 den Absorptionsgrad $\alpha_2 < 1$ und den Emissionsgrad $\epsilon_2 < 1$. Die Platte 1 emittiert die Strahlungsleistung P_1 , wobei davon $P_{a,2} = \alpha_2 P_1$ von Platte 2 absorbiert wird und $P_{r,2} = P_1 - P_{a,2} = P_1(1 - \alpha_2)$ reflektiert wird. Ebenso emittiert auch die Platte 2 Wärmestrahlung, und zwar die Strahlungsleistung P_2 . Davon wird $P_{a,1} = \alpha_1 P_2$ von der Platte 1 absorbiert und $P_{r,1} = P_2 - P_{a,1} = P_2(1 - \alpha_1)$ an der Platte 1 reflektiert.

Da angenommen wird, dass sich die beiden Platten im thermischen Gleichgewicht befinden und dadurch dieselbe Temperatur T besitzen, darf kein Nettoenergietransfer zwischen den Platten stattfinden, da sich sonst die Temperatur der Körper ändern würde. Die insgesamt Strahlungsleistung von Platte 1 in Richtung Platte 2 muss also gleich groß sein, wie die von Platte 2 in Richtung Platte 1. Dadurch muss

$$\begin{aligned} P_1 + P_{r,1} &= P_2 + P_{r,2} \\ P_1 + P_2(1 - \alpha_1) &= P_2 + P_1(1 - \alpha_2) \\ \alpha_1 P_2 &= \alpha_2 P_1 \end{aligned} \tag{1}$$

gelten.

Nimmt man nun an, dass es sich bei Platte 1 um einen schwarzen Körper handelt, so ist bereits aus Abschnitt 1.3 bekannt, dass dieser frequenzunabhängig und winkelunabhängig alle elektromagnetische Strahlung absorbiert und somit den Absorptionsgrad $\alpha_S = 1$ besitzt.

Die Strahlungsleistung von Platte 2 wird nun in Bezug auf die eines schwarzen Strahlers gesetzt, was in Abbildung 3b) dargestellt ist. Nach dem zuvor hergeleiteten Zusammenhang folgt damit

$$P_2 = \alpha_2 P_S, \tag{2}$$

wobei P_S der Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers entspricht. Die emittierte Strahlungsleistung von Platte 2 ist somit proportional zu ihrem Absorptionsgrad α_2 .

Im Allgemeinen kann die abgegebene Strahlungsleistung von Platte 2 durch $P_2 = \epsilon_2 P_S$

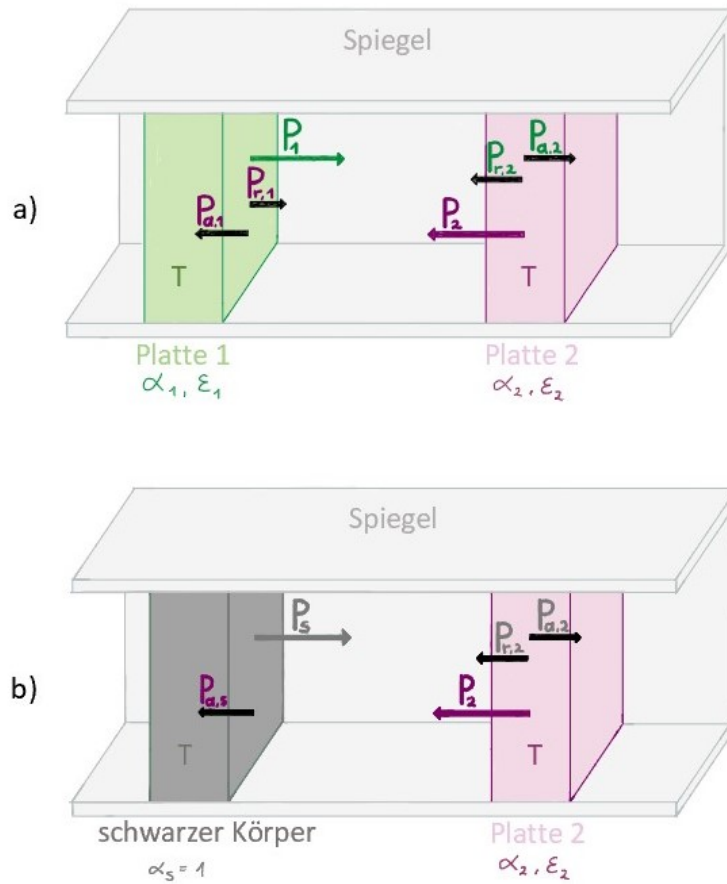


Abbildung 3: Versuchsskizze zum Gedankenexperiment

- a) Wärmestrahlung zweier Platten unterschiedlichen Absorptionsgrades < 1 im thermischen Gleichgewicht
- b) Wärmestrahlung zwischen Platte mit Absorptionsgrad < 1 und schwarzem Körper im thermischen Gleichgewicht

angegeben werden. Wird dies in Gleichung 2 eingesetzt, ergibt sich

$$\epsilon_2 P_S = \alpha_2 P_S \Leftrightarrow \epsilon_2 = \alpha_2. \quad (3)$$

Da die Gleichung 2 nur im thermischen Gleichgewicht gilt, folgt, dass im thermischen Gleichgewicht der Emissionsgrad ϵ einer Fläche gerade ihrem Absorptionsgrad α entspricht. Das heißt, dass eine Fläche umso mehr Wärmestrahlung emittiert, je mehr sie absorbieren kann.

Unter der Annahme, dass eine der beiden Platten ein schwarzer Körper ist und sich beide Platten im thermischen Gleichgewicht befinden, wurde nun der Zusammenhang

$$P(T) = \alpha \cdot P_S(T) \stackrel{\text{therm. GG}}{=} \epsilon \cdot P_S(T) \quad (4)$$

hergeleitet, was als **Kirchhoffsches Strahlungsgesetz** bezeichnet wird. Dabei entspricht $P(T)$ der Strahlungsleistung, α dem Absorptionsgrad und ϵ dem Emissionsgrad des zu untersuchenden Körpers bei der Temperatur T und $P_S(T)$ der Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers bei derselben Temperatur.

Da die letzte Gleichheit in Gleichung 4 nur im thermischen Gleichgewicht gilt, ist bei der experimentellen Bestimmung des Emissionsgrades von Oberflächen wichtig, dass sich vor der Messung ein thermisches Gleichgewicht zwischen den beteiligten Messgeräten und der zu untersuchenden Oberfläche eingestellt hat.

1.4 Stefan-Boltzmann-Gesetz

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz besagt, dass die abgestrahlte Wärmeleistung eines schwarzen Körpers mit der Oberfläche A und der Temperatur T proportional zur vierten Potenz der Temperatur der Oberfläche ansteigt. Wenn beispielsweise die Temperatur der Oberfläche verdoppelt wird, so versechzehnfacht sich die abgestrahlte Leistung.

Formal gilt die Beziehung

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (5)$$

zwischen der Strahlungsleistung P und der Temperatur T in Kelvin, wobei $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$ die Stefan-Boltzmann-Konstante ist [vgl. Demtröder 2008, S.313].

Dieses Gesetz wurde bereits im Jahr 1879 von dem Physiker Josef Stefan experimentell nachgewiesen und nur 5 Jahre später von Ludwig Boltzmann theoretisch begründet [vgl. Huebener u. Schopohl 2016, S.485].

1.4.1 Geschichtliche Entstehung

Stefan baute seine Arbeit zu der Wärmestrahlung auf den bereits bestehenden Forschungsergebnissen der beiden Physiker Dulong und Petit aus dem Jahr 1817 auf. Diese benutzten für ihre Messungen eine Glühbirne in einer runden Kammer, wobei der Zwischenraum mit verschiedenen Gasen gefüllt wurde. Es wurden sowohl Versuchsreihen mit blanker, als auch mit versilberter Glühbirne durchgeführt, wobei die Glühbirne auf ca. 573 K erhitzt wurde, während die Kammer auf etwa 273 K gehalten wurde.

Dulong und Petit maßen dann die Änderungsrate der Temperatur der Glühbirne beim Abkühlungsprozess bei verschiedenen Drücken des Gases im Zwischenraum. Um eine Aussage über die Wärmestrahlung, ohne Einflüsse von Wärmeleitung oder Konvektion, machen zu können, extrapolierten Dulong und Petit ihre Daten für einen Druck von 0 bar und gingen davon aus, dass das von ihnen aufgestellte Modell

$$P(T) = \mu \cdot a^T \quad (6)$$

für die Wärmestrahlung eines Körpers gilt, wobei μ eine material- und größenabhängige Konstante des betrachteten Körpers ist, $a = 1,0077$ eine materialunabhängige Konstante und T die Temperatur des Körpers in Grad Celsius [vgl. Crepeau 2006, S.799].

Da Stefan sich intensiv mit der Wärmeleitung von Gasen beschäftigt hatte, wusste er im Gegensatz zu Dulong und Petit, dass die Wärmeleitung von Gasen nicht von dem Druck abhängt, wodurch die Einflüsse der Wärmeleitung auf den Abkühlungsprozess der Glühbirne nicht zu vernachlässigen sind.

Daher verbesserte er das Modell von Dulong und Petit zu

$$P(T) = A \cdot T^4, \quad (7)$$

wobei A von der Größe und der Beschaffenheit der strahlenden Oberfläche abhängt. Ein entscheidender Unterschied zu dem vorherigen Modell ist, dass Stefan die Temperatur T in Kelvin angibt und nicht in einer Temperaturskala mit willkürlichem Nullpunkt, wie Dulong und Petit es taten [vgl. Crepeau 2006, S.800].

Mit Hilfe seines T^4 -Gesetzes konnte Stefan auch bei höheren Temperaturen die abgegebene Wärmestrahlung bestimmen, wobei er als Vergleich immer Messungen von anderen Physikern nutzte.

Boltzmann leitete dieses Gesetz im Jahre 1884 unabhängig von Stefan's Arbeit her und konnte diese so bestätigen. Zudem untersuchte er die Proportionalität genauer und bestimmte die Proportionalitätskonstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$.

1.4.2 Stefan-Boltzmann-Gesetz bei nicht-schwarzen Körpern

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz gilt im Allgemeinen nur für schwarze Strahler. Da in der Natur und somit auch im Praktikumsversuch aber nur nicht-schwarze Körper vorkommen, die weniger Strahlung als ein schwarzer Körper emittieren bzw. absorbieren können, muss dies mit berücksichtigt werden.

Dafür wird das bereits in 1.3 hergeleitete Kirchhoffsche Gesetz bei thermischem Gleichgewicht verwendet und für die Strahlungsleistung $P_S(T)$ eines schwarzen Körpers die gerade eben bestimmte Beziehung eingesetzt. Dadurch ergibt sich das Stefan-Boltzmann-Gesetz für nicht-schwarze Körper zu

$$P(T) = \epsilon \cdot P_S(T) = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4. \quad (8)$$

Wird im Allgemeinen ein schwarzer Körper mit der Temperatur T_1 betrachtet, der sich in einer Umgebung mit Temperatur T_2 befindet, so muss dies bei der Untersuchung des Strahlungsaustausches berücksichtigt werden. Interessiert man sich für die Netto-Wärmestrahlung, die der Körper abgibt, so muss von der Brutto-Strahlungsleistung P_1 , die der Körper an die Umgebung abgibt, die Brutto-Strahlungsleistung P_2 der Umge-

bung, die der Körper empfängt, subtrahiert werden. Dadurch ergibt sich für die tatsächlich abgestrahlte Leistung P des Körpers

$$P(T) = P_1 - P_2 = \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (9)$$

[vgl. Meschede 2010, S.275].

2 Messprinzipien

2.1 Temperaturmessung mithilfe eines Thermoelements

Für die berührende Temperaturmessung wird in diesem Versuch ein sogenanntes Thermoelement verwendet, dessen Funktionsweise auf dem Seebeck-Effekt beruht.

Um den Seebeck-Effekt zu erklären und dessen Ursache zu verstehen, wird ein Metallstab betrachtet. Besitzt dieser eine konstante Temperatur, so führen die Elektronen eine ungeordnete Bewegung aus. Mit welcher Geschwindigkeit sie sich bewegen ist abhängig von der Temperatur des Stabes, denn je höher die Temperatur des Stabes ist, umso mehr Bewegungsenergie besitzen die Elektronen.

Im Folgenden werden die beiden Enden des Metallstabes auf unterschiedlichen Temperaturen gehalten ($T_1 > T_2$), wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Nach den vorherigen Überlegungen besitzen die Elektronen, die sich von T_1 nach T_2 bewegen, eine höhere Geschwindigkeit als die Elektronen, die sich vom kälteren zum wärmeren Stabende bewegen. Es dominiert also die Elektronenbewegung von T_1 nach T_2 , wodurch die mittlere Geschwindigkeit bei Betrachtung aller Elektronen zum kälteren Ende zeigt. Dieses Phänomen nennt sich **Thermodiffusion** und sorgt für einen Elektronenüberschuss am kälteren Stabende und einen Elektronenmangel am wärmeren Stabende. Das kalte Stabende lädt sich dabei so lange weiter negativ auf, bis der entstandene Thermodiffusionsstrom gegen das sich ausbildende elektrische Feld nicht mehr ankommt. In diesem Fall hat sich dann ein Gleichgewicht eingestellt [vgl. Pelster u. a. 2005, S.19/20].

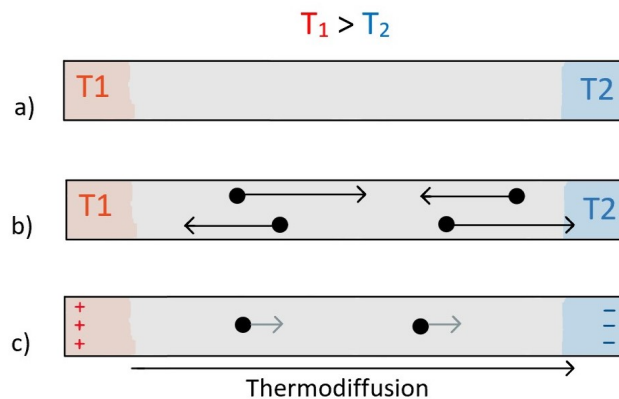


Abbildung 4: a) Ausgangssituation

- b) Elektronenbewegung, wobei die Pfeile die entsprechenden Geschwindigkeitsvektoren darstellen
- c) mittlere Geschwindigkeit in Richtung des kälteren Endes (Diffusionsstrom), Ladungsverschiebung entsteht ⁴

⁴Graphik in Anlehnung an [Pelster u. a. 2005, S.19] Abbildung 10

Die eben erklärte Thermodiffusion ist die Ursache des **Seebeck-Effekts**, welcher nun besagt, dass eine messbare Thermospannung entsteht, wenn die Kontaktstellen von zwei unterschiedlichen Metallen sich auf unterschiedlichen Temperaturen befinden. Die verwendeten Metalle müssen dabei verschieden sein, da sonst die entstehenden Diffusionsspannungen betragsmäßig gleich groß sind und sich somit gegenseitig aufheben. Die Thermospannung ist näherungsweise linear abhängig von der Temperaturdifferenz der Kontaktstellen und hängt zudem noch von den Materialien der beiden Metalle ab.

Diese Zusammenhänge werden sich nun beim **Thermoelement** zur Temperaturmessung zu Nutze gemacht.

Dafür werden zunächst zwei Metalldrähte aus unterschiedlichen Materialien (A und B) betrachtet, wobei sich bei beiden Drähten das eine Ende auf der Messstelle mit Temperatur T_1 befindet und das andere Ende auf der Referenzstelle mit Temperatur T_2 , wobei $T_1 > T_2$ gilt. Entsprechend den vorherigen Überlegungen entsteht in beiden Metalldrähten eine Thermodiffusionsspannung (U_{Dif}^A und U_{Dif}^B), die allerdings trotz identischer Temperaturdifferenz nicht gleich ist, da die Metalle aus unterschiedlichem Material bestehen (vgl. Abbildung 5).

Lötet man nun die Stabenden, die auf gleicher Temperatur liegen, zusammen, so entsteht eine Thermospannung U als Differenz der beiden Diffusionsspannungen

$$U = U_{\text{Dif}}^A - U_{\text{Dif}}^B. \quad (10)$$

Um diese zu messen, wird ein Voltmeter zwischengeschaltet (vgl. Abbildung 5) [vgl. Pelster u. a. 2005, S.20].

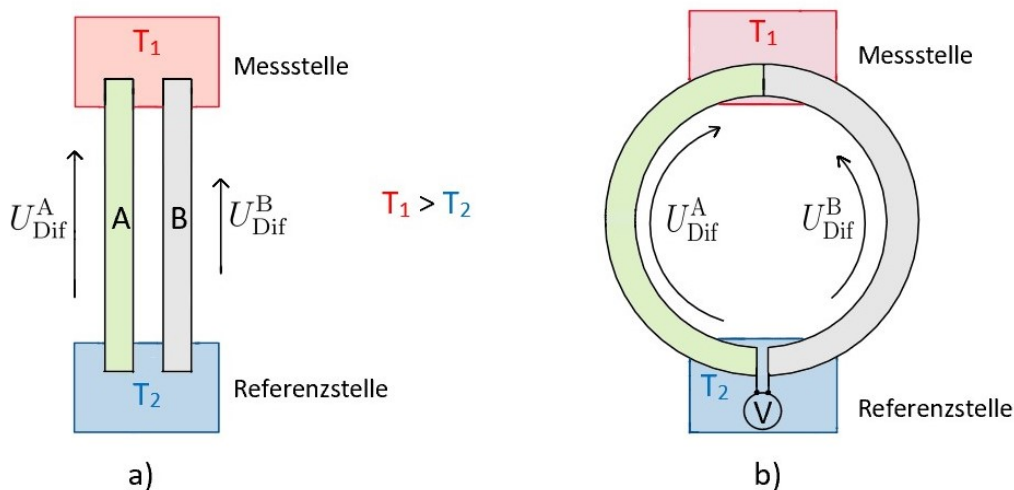


Abbildung 5: a) zwei unterschiedliche Metalldrähte, deren Kontaktstellen auf unterschiedlichen Temperaturen liegen
b) Thermoelement ⁵

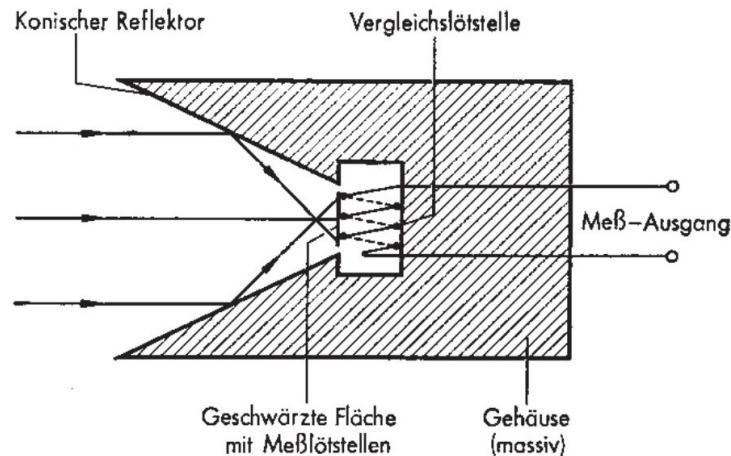


Abbildung 6: Querschnitt der Thermosäule nach Moll ⁶

Die Thermospannungen liegen in einer Größenordnung von Mikrovolt bis Millivolt, wodurch diese für eine Messung meist verstärkt werden müssen [vgl. Schenk u. a. 2014, S.111].

Die im Praktikum verwendeten Temperaturfühler für die berührende Temperaturmessung besitzen in ihrer Spitze ein solches Thermoelement. Eine externe Referenzstelle ist dabei nicht notwendig, da das zugehörige Messgerät die Referenztemperatur bereits intern über einen weiteren Temperatursensor erfasst und elektronisch kompensiert, und somit die Temperatur der gemessenen Oberfläche ausgibt [vgl. Prof.Dr.Maey oJ].

2.2 Messung der Strahlungsleistung durch eine Thermosäule

Mit der Thermosäule nach Moll ist es möglich, die Wärmestrahlung eines Körpers zu messen, da sie elektromagnetische Strahlung von Ultraviolett bis zu langwelligem Infrarot detektieren kann [vgl. PHYWE oJ]. Bei ihrer Konstruktion ist entscheidend, dass ihre Detektionsplatte nahezu die vollständige auf sie treffende Strahlung absorbiert und somit einem nahezu schwarzen Strahler entspricht.

Im Folgenden ist ein schematischer Querschnitt einer solchen Thermosäule skizziert.

Die auf die Thermosäule einfallende Wärmestrahlung trifft entweder direkt auf die geschwärzte Fläche oder wird am konischen Reflektor reflektiert, bis sie auch auf die Fläche trifft. Die geschwärzte Fläche absorbiert die auf sie treffende Strahlung nahezu komplett und erwärmt sich dementsprechend. Auf dieser Detektorfläche befinden sich elektrisch in

⁵Graphik in Anlehnung an [Pelster u. a. 2005, S.20] Abbildung 12

⁶[PHYWE oJ]

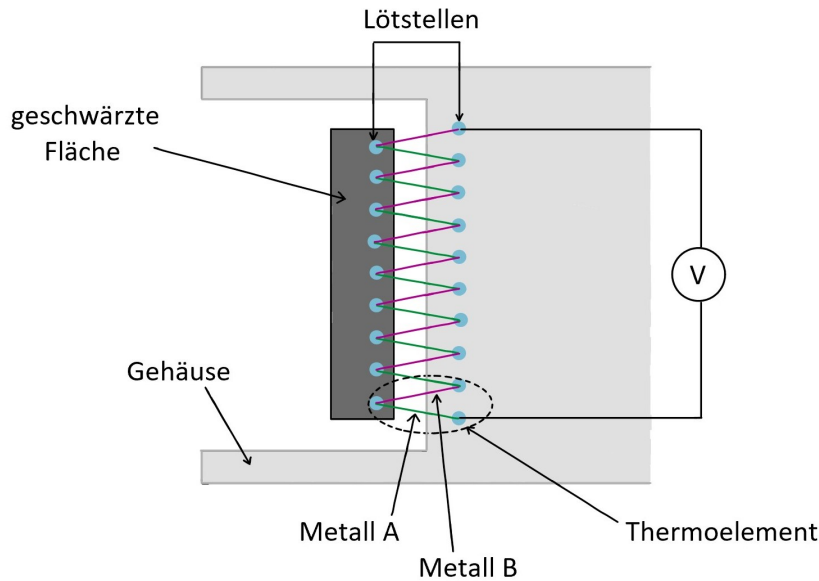


Abbildung 7: Funktionsweise Thermosäule

Reihe thermisch parallel geschaltete Thermoelemente, die so angebracht sind, dass sich das eine Ende des Thermoelements auf der geschwärzten Fläche befindet und das andere mit dem Gehäuse der Thermosäule verbunden ist (vgl. Abbildung 7) [vgl. Schenk u. a. 2014, S.115].

Die Reihenschaltung der Thermoelemente wird verwendet, da die Thermospannung eines einzelnen Thermoelements, wie bereits erwähnt, sehr gering ist und diese durch die Reihenschaltung jeweils addiert werden.

Da die Temperatur des Gehäuses als Referenztemperatur für die in Reihe geschalteten Thermoelemente dient, ist es wichtig, diese zu kennen (entspricht im thermischen Gleichgewicht der Raumtemperatur) oder das Gehäuse der Thermosäule während der Messung auf eine konstante Temperatur zu kühlen.

Befindet sich die Thermosäule mit ihrer Umgebung im thermischen Gleichgewicht und befindet sich das Gehäuse der Temperatur auf Umgebungstemperatur, so ist die Thermospannung gleich null. Erst bei einer Temperaturdifferenz zwischen geschwärzter Fläche und Gehäuse entsteht aufgrund der Funktionsweise der Thermoelemente eine Thermospannung, die proportional zur Temperaturerhöhung der geschwärzten Fläche ist [vgl. Schenk u. a. 2014, S.115].

Wird wie im Praktikumsversuch ein Körper mit Emissionsgrad ϵ vor der Thermosäule platziert, der auf eine bestimmte Temperatur geheizt und auf dieser Temperatur gehalten wird, so findet zwischen der geschwärzten Fläche der Thermosäule und dem Körper genau dann kein Nettoenergietransfer statt, wenn die Strahlungsleistung, die die geschwärzte Fläche emittiert, gerade so groß ist, wie die Strahlungsleistung, die ein Körper mit dem Emissionsgrad ϵ abstrahlt. Somit ist die Temperatur der geschwärzten Fläche

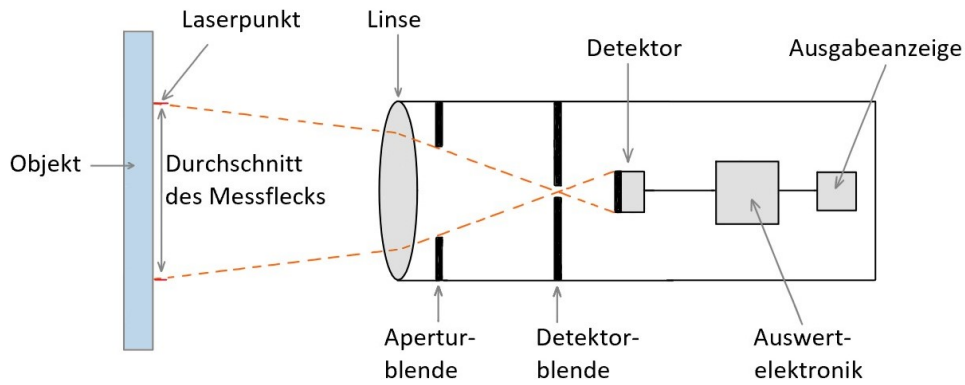


Abbildung 8: Aufbau eines Infrarot-Thermometers mit Strahlengang der Wärmestrahlung

abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des zu untersuchenden Körpers und die entstehende Thermospannung in diesem Zustand proportional zur Strahlungsleistung, die auf die Detektorfläche trifft. Daher gilt in diesem Fall der Zusammenhang

$$U \sim P \sim T^4 - T_0^4 \quad (11)$$

zwischen der Thermospannung U , der Strahlungsleistung P des betrachteten Objekts, der Temperatur T des Objekts und der Temperatur T_0 des Gehäuses der Thermosäule. Da die Thermosäule so konstruiert ist, dass sie sehr empfindlich auf einfallende Strahlung reagiert, ist zu beachten, dass Fremdeinflüsse, wie andere abstrahlende Körper aus näherem Umfeld oder beispielsweise Sonnenlicht, das Messergebnis beeinflussen können [vgl. PHYWE oJ].

2.3 Temperaturmessung mit dem Infrarot-Thermometer

Mit einem Infrarot-Thermometer ist es möglich, die Oberflächentemperatur eines Objekts berührungslos zu bestimmen. Dazu wird die vom betrachtenden Objekt emittierte Infrarotstrahlung detektiert. Im Gegensatz zu der berührenden Temperaturmessung mit einem Thermoelement, muss bei der berührungslosen Temperaturmessung mit dem Infrarot-Thermometer der Emissionsgrad des zu untersuchenden Objekts bekannt sein, damit auf die Oberflächentemperatur des Objekts geschlossen werden kann [vgl. Voltcraft 2011, S.1].

In Abbildung 8 ist der schematische Aufbau eines Infrarot-Thermometers dargestellt. Das Infrarot-Thermometer ermittelt die Temperatur einer Oberfläche, indem zunächst die emittierte Wärmestrahlung des Messobjekts mit Hilfe einer Linse gebündelt wird. Durch eine Aperturblende wird dieses Bündel weiter begrenzt und für eine gleichmäßige Helligkeit gesorgt. Nach dem Durchqueren der Detektorblende, die dafür sorgt, dass keine Fremdstrahlung auf den Detektor fällt, trifft die fokussierte Wärmestrahlung auf den Detektor. Dieser wandelt die auftreffende Infrarotstrahlung in ein dazu proportionales

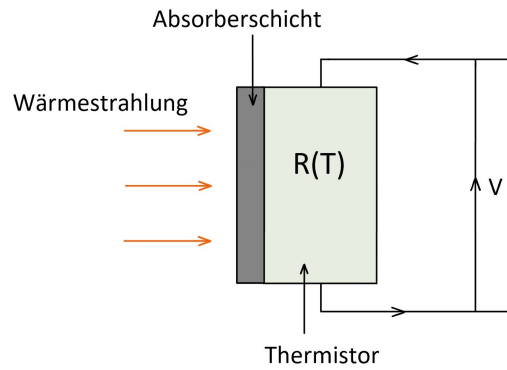


Abbildung 9: vereinfachte Darstellung der Funktionsweise eines Bolometers

elektrisches Signal um. Bei der Weiterverarbeitung in der Auswertelektronik wird durch einen Temperatursensor die Umgebungstemperatur berücksichtigt und diese mit dem Signal verarbeitet. Zudem wird hier auch der eingestellte Emissionsgrad ϵ mitberücksichtigt.

Im Anschluss wird ein Temperaturwert ausgegeben, welcher im Display des Infrarot-Thermometers angezeigt wird und der Oberflächentemperatur des Messobjekts entspricht. Wird statt des korrekten Emissionsgrads ein Emissionsgrad von $\epsilon = 1$ angegeben, geht das IR-Thermometer davon aus, dass das zu untersuchende Objekt sich wie ein schwarzer Strahler verhält [vgl. Schenk u. a. 2014, S.116].

Das Element mit der größten Bedeutung im Aufbau eines IR-Thermometers, ist der Detektor. Das im Versuch verwendete Infrarot-Thermometer nutzt dafür ein sogenanntes **Bolometer**, welches schematisch in Abbildung 9 skizziert ist.

Die Funktionsweise eines Bolometers basiert auf Thermistoren, bei welchen es sich um elektrische Widerstände handelt, die ihren Widerstand proportional zu der einfallenden Wärmestrahlung und der darauf folgenden Temperaturänderung ändern [vgl. Hollister 2009, S.9].

Zunächst trifft die Wärmestrahlung auf eine Absorberschicht, die möglichst viel der einfallenden Strahlung absorbiert und sich somit erwärmt. Da diese Schicht stark mit dem angrenzenden Thermistor gekoppelt ist, erwärmt sich dieser mit und ändert dadurch seinen Widerstand $R(T)$. Wird an den temperaturempfindlichen Widerstand eine Spannung angelegt, so ändert sich die Stromstärke proportional zur einfallenden Infrarotstrahlung bzw. der daraus resultierenden Widerstandsänderung aufgrund der Temperaturänderung des Thermistors [vgl. Hollister 2009, S.9/10.].

Diese Widerstandsänderung wird an die Auswertelektronik übermittelt und dort entsprechend ausgewertet.

Ein Infrarot-Thermometer reagiert sensibel auf Umgebungsstrahlungen, die die zu messende Oberfläche reflektiert.

Im Allgemeinen setzt sich die am Detektor registrierte Strahlungsleistung P_{IR} zusammen aus der emittierten, reflektierten und transmittierten Wärmestrahlung des Messobjekts

$$P_{\text{IR}} = P_{\text{emittiert}} + P_{\text{reflektiert}} + P_{\text{transmittiert}} \quad (12)$$

[vgl. Voltcraft 2011, S.2].

Da der im Versuch als Messobjekt verwendete Leslie-Würfel vernachlässigbar wenig Wärmestrahlung transmittiert, kann $P_{\text{transmittiert}} = 0$ gesetzt werden.

Bei Flächen mit großem Emissionsgrad ist der Anteil der reflektierten Wärmestrahlung recht gering. Bei stark spiegelnden Objekten versagt das IR-Thermometer allerdings, da die registrierte Wärmestrahlung am Detektor zum Großteil der Wärmestrahlung aus der Umgebung entspricht, die reflektiert wird und somit keine Aussage über die tatsächliche Temperatur der Oberfläche möglich ist.

Literatur

- [von Böckh u. Wetzel 2015] BÖCKH, Peter von ; WETZEL, Thomas: *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis*. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2015
- [Crepeau 2006] CREPEAU, John: Josef Stefan: His life and legacy in the thermal sciences. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 31 (2006)
- [Demtröder 2008] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Demtröder Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme*. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008
- [ETHzürich oJ] ETHZÜRICH: *Physik IV-Skript, Kapitel 5: Wärmestrahlung*. <https://qudev.phys.ethz.ch/static/content/science/BuchPhysikIV/PhysikIV.html>. Version: o.J.. – Stand: 30.12.2020
- [Hollandt 2009] HOLLANDT, Jörg: *Infrarotstrahlung*. <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/licht/elektromagnetisches-spektrum/infrarotstrahlung/>. Version: 2009. – Stand: 31.12.2020
- [Hollister 2009] HOLLISTER, Matthew I.: The SCUBA-2 Instrument: An Application of Large-Format Superconducting Bolometer Arrays for Submillimetre Astronomy. (2009)
- [Huebener u. Schopohl 2016] HUEBENER, Rudolf P. ; SCHOPOHL, Nils: *Die Geburt der Quantenmechanik: Boltzmann, Planck, Einstein, Nernst und andere*. Wiesbaden : Springer Spektrum, 2016
- [Meschede 2010] MESCHÉDE, Dieter: *Gerthsen Physik*. 24. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010
- [Pelster u. a. 2005] PELSTER, Rolf ; PIEPER, Reinhard ; HÜTTTL, Ingo: Thermospannungen - Viel genutzt und fast immer falsch erklärt! In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* Band 4 (2005)
- [PHYWE oJ] PHYWE: *Betriebsanleitung: Thermosäule nach Moll*. o.J.
- [Prof.Dr.Maey oJ] PROF.DR.MAEY, GmbH: *Gebrauchsanweisung: Digitales Temperaturmessgerät mit vier Eingängen, Temperaturfühler*. o.J.
- [Schenk u. a. 2014] SCHENK, Wolfgang ; KREMER, Friedrich ; BEDDIES, Gunter ; FRANKKE, Thomas ; GALVOSAS, Petrik ; RIEGER, Peter: *Physikalisches Praktikum*. 14. Auflage. Wiesbaden : Springer, 2014
- [Voltcraft 2011] VOLT-CRAFT: *Bedienungsanleitung: Infrarot-Thermometer*. Hirschau, 2011