

<p>Leibniz Universität Hannover Institut für Elektroprozess-technik</p>	<p>Name:</p>
<p>Elektrowärmelabor I</p>	<p>Matr.-Nr.:</p> <p>Gruppe:</p> <p>Versuchsdatum:</p>
<p>Versuch T4 <i>Pyrometrische Temperaturmessung und Thermografie</i></p>	<p>Testat:</p> <p>Versuchsleiter:</p>

Inhalt:

- 1. Einleitung**
- 2. Strahlung**
- 3. Planck'sches Strahlungsgesetz**
- 4. Schwarzer Strahler**
- 5. Emissionsgrad ϵ**
- 6. Bestimmung des Emissionsgrades nach Buckley**
- 7. Aufbau und Funktionsweise des Pyrometers**
- 8. Versuchsdurchführung**

1. Einleitung

Gegenstand der Pyrometrie und der Thermografie ist die Ermittlung der Temperatur eines Körpers durch Messung der von ihm ausgesandten Wärmestrahlung.

Diese berührungslose Temperaturmessung ist in Forschung und Industrie sehr verbreitet, denn sie bietet große Vorteile:

- Messung sehr hoher Temperaturen, bei denen aus metallurgischen Gründen der Einsatz von Thermoelementen und Thermometern nicht möglich ist
- Messung an Körpern, die eine schlechte Wärmeleitfähigkeit oder eine kleine Wärmekapazität besitzen, so dass durch Kontakt von Sonden das Messergebnis verfälscht werden könnte
- Messung an unzugänglichen oder sich bewegenden Objekten
- Messung von Temperaturverteilungen mit hoher Auflösung (Thermografie)

Die Anwendungsgebiete von Pyrometern und Wärmebildkameras sind sehr vielseitig.

Neben der berührungslosen Temperaturmessung zur Prozesskontrolle, Prozesssteuerung, Prozessautomation und Qualitätskontrolle in der Industrie, kommen diese Technologien u.a. auch in der Brandfrüherkennung, Verkehrsüberwachung, Gebäudesanierung, Human- und Veterinärmedizin vor und können sogar die Temperatur von Himmelskörpern (z.B. der Sonne) bestimmen.

Ziel dieses Versuches ist es, die physikalischen Gesetze zu verstehen, die hinter dieser berührungslosen Temperaturmessung stehen und anhand praktischer Messreihen einen Einblick in die Arbeitsweise der Pyrometer zu erlangen.

2. Strahlung

Jeder Körper, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt, sendet Temperatur- oder Wärmestrahlung aus. Erhitzen wir den Körper auf eine Temperatur von über 600°C , so beginnt er zu glühen, d.h. ein Teil der ausgesandten Temperaturstrahlung liegt im Bereich des sichtbaren Lichtes. Diese Tatsache verdeutlicht, dass es sich bei der Temperaturstrahlung um elektromagnetische Wellen handelt. Diese Wellen stellen einen räumlichen und zeitlich periodischen Vorgang dar, bei dem mit der Ausbreitung der Wellen eine Energie transportiert wird. Mit Hilfe der Strahlung kann die Temperatur eines Körpers berührungslos gemessen werden. In Abb.1 ist das elektromagnetische Strahlungsspektrum, das von Radiowellen mit Wellenlängen von einigen km bis zu Gammastrahlen mit Wellenlängen von 10^{-11}m reicht, dargestellt. Die Temperaturstrahlung erstreckt sich hauptsächlich vom mittleren Infrarot bis zum sichtbaren Spektrum. (Gesamtspektrum ca. $0,1 - 100 \mu\text{m}$)

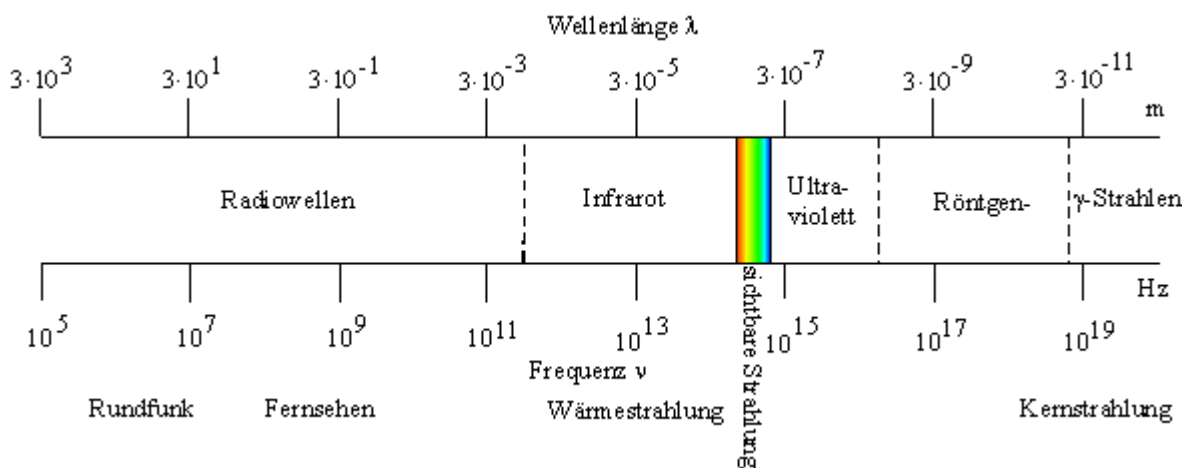


Abb.1: Elektromagnetisches Spektrum

3. Planck'sches Strahlungsgesetz

Sowohl die Pyrometrie, als auch das bildgebende Verfahren der Thermografie, sind Verfahren zur Bestimmung der Oberflächentemperatur eines Körpers.

Den physikalischen Zusammenhang wie sich die abgestrahlte Leistung einer Oberfläche über den einzelnen Wellenlängen verteilt und wie sie von der Temperatur abhängt, konnte zuerst Planck (1900) darstellen.

Abbildung 2 zeigt das Planck'sche Strahlungsgesetz für einen schwarzen Strahler bei verschiedenen isothermen Zuständen. Diese Abbildung gibt an, welche Leistung pro Flächeneinheit für eine feste Temperatur bei verschiedenen Wellenlängen in den Halbraum abgestrahlt wird.

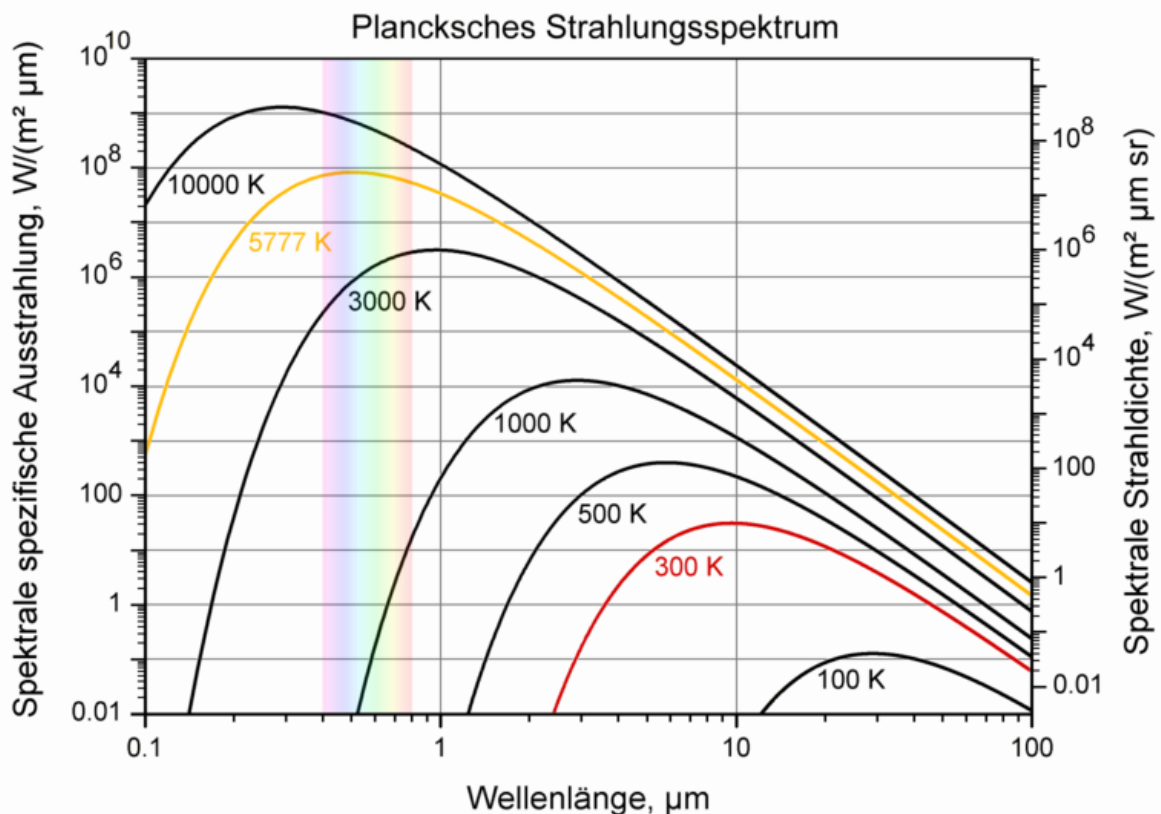


Abb.2: Planck'sches Strahlungsgesetz

Aus der Grafik wird ersichtlich, dass ein schwarzer Körper (Erklärung im Folgenden) mit konstanter Temperatur ein Strahlungsmaximum bei einer bestimmten Wellenlänge hat. Dieses Strahlungsmaximum verschiebt sich bei höheren Temperaturen zu geringeren Wellenlängen.

Dieser Effekt, der auch als Wien'sche Verschiebungsgesetz bekannt ist, verdeutlicht, warum eine Flamme mit steigender Temperatur ihre Farbe von rot, über orange, bis hin zu blau ändert. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und der Wellenlänge der maximalen Strahlungsintensität ist also umgekehrt proportional.

In der Grafik ist ebenfalls der sichtbare Strahlungsbereich eingetragen. Zu erkennen ist, dass Oberflächen mit einer Temperatur unter ca. 800K so gut wie gar keine Leistung im sichtbaren Bereich abstrahlen und, dass selbst bei Temperaturen über 800K der Anteil der abgestrahlten Leistung im sichtbaren Bereich nicht sehr groß ist.

Um mit einem Pyrometer die Temperatur bestimmen zu können, muss dieses also für den entsprechenden Wellenlängenbereich des Strahlers geeignet sein. Schon alleine daraus lässt sich schließen, dass auf dem Markt eine große Anzahl verschiedener Pyrometer für zahlreiche Anwendungen verfügbar sind.

Die Fläche unter einer Isothermen stellt die gesamte abgestrahlte Leistung einer Oberfläche bei der Temperatur T dar.

Wird eine Isotherme über alle Wellenlängen aufsummiert (Integration), ergibt sich für die spezifische Ausstrahlung M ein recht einfacher Zusammenhang:

$$M_s = \sigma \cdot T^4 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

Die abgestrahlte Leistung eines schwarzen Strahlers ist proportional zu T^4 .

Der Index s steht hier für "schwarz".

Der Proportionalitätsfaktor σ wird als **Stephan-Boltzmann-Konstante** bezeichnet.

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-10} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right] \quad (2)$$

Wir haben nun also einen Zusammenhang zwischen abgestrahlter Leistung und Temperatur eines schwarzen Körpers gefunden.

Das Messprinzip aller Pyrometer und Thermografiesysteme beruht auf diesem, einfachen Zusammenhang.

4. Schwarzer Strahler

Im vergangenen Kapitel fiel schon mehrfach der Begriff „schwarzer Strahler“ bzw. „schwarzer Körper“. Der schwarze Strahler ist ein physikalisches Idealmodell, für das die Planck'sche Strahlungsformel aus Kapitel 3 gilt. Reale Körper und Oberflächen weisen aber mehr oder weniger starke Abweichungen zu diesem Ideal auf.

Abbildung 3 veranschaulicht, wie sich die auf einen beliebigen Körper auftreffende Strahlung verhalten kann. Je nach Material- und Oberflächeneigenschaften wird der Körper einen Teil der Strahlung absorbieren, reflektieren, oder transmittieren.

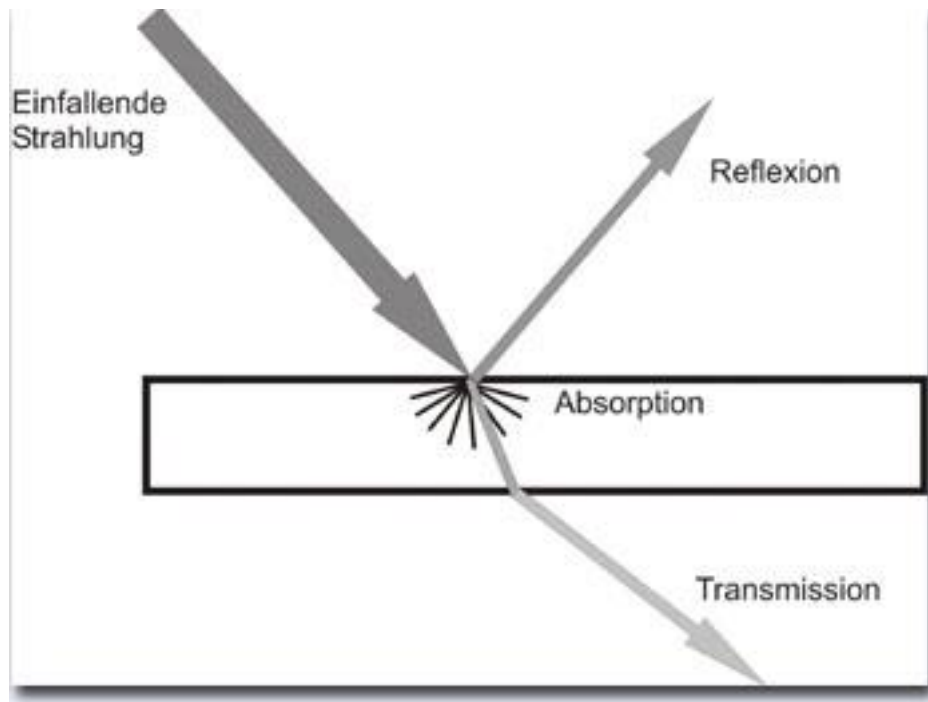


Abb. 3: Transmission, Absorption und Reflexion von Strahlung auf einen beliebigen Körper

Spricht man also vom Absorptionsgrad α eines Körpers, so ist das Verhältnis aus einfallender Strahlung M und dem Anteil der Strahlung gemeint, der vom Körper absorbiert wurde (M_α). Dieser kann Werte von 0 bis 1 annehmen.

$$\text{Absorptionsgrad } \alpha = \frac{M_\alpha}{M} \quad (3)$$

Gleiches gilt für den Reflexionsgrad ρ und den Transmissionsgrad τ :

$$\text{Reflexionsgrad } \rho = \frac{M_\rho}{M} \quad (4)$$

$$\text{Transmissionsgrad } \tau = \frac{M_\tau}{M} \quad (5)$$

Aus rein logischen Überlegungen muss die Summe aller Strahlungsanteile immer 100% ergeben. Daraus folgt:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (6)$$

Ein ideal schwarzer Strahler absorbiert 100% der auf ihn einfallenden Strahlung. Sein Absorptionsgrad ist demnach 1.

Nur für diesen, in der Natur nicht vorkommenden Körper gelten die Planck'schen Strahlungsgesetze, die einer berührungslosen Temperaturmessung zugrunde liegen.

5. Emissionsgrad ε

Dem Emissionsgrad ε kommt eine entscheidende Bedeutung bei der messtechnischen Bewertung einer Oberfläche durch ein Pyrometer und ähnlichen Messgeräten zu.

Wie bereits erwähnt sendet jeder Körper, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt, Wärmestrahlung aus. Bei einem System, das sich im thermischen Gleichgewicht befindet, gilt nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik:

$$\text{Emissionsgrad } \varepsilon = \text{Absorptionsgrad } \alpha \quad (7)$$

Man kann sich diesen, auch als Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz bekannten, Zusammenhang ganz einfach verdeutlichen, indem man sich einen Raum konstanter Temperatur mit verschiedenen Gegenständen vorstellt. Wäre $\varepsilon \neq \alpha$, dann würden sich die einzelnen Gegenstände aufgrund der einfallenden bzw. austretenden Wärmestrahlung ständig erwärmen oder abkühlen.

Für einen schwarzen Körper gilt folglich:

$$\alpha = \varepsilon = 1 \quad (8)$$

Der Emissionsgrad ε gibt an, wie viel Strahlung ein Körper im Vergleich mit einem ideal schwarzen Körper aussendet.

$$\varepsilon = \frac{M}{M_s} \quad (9)$$

Tabelle 1 zeigt die Emissionsgrade verschiedener Materialien.

Stoff	Emissionsgrad
schwarzer Körper (Theorie)	1,00
Ruß	0,95
Mauerwerk verputzt	0,93
Dachpappe	0,90
Kupfer (oxidiert)	0,60
Kupfer (poliert)	0,04
Silber (poliert)	0,02

Tab. 1: Emissionsgrade verschiedener Materialien

Besonders auffällig ist hierbei, dass Kupfer im oxidierten und polierten Zustand völlig verschiedene Emissionsgrade hat. Der Emissionsgrad ist also stark von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Er kann sich zudem auch noch über den

Wellenlängenbereich ändern (spektraler Emissionsgrad), oder variiert bei diversen Materialien stark mit der Temperatur.

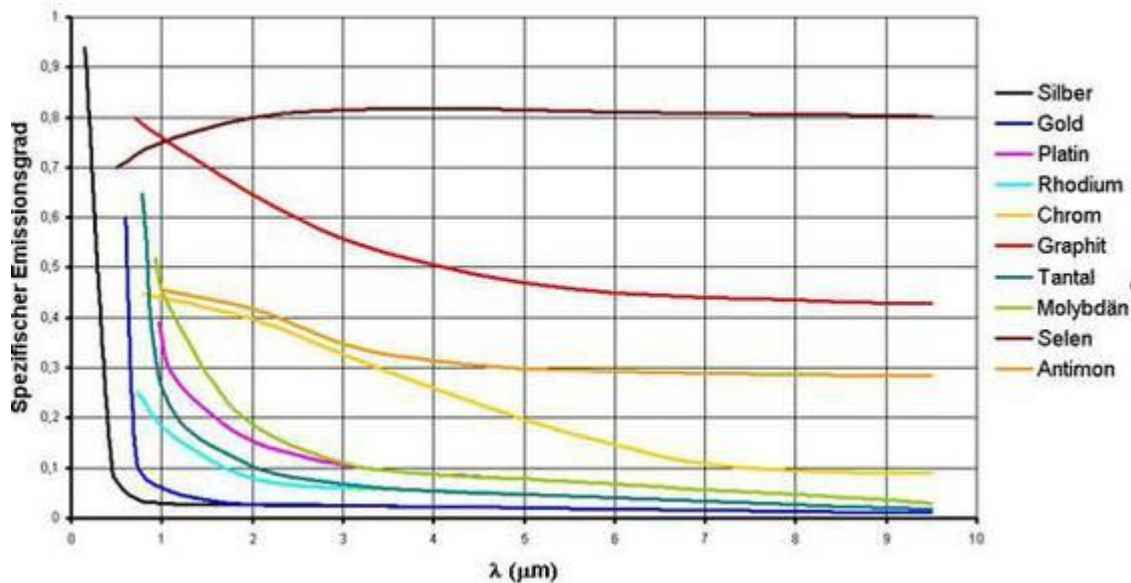


Abb. 4: spektraler Emissionsgrad verschiedener Stoffe

Der Emissionsgrad ε hat für unsere berührungslose Temperaturmessung eine entscheidende Rolle. Ist dieser nämlich von einer Oberfläche bekannt, kann man das Planck'sche Strahlungsgesetz (das gilt ja nur für den schwarzen Strahler) relativ einfach für den praktischen Gebrauch modifizieren:

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (10)$$

Über den Emissionsgrad ist es somit möglich über die spezifische Ausstrahlung einer Oberfläche die Temperatur zu bestimmen.

Daraus lässt sich jetzt schon folgern, dass die Bestimmung des Emissionsgrades eine wichtige Aufgabe in der Pyrometrie ist.

Stoffe bzw. Oberflächen mit hohem Emissionsgrad eignen sich viel besser für eine pyrometrische Temperaturmessung, als Stoffe bzw. Oberflächen mit niedrigem ε . Das liegt daran, dass die Messung eines Stoffes mit hohem ε wesentlich weniger durch Reflexion, Transmission und der Umgebungsstrahlung beeinflusst wird.

Leider lässt sich ε praktisch nicht berechnen, so dass die Bestimmung fast immer messtechnisch erfolgen muss.

6. Praktische Bestimmung des Emissionsgrades nach Buckley

Es gibt verschiedene Möglichkeiten den Emissionsgrad eines Stoffes zu bestimmen. Für ein Spektralpyrometer, welches wir in unserem Versuch verwenden, gilt allgemein folgender Zusammenhang:

$$\frac{1}{T_W} = \frac{1}{T_S} + \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln(\epsilon) \quad (11)$$

T_W bezeichnet hier die wahre Temperatur des Messobjekts und T_S die Temperatur die ein schwarzer Strahler mit der gleichen Ausstrahlung hätte.

λ bezeichnet hier die Wellenlänge, bei der das Pyrometer misst und c_2 ist ein Korrekturfaktor, der Gerätespezifisch vom Hersteller angegeben wird.

Das Spektralpyrometer ist auf einen schwarzen Strahler geeicht, d.h. die Temperatur (T_S) die das Gerät anzeigt, muss korrigiert werden. Da der Emissionsgrad des Messobjekts unter 1 liegen muss, zeigt das Pyrometer stets eine niedrigere Temperatur T_S an, als das Objekt in Wahrheit hat (T_W).

Kennt man also den Emissionsgrad eines Stoffes, ist es mit Gleichung 11 sehr einfach die wahre Temperatur eines Stoffes mit dem Pyrometer zu bestimmen.

Kennt man den Emissionsgrad nicht, kann man den Zusammenhang aus Gleichung 11 verwenden, um den Emissionsgrad zu bestimmen.

Hierfür ist es allerdings nötig, die vom Pyrometer gemessene Temperatur T_W , der Temperatur T_S gegenüberzustellen, die ein schwarzer Strahler mit der gleichen Strahldichte hätte.

Man benötigt also einen schwarzen Strahler. Wir wissen bereits, dass ein Körper dann den maximalen Grenzwert der Strahldichte ($\epsilon = 1$) aufweist, wenn er allen auf ihn fallenden Strahlungsfluss absorbiert ($\alpha = 1, \rho = 0, \tau = 0$).

Um diesen Körper nachzubilden, hat Buckley eine relativ einfache Methode entwickelt.

Mithilfe einer isotherm anzunehmenden Bohrung, die ein bestimmtes Verhältnis aus Länge L und Radius R haben muss, kann man davon ausgehen, dass die Strahlung, die von außen in die Bohrung gelangt an den Innenwänden so oft reflektiert wird, dass nichts mehr von der Strahlung aus der Bohrung hinausgelangt. Die einfallende Strahlung wird also in der Bohrung zu 100 % absorbiert, womit die Bohrung als ein schwarzer Strahler angesehen werden kann.

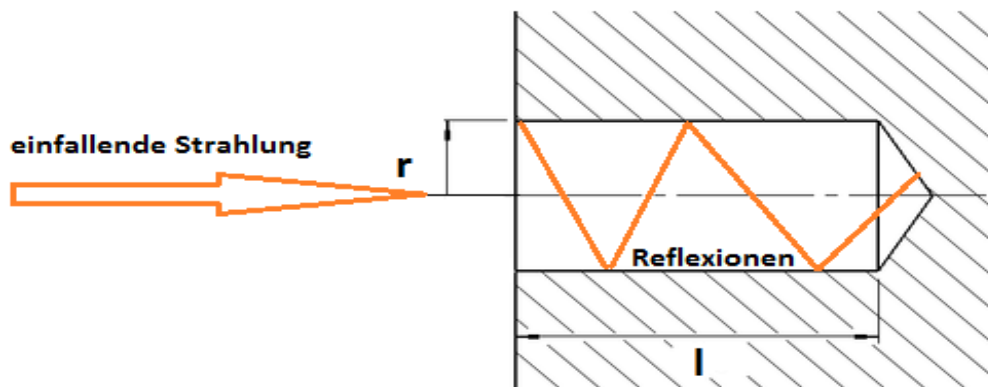


Abb. 5: Reflexionen in einer isothermen Bohrung

Entscheidend für die Nachbildung des schwarzen Strahlers nach Buckley ist das Verhältnis aus Länge und Radius der Bohrung.

Aus Abbildung 6 wird ersichtlich, dass bei einem ausreichend großem l/r Verhältnis die Bohrung unabhängig vom Material des Stoffes als schwarzer Strahler angesehen werden kann.

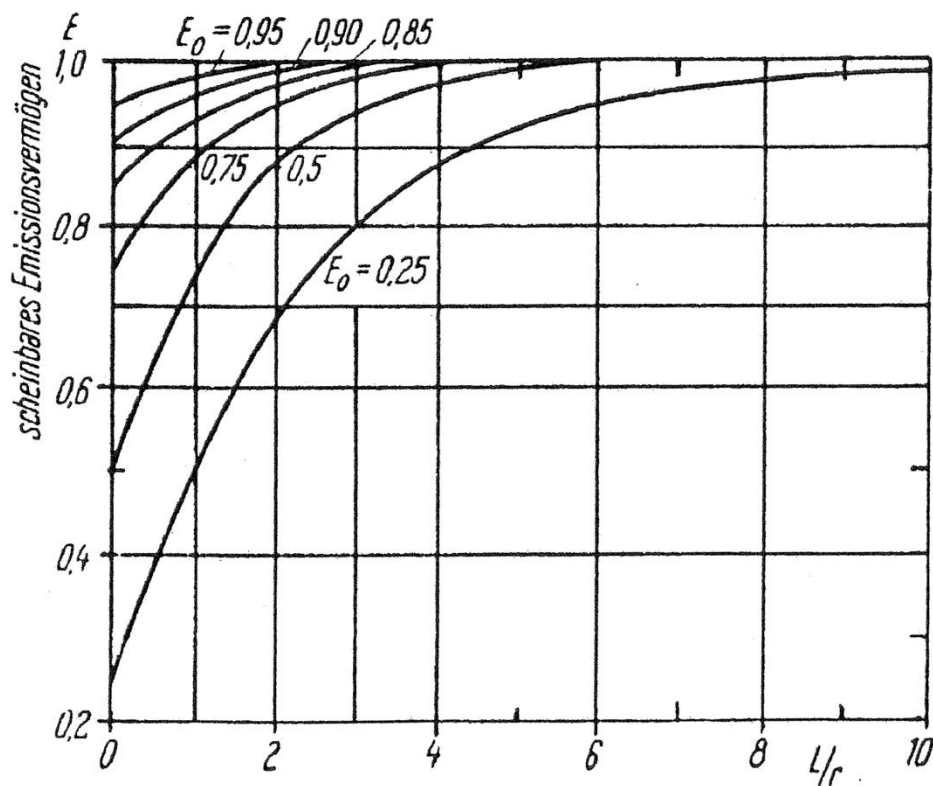


Abb. 6: Grafische Darstellung des scheinbaren Emissionsgrades ϵ isothermer Bohrungen nach Buckley als Funktion des Verhältnisses von Lochlänge l zu Lochradius r . Als Parameter ist der Emissionsgrad ϵ_0 des Materials gegeben ($\epsilon_0 = \epsilon_0$)

7. Aufbau und Funktionsweise des Pyrometers

7.1 Strahlungsempfänger - Detektoren

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Pyrometer auf dem Markt. Herzstück eines jeden Pyrometers ist der Detektor. Er wandelt die einfallende Strahlung in ein, der auftreffenden Leistung proportionales Signal um. Der Empfänger bewertet die Bestrahlungsstärke M . Die Detektoreigenschaft bestimmt vorrangig die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems eines Pyrometeraufbaus. Generell kann man zwischen zwei verschiedenen Strahlungsempfängern unterscheiden:

Thermische Strahlungsempfänger

Bei den thermischen Detektoren erfolgt der Strahlungsnachweis durch Erwärmung des ganzen Sensorelements. Der Vorteil dieser Sensoren liegt darin, dass es durch geeignete Schwärzung der Absorberfläche möglich ist, für einen weiten Wellenlängenbereich eine gleichmäßige Empfindlichkeit zu erreichen. Somit kann man durch eine gezielte Auswahl an Filtermaterialien den spektralen Empfindlichkeitsbereich sehr genau festlegen. Thermische Detektoren haben allerdings eine sehr geringe Ansprechgeschwindigkeit und Empfindlichkeit. Sie kommen daher praktisch nur bei Pyrometern zum Einsatz- für Thermografiesysteme sind sie zu träge.

Fotoelektrische Strahlungsempfänger

Fotoelektrische Detektoren (auch Quantendetektoren genannt) führen den Strahlungsnachweis durch eine Freisetzung von Ladungsträgern durch absorbierte Lichtquanten durch. Man verwendet sowohl Photoleiter als auch Photodioden aus dem gleichen Halbleitermaterial. Je nach verwendetem Detektor erzeugt die einfallende Strahlung dann entweder ein höheres Energieniveau der Elektronen (innerer Fotoeffekt), oder ein Austreten der Elektronen aus dem Kristallverbund (äußerer Fotoeffekt).

Quantendetektoren unterscheiden sich von thermischen Detektoren anhand ihrer spektralen Empfindlichkeit. Sie lassen sich nicht einfach auf bestimmte Wellenlängenbereich anpassen. Da die meisten Quantendetektoren zudem noch bei steigenden Temperaturen an Sensitivität verlieren, ist eine Kühlung für ein präzises Arbeiten oft erforderlich. Daher sind Systeme mit Quantendetektoren i.d.R. teurer als Systeme mit thermischen Detektoren. Durch die hohe Ansprechgeschwindigkeit und die gute Detektivität sind sie aber Standard in allen Thermografiesystemen.

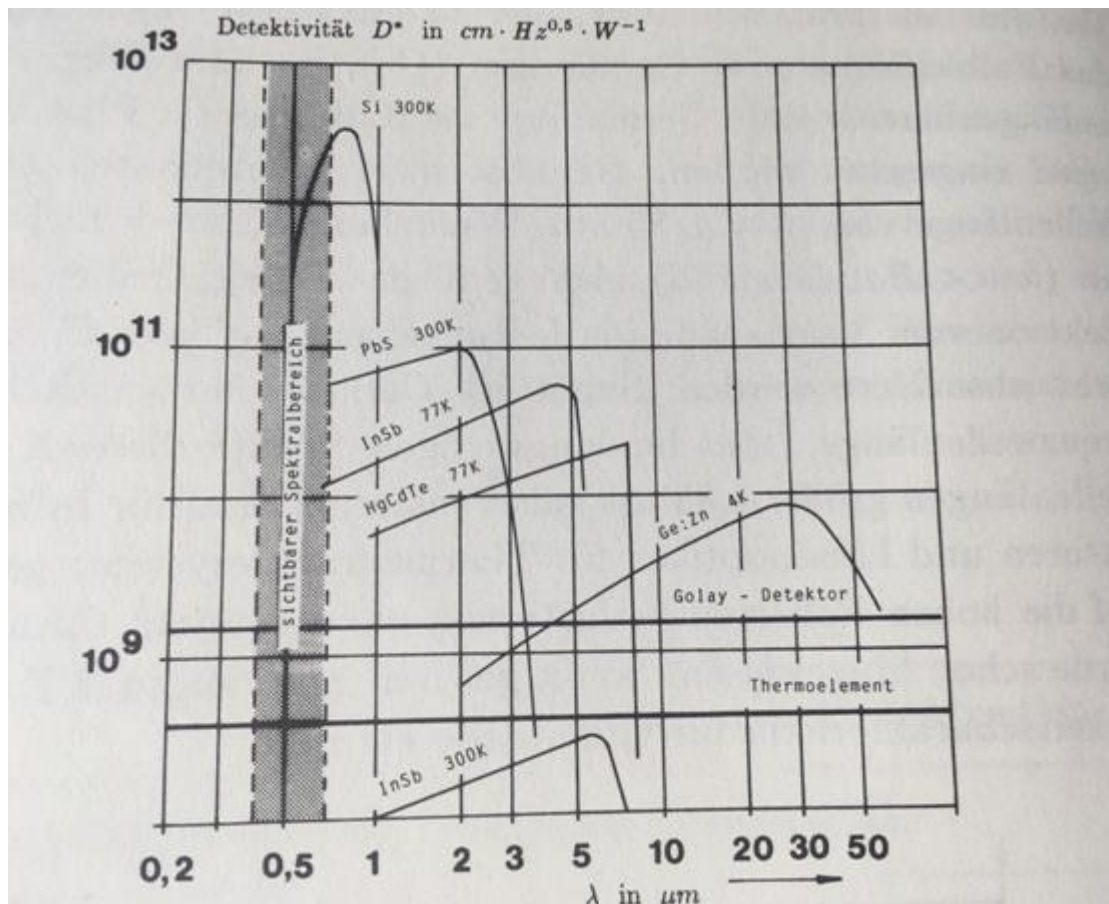


Abb.7: Detektivität verschiedener Quantendetektoren im Vergleich zum Thermoelement

7.2 Klassifizierung nach Bauarten

7.2.1 Gesamtstrahlungspyrometer

Ein Gesamtstrahlungspyrometer hat einen Empfänger, der fähig ist, die auf ihn fallende Strahlung aller Wellenlängen möglichst vollkommen zu absorbieren und die dabei auftretende Erwärmung zu messen. Als Strahlungsempfänger kommen hier also überwiegend geschwärzte Thermolemente zum Einsatz. Gesamtstrahlungspyrometer eignen sich besonders für sehr niedrige Objekttemperaturen. Die Strahlung des Messobjekts hat hier nach dem Planck'schen Strahlungsspektrum ihr Maximum im fernen Infrarot. Quantendetektoren, die diesen Spektralbereich abdecken sind wegen der erforderlichen Kühlung i.d.R. zu teuer.

7.2.2 Teilstrahlungspyrometer

Bei Materialien mit niedrigem Emissionsgrad (z.B. Metalle) macht es Sinn, die einfallende Strahlung nur auf einem bestimmten Wellenlängenbereich zu messen. Die Fehleranfälligkeit der Messung durch Störstrahlung wird so minimiert. Teilstrahlungspyrometer arbeiten i.d.R. mit Quantendetektoren und können zudem mit Filtern gezielt auf einen Wellenlängenbereich

eingestellt werden. Extrem schmalbandige Pyrometer werden auch als Spektralpyrometer bezeichnet.

7.2.3 Glühfadenpyrometer

Für glühende Messobjekte hat sich noch eine dritte Art an Pyrometern durchgesetzt. Das Glühfadenpyrometer hat in der Praxis einen hohen Verbreitungsgrad, fällt allerdings aufgrund seiner physikalischen Wirkungsweise aus dem bisher gezeigten Schema. Es bewertet durch Farbintensitätsvergleich direkt die Strahldichte einer Oberfläche. Es nutzt die Tatsache, dass die Leuchtdichte einer selbst strahlenden Fläche proportional zur Strahldichte und damit proportional zur Temperatur ist.

Ein selbst leuchtendes Messobjekt ($T > 650^{\circ}\text{C}$) wird also mit dem Glühfadenpyrometer anvisiert. Im Strahlengang ist eine kalibrierte Lampe mit Glühfaden. Über die Stromstärke, die die Lampe durchfließt, kann man die Helligkeit des Glühfadens einstellen. Man stellt die Intensität des Glühfadens so ein, dass dieser vor dem Hintergrund der strahlenden Oberfläche verschwindet, d.h. dass Glühfaden und Messobjekt genau die gleiche Farbe haben. Über die Stromstärke ist das Pyrometer dann auf die Temperaturskala geeicht.

7.3 Strahlenbündelung

Um anhand der spezifischen Ausstrahlung M auf die Temperatur eines Messobjektes schließen zu können, benötigen alle Pyrometerarten eine Strahlenbündelung.

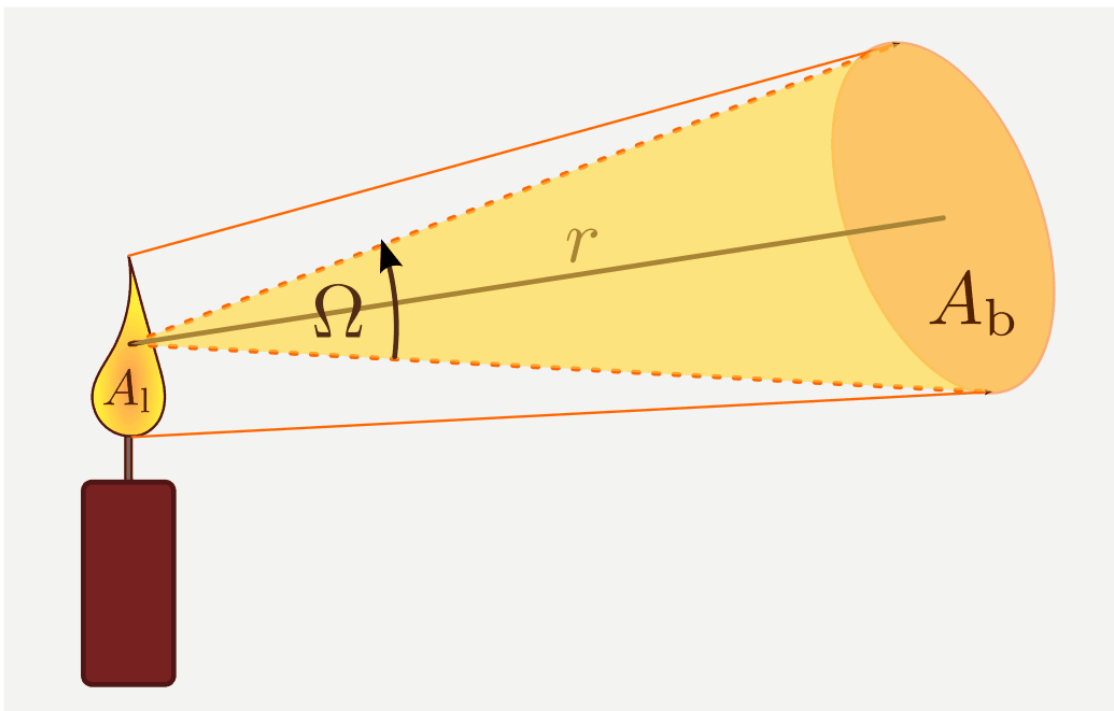


Abb. 7: strahlende Kerze

Abbildung 7 verdeutlicht die Problematik: Der Strahler, hier die Flamme einer Kerze mit der Fläche A_1 , strahlt auf die Fläche A_2 . Misst man mit einem Pyrometer die spezifische Ausstrahlung M auf der Fläche A_2 , so kann man mit diesem Ergebnis noch nicht darauf schließen, wie hoch die spezifische Ausstrahlung auf der Fläche A_1 , sprich auf dem Messobjekt ist. Bei der Messung wird ja nicht die gesamte, über den Halbraum 2π abgestrahlte Leistung erfasst. Das Messgerät erfasst ja nur einen kleinen Raumwinkel Ω .

Über den Raumwinkel Ω lässt sich allerdings eine Beziehung zwischen dem Messobjekt und der bestrahlten Fläche erstellen.

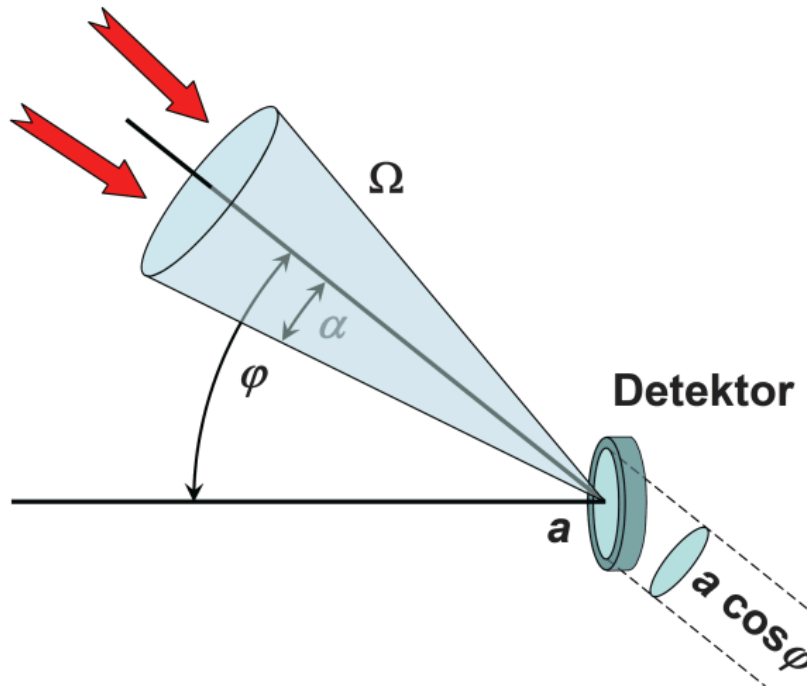


Abb. 8: Ermittlung der Strahldichte eines Körpers mithilfe des Raumwinkels Ω

Die Strahldichte L legt fest, welcher Anteil der spezifischen Ausstrahlung M in den Raumwinkel Ω unter dem Winkel Φ zur Flächennormalen ausgestrahlt wird.

$$L = \frac{M}{\Omega \cdot \cos \Phi} \left[\frac{W}{m^2 sr} \right] \quad (12)$$

Die Einheit des Raumwinkels Ω ist der Steradian. Auf einer Kugel mit 1m Radius umschließt ein Steradian eine Fläche von $1m^2$ auf der Kugeloberfläche.

Zur Definition des Raumwinkels Ω , sowie zur Reduktion von Störstrahlung ist es daher nötig das Messfeld der Pyrometer mit Linsen, Blenden oder Spiegeln zu begrenzen.

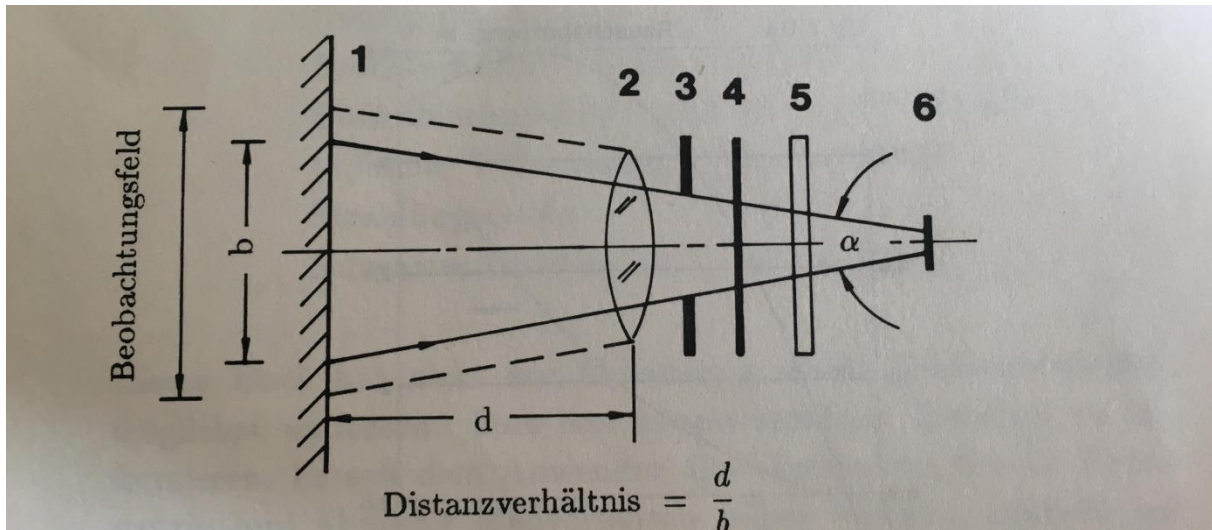


Abb. 9. schematischer Aufbau eines Pyrometers

1- Messobjekt 2- Linse zur Strahlenbündelung 3- Eintrittsblende (bestimmt den Raumwinkel unter dem der Sensor Strahlung sieht 4- Chopper (optional) 5- Filter 6- Sensor

8. Versuchsdurchführung

Folgende Aufgaben werden am Versuchstag zusammen mit dem Versuchsbetreuer abgearbeitet:

1. Bestimmung der Temperaturverteilung im Heizleiter

Mit dem Mikropyrometer (Spektralpyrometer, $\lambda_0 = 650\text{nm}$) ist die schwarze Temperaturverteilung (T_s) an einem stabförmigen, senkrecht angeordneten Temperaturstrahler (Material: MoSi_2) zu bestimmen.

Wie sieht der Verlauf in der Theorie aus?

2. Bestimmung des spektralen Emissionsgrades

Mit Hilfe einer isotherm anzunehmenden Bohrung ($l/r = 6$) in der Mitte des stabförmigen Strahlers ist der spektrale Emissionsgrad bei der Wellenlänge des Pyrometers zu bestimmen. Wie ändert sich dieser mit der Temperatur?

Welche Voraussetzung erfordert die hier benutzte Methode nach Buckley und sind diese im vorliegenden Fall erfüllt?

Erstellen Sie eine Grafik $\varepsilon = f(T_s)$ und ermitteln Sie damit die wahren Temperaturen T_w des Heizleiters aus Versuchsteil 1.

3. Elektrische Leistungsumsetzung

Es ist an einer Stelle des Temperaturstrahlers die Temperatur T_w als Funktion der eingespeisten elektrischen Leistung zu bestimmen. Wie muss dieser Verlauf theoretisch sein, wenn der Wärmeübergang durch Strahlung überwiegt? Stellen Sie den theoretischen und den gemessenen (ca. 4-5 Messpunkte) Verlauf graphisch dar und diskutieren Sie das Ergebnis.

4. Statische Messungen mit dem KT 12

Zur Untersuchung des Einflusses des Emissionsgrades ε auf die Temperaturmessung, sowie zur Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit) auf den Emissionsgrad, sind an einem isotherm beheiztem Aluminiumwürfel die Emissionsgrade der vier verschiedene oberflächenbehandelten, senkrechten Würfelflächen zu bestimmen. Die wahre Temperatur T_w des Würfels lässt sich dabei mit einem eingebauten Widerstandsthermometer an einer digitalen Anzeigeeinheit ablesen.

5. Versuchsmessungen mit einer Wärmebildkamera

Nehmen Sie mit der vorliegenden Wärmebildkamera verschiedene Objekte im Raum auf und diskutieren Sie die Ergebnisse zusammen mit dem Betreuer.