

21. Energieverteilung im Spektrum - Energy Distribution in the Spectrum

1 Grundlagen: Gesetze der Temperaturstrahlung

1.1 Das Kirchhoffsche Gesetz

Jeder Körper, der eine endliche absolute Temperatur T besitzt, strahlt in den ihn umgebenden Raum Energie aus. Die ausgesandte Strahlung bezeichnet man als *Temperaturstrahlung*. Sie umfasst grundsätzlich das gesamte Spektrum der elektromagnetischen Strahlung, d.h. sie enthält sämtliche *Frequenzen* ν bzw. *Wellenlängen* λ von 0 bis ∞ (das sichtbare Licht beansprucht bekanntlich nur ein relativ sehr schmales Intervall ($400\text{nm} < \lambda < 700\text{nm}$) des gesamten elektromagnetischen Spektrums). Die *Verteilung* der Energie auf die verschiedenen Wellenlängengebiete ist jedoch nicht gleichmässig, sondern hängt von der *Temperatur* und den *physikalischen Eigenschaften* des strahlenden Körpers ab. Die Gesetze der Temperaturstrahlung sind von Kirchhoff (1860), Stefan (1878), Boltzmann (1884), Wien (1893) und Planck (1900) theoretisch und experimentell weitgehend abgeklärt worden.

Folgende Begriffe sind für das Verständnis notwendig. Wenn $E(\lambda, T) d\lambda d\Omega dF$ die Leistung darstellt, welche ein Flächenelement dF eines Körpers, im Wellenlängenintervall zwischen λ und $\lambda + d\lambda$, senkrecht zu dF , in das Raumwinkelelement $d\Omega$ abstrahlt, so bezeichnet man $E(\lambda, T)$ als dessen *spektrales Emissionsvermögen*. Empfängt der Körper bei derselben Temperatur T Strahlung derselben Wellenlänge λ , so wird er einen Bruchteil $A(\lambda, T)$ der eingestrahnten Energie *absorbieren* und den Bruchteil $R(\lambda, T) = 1 - A(\lambda, T)$ *reflektieren*. Die *dimensionslosen* Grössen $A(\lambda, T)$ bzw. $R(\lambda, T)$ nennt man *Absorptions-* bzw. *Reflexionsvermögen*. Sie hängen im allgemeinen wieder von λ , T und den Materialeigenschaften des Körpers ab. Zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen besteht nun der fundamentale Zusammenhang:

$$E(\lambda, T) = A(\lambda, T) K(\lambda, T) \quad \text{Kirchhoff-Gesetz} \quad (1)$$

Darin ist $K(\lambda, T)$ eine *universelle*, d.h. von den Materialeigenschaften *unabhängige* Funktion von λ und T . Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz folgt aus dem II. Hauptsatz der Thermodynamik (Entropieprinzip). Wäre das Kirchhoffsche Gesetz nicht erfüllt, so liesse sich eine Einrichtung erfinden, bei der durch Strahlungsaustausch von zwei ursprünglich gleich warmen Körpern der eine sich fortwährend abkühlen und der andere erwärmen müsste. Charakteristisch für die Temperaturstrahlung eines Körpers ist somit die Wellenlängen- und Temperaturabhängigkeit seines Absorptionsvermögens $A(\lambda, T)$. Man unterscheidet folgende Fälle:

1 Basics: Laws of thermal radiation

1.1 The Kirchhoff's Law

Each body having a finite absolute temperature T radiates energy in its surrounding area. One refers to the emitted radiation as *Thermal Radiation*. It basically emits in the whole spectrum of the electromagnetic radiation, i.e., it contains all the *frequencies* ν respectively. *Wavelengths* λ from 0 to ∞ (the so-called visible light covers only a relatively small interval ($400\text{nm} < \lambda < 700\text{nm}$) throughout electromagnetic spectra). However, the distribution of energy to the various wavelength regions is not uniform, but depends on the temperature and the physical properties of the radiating body. The laws of thermal radiation have been largely clarified theoretically and experimentally by Kirchhoff (1860), Stefan (1878), Boltzmann (1884), Wien (1893) and Planck (1900).

Following terms are necessary for understanding. If $E(\lambda, T) d\lambda d\Omega dF$ represents the power, which is radiated from a surface element dF of a body, in a wavelength interval between λ and $\lambda + d\lambda$, perpendicular to dF , in the solid angle element $d\Omega$, so we refer to $E(\lambda, T)$ as its *spectral emissivity*. The body receives emission from temperature T at the same wavelength λ , so it absorbs a fraction of the incoming energy $A(\lambda, T)$ and reflects the fraction $R(\lambda, T) = 1 - A(\lambda, T)$. The *dimensionless* quantity $A(\lambda, T)$ and $R(\lambda, T)$ are respectively called *absorption* and *reflection* power. They generally depend from λ , T and the material properties of the body. A fundamental relationship exists between the emissivity and the absorptivity:

$$E(\lambda, T) = A(\lambda, T) K(\lambda, T) \quad \text{Kirchhoff law} \quad (1)$$

Thus $K(\lambda, T)$ is *universal*, i.e. a function of λ and T independent from the material. Kirchhoff's radiation law follows from the second law of thermodynamics (entropy). If the Kirchhoff's law was not valid, one could design an experiment, where the temperature of one body out of two bodies originally at the same temperature would increase, the other decrease, due to radiative heat transfer. Characteristics of the thermal radiation of a body is thus the wavelength and temperature dependence of its absorption capability $A(\lambda, T)$. The following cases are distinguished:

1.1.1 $A(\lambda, T) = 1$

The absorption capacity is independent of λ and T and is equal to 1. This means that radiation of any

1.1.1 $A(\lambda, T) = 1$

Das Absorptionsvermögen ist unabhängig von λ und T und hat den Wert 1. Dies bedeutet, dass Strahlung jeder Wellenlänge vollständig absorbiert wird, und dass das Emissionsvermögen gleich der universalen Funktion $K(\lambda, T)$ ist. Einen so charakterisierten Körper bezeichnet man als *schwarzen Strahler* und die von ihm ausgesandte Strahlung als *schwarze Strahlung*. Es ist daher:

$$E_s(\lambda, T) = K(\lambda, T) \quad (2)$$

Ein ideal schwarzer Strahler existiert in der Natur nicht, er kann jedoch praktisch angenähert durch einen Hohlraum (Hohlraum-Strahlung) oder einen sorgfältig berussten Körper realisiert werden.

1.1.2 $A(\lambda, T) = \text{const.} < 1$

Das Absorptionsvermögen ist kleiner als 1, aber unabhängig von λ und T . Diese Eigenschaft zeichnet den sog. *grauen Strahler* aus; angenähert sind es die Metalle.

1.1.3 $A(\lambda, T)$

ist eine im allgemeinen komplizierte, von der Struktur des Körpers abhängige Funktion von λ und T : *Selektiv-Strahler*. Praktisch sind dazu alle nichtmetallischen Elemente und Verbindungen zu zählen.

wavelength is completely absorbed, and that the emissivity is equal to the universal function $K(\lambda, T)$. A body with these properties is referred as "black body" and the radiation emitted from it as "black body radiation". Therefore:

$$E_s(\lambda, T) = K(\lambda, T) \quad (2)$$

An ideal black body radiation does not exist in nature. However, it can be practically approximated realized through a cavity (cavity radiation) or a carefully sooted body.

1.1.2 $A(\lambda, T) = \text{const.} < 1$

The absorption capacity is less than 1, but independent from λ and T . This property distinguishes the so-called gray radiator. It approximates the metals.

1.1.3 $A(\lambda, T)$

is a generally complex function of λ and T and dependent on the structure of the body called "Selective Radiation". It includes virtually all non-metallic elements and compounds.

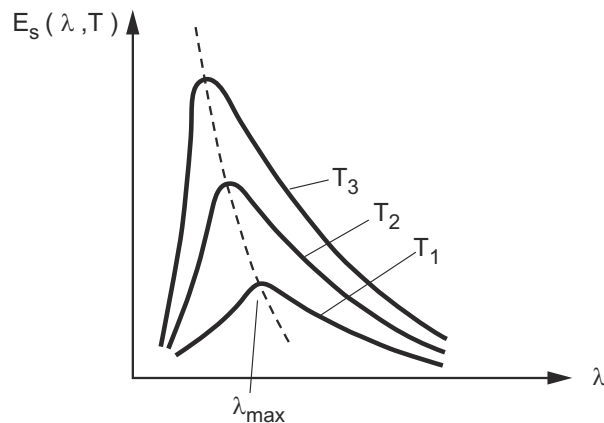


Fig. 1: Planck's radiation law.

1.2 Das Plancksche Strahlungsgesetz

Die Gesetze der *schwarzen Strahlung* sind für die Entwicklung der modernen Physik von entscheidender Bedeutung gewesen. Das experimentell beobachtete Emissionsvermögen $E_s(\lambda, T)$ des schwarzen Strahlers konnte auf der Grundlage der klassischen Physik (bis ca. 1900) nicht erklärt werden. Planck gelang es (1900), eine Funktion $E_s(\lambda, T) d\lambda$ bzw. $K(\lambda, T) d\lambda$ herzuleiten, die im Einklang mit dem Experiment steht. Für die Herleitung seiner Formel musste Planck allerdings die revolutionierende Annahme machen,

1.2 The Planck's radiation law

The laws of black body radiation have been crucial for the development of modern physics. The experimentally observed emission power $E_s(\lambda, T)$ of the black body radiation could not be explained by the classical physics (about 1900). Planck (1900) could derive a function $E_s(\lambda, T) d\lambda$ and respectively $K(\lambda, T) d\lambda$, which was consistent with the experiment. For the derivation of his formula, however, Planck had to make the revolutionary assumption that the radiant energy is not continuous, but quantified. These

dass sich die Strahlungsenergie nicht kontinuierlich, sondern nur *quantenweise* umsetzen kann. Diese sog. Quantenhypothese führte später zur *Wellenmechanik* und hat damit unzählige experimentelle Bestätigungen gefunden. Die Plancksche Strahlungsformel lautet für *unpolarisierte* Strahlung:

$$E_s(\lambda, T) d\lambda = K(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1} \quad (3)$$

In Formel (3) bedeuten:

$$\begin{aligned} h &= 6,626 \times 10^{-34} \text{Js (Plancksche Konstante)} \\ k &= 1,381 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1} \text{ (Boltzmann Konstante)} \\ c &= 2,998 \times 10^8 \text{ms}^{-1} \text{ Lichtgeschwindigkeit} \\ T &= \text{absolute Temperatur} \end{aligned}$$

Die Plancksche Funktion hat etwa den in Fig. 1 dargestellten Verlauf für verschiedene Temperaturen $T_3 > T_2 > T_1$.

1.3 Das Wiensche Verschiebungsgesetz

Das Emissionsvermögen E_s des schwarzen Strahlers zeigt für eine ganz bestimmte Wellenlänge λ_{\max} ein Maximum, dessen Lage man durch Differenzieren der Funktion $E_s(\lambda, T)$ nach λ findet. Es ergibt sich

$$\begin{aligned} \frac{dE_s(\lambda, T)}{d\lambda} &= -\frac{10\pi h c^2}{\lambda^6 (e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1)} \\ &+ \frac{2\pi h c^2 e^{\frac{hc}{\lambda k T}}}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1)^2} \frac{hc}{\lambda^2 k T} \\ &= 0 \end{aligned}$$

oder nach Kürzen mit gemeinsamen Faktoren und mit der Substitution $x = \frac{hc}{\lambda_{\max} k T}$:

$$5(e^x - 1) = x e^x$$

Diese transzendente Gleichung liefert für x den Wert $x = 4,965$, d.h.: $\lambda_{\max} = \frac{hc}{4,965 k T}$ oder

$$\lambda_{\max} T = 2,90 \times 10^{-3} \text{mK} \quad (4)$$

Wiensches Verschiebungsgesetz

Dieses Gesetz ist von Wien (auf Grund experimenteller Untersuchungen) schon vor Planck aufgestellt worden; es ist auch für graue Strahler gültig. Mit steigender Temperatur verschiebt sich also die Stelle maximaler Emission nach kleineren Wellenlängen.

1.4 Optische Temperaturmessung

Die schwarze Strahlung und ihre Gesetze finden in der Messung hoher Temperaturen, etwa oberhalb 600, eine wichtige Anwendung. Über 2600 ist man überhaupt allein auf optische Temperaturmessung angewiesen. Sie bietet überdies den Vorteil, dass *kein* unmittelbarer Kontakt mit Wärmeaustausch erforderlich ist, um die Temperatur eines Körpers zu messen.

so-called "quantum hypothesis" later led to wave mechanics and has thus found numerous experimental confirmations.

Planck's formula for unpolarized radiation is:

$$E_s(\lambda, T) d\lambda = K(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1} \quad (3)$$

In formula (3) it means:

$$\begin{aligned} h &= 6,626 \times 10^{-34} \text{Js (Planck const)} \\ k &= 1,381 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1} \text{ (Boltzmann constant)} \\ c &= 2,998 \times 10^8 \text{ms}^{-1} \text{ speed of light} \\ T &= \text{absolute temperature} \end{aligned}$$

The Planck's function has approximately the trend shown in Fig. 1 for different temperatures $T_3 > T_2 > T_1$.

1.3 The Wien's displacement law

The emission power E_s of the black body radiation has a maximum for a very specific wavelength λ_{\max} , whose position can be found by differentiating the function $E_s(\lambda, T)$ for λ . Therefore you have

$$\begin{aligned} \frac{dE_s(\lambda, T)}{d\lambda} &= -\frac{10\pi h c^2}{\lambda^6 (e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1)} \\ &+ \frac{2\pi h c^2 e^{\frac{hc}{\lambda k T}}}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1)^2} \frac{hc}{\lambda^2 k T} \\ &= 0 \end{aligned}$$

or by shortening with common factors and the substitution $x = \frac{hc}{\lambda_{\max} k T}$:

$$5(e^x - 1) = x e^x$$

This transcendental equation for x delivers the value $x = 4,965$, d.h.: $\lambda_{\max} = \frac{hc}{4,965 k T}$ or

$$\lambda_{\max} T = 2,90 \times 10^{-3} \text{mK} \quad (4)$$

Wien's displacement law

This law has been prepared from Wien (due to experimental studies) before Planck; it is also valid for gray emitters. With increasing temperatures, the maximum of emission shifts towards smaller wavelengths.

1.4 Optical temperature measurement

The black-body radiation and its laws find an important application in the measurement of high temperatures, such as above 600 C. At about 2600 C, one has always to rely on optical temperature measurement. It further offers the advantage that no direct contact with heat exchange is required in order to measure the temperature of a body. So these laws

So haben es diese Gesetze ermöglicht, z.B. die Temperatur der Sonnenoberfläche ($\lambda_{\max} = 480 \text{ nm}$, also $T = 6000 \text{ K}$) oder heißer Fixsterne (β - Centauri : $T = 21000 \text{ K}$) zu bestimmen. (Vgl. auch Anleitung 22. «Strahlungs-Pyrometrie»). Dabei muss allerdings vorausgesetzt werden, dass man es mit grauen Strahlern zu tun hat.

2 Aufgaben

1. Durch Ausmessen des Linienspektrums einer Hg-Dampflampe wird die Genauigkeit der Eichkurve des Spektrometers überprüft. Die Wellenlängen der einzelnen Hg-Linien sind genau bekannt und auf dem Versuchsblatt angegeben.
2. Es soll die spektrale Energieverteilung $E(\lambda)$ einer Halogenlampe für 3 verschiedene Temperaturen gemessen und graphisch dargestellt werden. Dabei beobachtet man das Wiensche Verschiebungsgesetz. Aus den Wellenlängen der Energiemaxima sollen die Temperaturen des Glühpunktes bestimmt werden, unter der weitgehend erfüllten Voraussetzung, dass die Halogenlampe ein grauer Strahler sei.

3 Apparatur und Durchführung der Versuche

Um die Lichtintensität als Funktion der Wellenlänge zu messen, bedient man sich hier eines 1-Prismen-Spektrometers mit einem kommerziell erhältlichen Strahlenfluss Messgerät (siehe Anhang). Durch das Prisma wird das Licht einer bestimmten Wellenlänge in eine bestimmte Richtung abgelenkt, und mit dem Flux-Meter misst man nun die Lichtintensität als Funktion des Ablenkswinkels. Den Zusammenhang zwischen Ablenkswinkel und Wellenlänge entnimmt man einer dem Versuch beigegebenen Eichkurve.

3.1 Prismenspektrometer

3.1.1 Lichtweg

Das Licht der Lampe soll durch einen Kondensor, der mit einer Blende versehen ist, auf einen vertikalen Spalt fokussiert werden, welcher als sekundäre, geometrisch definierte Lichtquelle dient. Eine zwischen Spalt und Prisma angebrachte Linse 1 hat zu bewirken, dass das Licht als genau paralleles Bündel auf das Prisma fällt. Dies erreicht man, indem man mit einem Handspiegel den Strahl zwischen Linse 1 und Prisma ausblendet und den Spalt an einer möglichst weit entfernten ($\sim \infty$) Wand scharf abbildet. Zwischen Linse 1 und Prisma befindet sich ein Schieber, welcher dazu dient, den Lichtweg während des Nullabgleichs des Flussmeters zu unterbrechen. Das zu einer Wellenlänge λ gehörende Licht verlässt das Prisma als paralleles Bündel und muss durch Linse 2

allowed, for example, to determine the temperature of the solar surface ($\lambda_{\max} = 480 \text{ nm}$, or $T = 6000 \text{ K}$) or hotter stars (β - Centauri : $T = 21000 \text{ K}$). (See also manual 22 "Pyrometry"). However, it must be assumed that one is dealing with gray bodies.

2 Tasks

1. By measuring the line spectrum of a mercury vapor lamp, the accuracy of the calibration curve of the spectrometer is checked. The wavelengths of the individual Hg lines are accurately known and indicated on the test sheet.
2. Measure and plot the spectral energy distribution of a halogen lamp at 3 different temperatures. The Wien's displacement law is observed. Determine the temperatures of the glowing point from the wavelengths of the energy maxima, which to a large extent fulfill the condition that the halogen lamp is a gray emitter.

3 Apparatus and carry out the experiments

In order to measure the light intensity as a function of wavelength, here one uses a 1-prism spectrometer with a commercially available radiation flow measurement device (see appendix). The prism deflects the light of a certain wavelength in a certain direction, and the fluxmeter measures the light intensity as a function of the deflection angle. The relationship between wavelength and deflection angle is obtained from a calibration curve attached to the experiment.

3.1 Prism spectrometer

3.1.1 Light path

The light of the lamp is focused by a condenser, to an aperture on vertical slit, which serves as a secondary, geometrically defined light source. A lens 1 mounted between the slit and the prism causes the light to fall onto the prism as an exactly parallel bundle. This is achieved by sending the beam to a distant wall, using a hand mirror inserted between lens 1 and the prism, and making the image of the slit as sharp as possible. Between lens 1 and the prism there is a slider, which is used to interrupt the light path during the zero adjustment of the fluxmeter. The light belonging to one wavelength λ leaves the prism as a parallel bundle and must be focused by a lens 2 on the entrance slit of the detector. This is achieved by a clearly visible line of the Hg spectrum immediately adjacent to

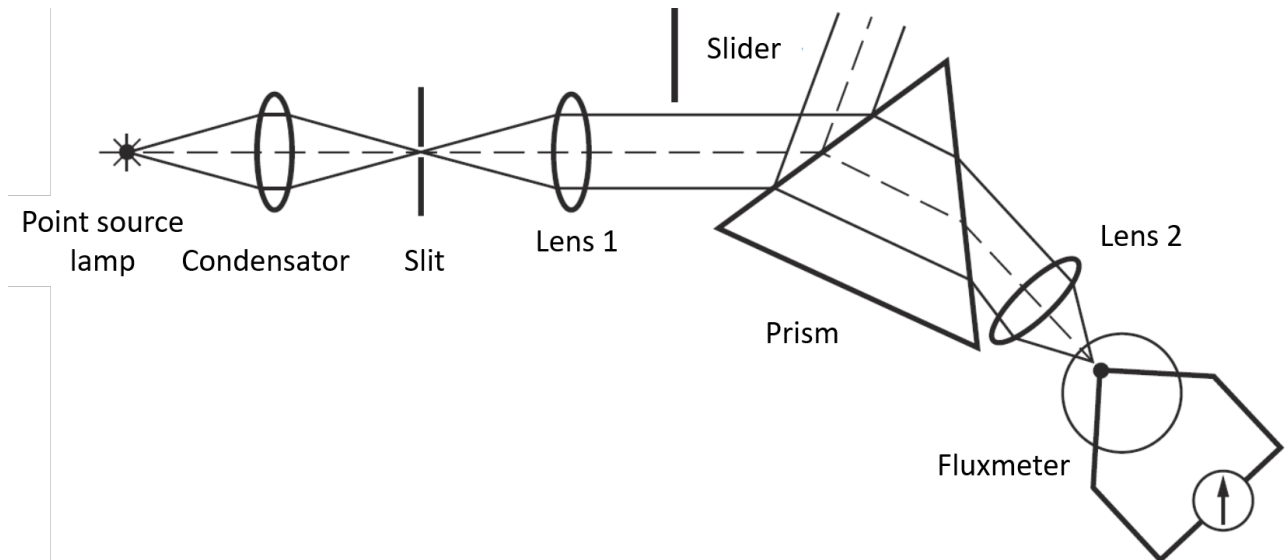


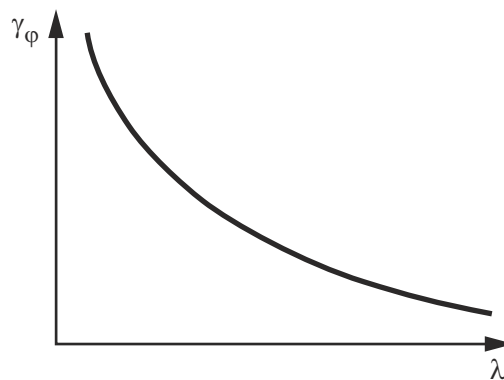
Fig. 2: Prismaspektrometer / Prism spectrometer

auf den Eintrittsspalt des Detektors fokussiert werden. Dies erreicht man, indem man eine gut sichtbare Linie des Hg-Spektrums unmittelbar neben dem Eintrittsspalt scharf abbildet, allein durch Verschieben der Linse 2 (Linse 1 darf nicht mehr verschoben werden). Durch gute Fokussierung auf einen engen Eintrittsspalt erreicht man, dass nur ein sehr schmaler Bereich von Wellenlängen $\Delta\lambda$ in den Detektor gelangt.

Linse 2 und Fluxmeter sind auf dem beweglichen Arm eines Goniometers montiert, sodass sie durch das ganze Spektrum hindurchgeführt werden können. Die Stellung des Goniometers kann an einem Teilkreis mit Hilfe eines Nonius abgelesen werden.

the entrance slit, simply by moving the lens 2 (lens 1 may no longer be moved). By good focusing on a narrow entrance slit means that only a very narrow range of wavelengths $\Delta\lambda$ reaches the detector.

Lens 2 and the fluxmeter are mounted on the moveable arm of a goniometer, so they can be passed through the entire spectrum. The position of the goniometer can be read on a pitch circle by a vernier.

Fig. 3: $\gamma_\varphi = f(\lambda)$.

3.1.2 Justierung des Prismas

Der Ablenkwinkel γ eines Lichtstrahles ist für ein bestimmtes Prisma eine Funktion des Einfallswinkels φ und der Wellenlänge λ des Strahls

$$\gamma = f(\varphi, \lambda).$$

3.1.2 Adjustment of the prism

The deflection angle γ of a light beam for a given prism is a function of the incident angle φ and of the wavelength λ of the beam:

$$\gamma = f(\varphi, \lambda).$$

Ist das Prisma in einer bestimmten Stellung fixiert, so ist φ für die parallel einfallenden Strahlen aller Wellenlängen konstant und somit γ nur noch eine Funktion von λ (Fig. 3):

$$\gamma_\varphi = f(\lambda).$$

Die Kenntnis dieser Funktion bildet die Grundlage für die Ausmessung der spektralen Energieverteilung. Sie wird am einfachsten mit Hilfe eines bekannten Linienspektrums bestimmt. Um diese langwierige Arbeit zu ersparen, ist dem Versuch diese Funktion graphisch als *Eichkurve* beigegeben.

Sie ist für diejenige Stellung des Prismas gültig, welche der *minimalen Ablenkung der gelben Hg-Linien* entspricht ($\bar{\lambda} = 578 \text{ nm}$). Das Prisma muss somit vor Beginn der Messung genau in diese Stellung gebracht werden. In Fig. 5 ist die Abhängigkeit des Ablenkwinkels γ vom Einfallswinkel φ für eine konstante Wellenlänge $\lambda = \lambda_0$ skizziert. γ wird minimal, wenn das Licht (λ_0) das Prisma symmetrisch durchsetzt (Beweis siehe Anleitung 13. «Brechungsindex des Prismas»). Der betreffende Einfallswinkel werde als φ_{sym} bezeichnet. Aus Fig. 5 ist zu erkennen, dass zwar die Lage von γ_{min} scharf definiert ist, nicht aber die entsprechende von φ_{sym} . Es genügt daher nicht, das Prisma durch Beobachtung der Minimalablenkung der gelben Hg-Linien zu justieren. Um auch φ_{sym} , und damit die Lage des Prismas genau festlegen zu können, brauchen wir einen weiteren Zusammenhang.

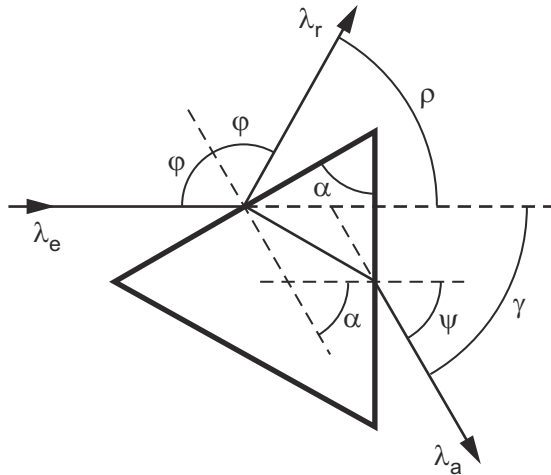


Fig. 4: Minimale Ablenkung bei $\psi = \varphi$. / Minimum deflection when $\psi = \varphi$.

Aus Fig. 4 erkennt man:

$$\gamma = \varphi + \psi(\lambda, \varphi) - \alpha$$

Bei symmetrischer Ablenkung ist $\varphi = \psi$ und damit:

$$\gamma_{\text{min}} = 2\varphi_{\text{sym}} - \alpha$$

oder mit $2\varphi = 180 - \rho$:

$$\underline{\gamma_{\text{min}} + \rho = 180 - \alpha}$$

If the prism is fixed in a certain position, then φ is constant for the parallel incident rays of all wavelengths and thus γ is only a function of λ (Fig. 3):

$$\gamma_\varphi = f(\lambda).$$

Knowing this function forms the basis for the measurement of the spectral energy distribution. The easiest way to determine it is to use a known line spectrum. To avoid this tedious work, an attempt of this function is graphically added as a calibration curve. It is valid for the position of the prism that corresponds to the minimum deflection of the corresponds to yellow Hg lines ($\bar{\lambda} = 578 \text{ nm}$). The prism therefore must be brought exactly in this position before starting the measurement. Fig. 5 shows the dependence of the deflection angle γ on the angle of incidence φ for a constant wavelength $\lambda = \lambda_0$ outlined. γ is minimum when the light (λ_0) passes through the prism symmetrically (Evidence in manual 13 "Refractive index of prisms"). The angle of incidence in question was called φ_{sym} . From Fig. 5 it can be seen that although the position of γ_{min} is sharply defined, it is not the case for the corresponding φ_{sym} . It is therefore not sufficient to adjust the prism by observing the minimum deflection of yellow mercury lines. To also get φ_{sym} , and thus be able to determine the position of the prism exactly we need a broader context.

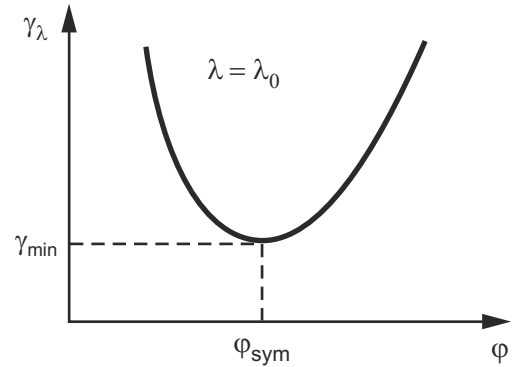


Fig. 5: φ -Abhängigkeit von γ_λ . / φ -dependence on γ_λ .

From Fig. 4 can be seen:

$$\gamma = \varphi + \psi(\lambda, \varphi) - \alpha$$

With symmetrical deflection, $\varphi = \psi$ and that:

$$\gamma_{\text{min}} = 2\varphi_{\text{sym}} - \alpha$$

or with $2\varphi = 180 - \rho$:

$$\underline{\gamma_{\text{min}} + \rho = 180 - \alpha}$$

Die zuletzt abgeleitete Gleichung gibt uns aber ein Mittel in die Hand, den Fehler von φ zu bestimmen und φ zu korrigieren. Diese Gleichung sagt nämlich aus, dass der Winkel zwischen minimal abgelenktem und reflektiertem Strahl ($\gamma + \rho$) immer gleich 180 minus den Brechungswinkel α des Prismas beträgt. Der Winkel α ist bei unserem Prisma genau 60. Ist also der Spalt des Fluxmeters auf die Minimalablenkung der gelben Hg-Linien eingestellt, so wird das Fluxmeter um genau 120 gedreht und die Lage des Prismas so korrigiert, dass der reflektierte Strahl den Spalt trifft (in der ursprünglichen Stellung des Fluxmeters sollte der gebrochene Strahl den Spalt immer noch treffen, da ja für diesen φ_{sym} nur unscharf definiert ist). Hierbei ist noch zu beachten, dass dieser Strahl eine etwas exzentrische Lage besitzt und dadurch die Linse 2 am Rande trifft (Fig. 2). Durch translatorisches Verschieben von Linse und Fluxmeter auf dem Schlitten des Goniometerarmes kann dies jedoch korrigiert werden.

3.2 Fluxmeter

Der Detektor ist auf dem beweglichen Arm des Spektrometers montiert und arbeitet nach dem Prinzip der Thermosäule (siehe z.B. Kohlrausch, Bd. 1).

3.3 Ausmessen des Hg-Spektrums

Man suche die zu maximalen Intensitäten gehörenden Ablenkungswinkel und vergleiche die aus der Eichkurve $\lambda(\gamma)$ bestimmten zugehörigen Wellenlängen mit den Literaturwerten.

3.4 Bestimmung von $E(\lambda)$ einer Halogen- bzw. Wolframbrandlampe

Die Temperatur des Wolframdrahtes in der Lampe wird variiert, indem man die Eingangsspannung V_e des Netzgerätes mittels eines Regeltransformators verändert. Man messe $E(\lambda)$ mit den an den Arbeitsplätzen angegebenen Eingangsspannungen V_e . Die vom Detektor absorbierte Strahlungsenergie stellt nur dann ein Maß für $E(\lambda)$ dar, wenn das empfangene Wellenlängen-Intervall $\Delta\lambda$ unabhängig von λ ist. Es gilt

$$\Delta\lambda = \left(\frac{d\lambda}{d\gamma} \right)_\lambda \Delta\gamma$$

Da der Winkelbereich $\Delta\gamma$, der vom Detektor empfangen wird, konstant ist, ist das Produkt aus der gemessenen Intensität $I(\gamma)$ und dem Faktor $(d\lambda/d\gamma)^{-1}$ proportional zu $E(\lambda)$.

$$I(\gamma) \left(\frac{d\lambda}{d\gamma} \right)_\lambda^{-1} = CE(\lambda)$$

Der Faktor $(d\lambda/d\gamma)$ ist eine Funktion von λ resp. γ . Sie ist dem Versuch ebenfalls in Form einer graphischen Darstellung beigegeben. Die Proportionalitätskonstante C enthält die Graukorrektur, ferner Geometriekonstanten (strahlende Oberfläche, Raumwin-

The last equation derived gives us a means to evaluate the error on φ and to correct φ . This equation states namely that the angle between minimally deflected and reflected beam ($\gamma + \rho$) is always equal to 180 minus the refraction angle α of the prism. The angle α is exactly 60. The slit of the fluxmeter is also set to the minimum deflection of the yellow mercury lines, so that the fluxmeter is rotated by exactly 120 and the position of the prism is corrected so that the reflected beam hits the slit (in the original position of the fluxmeter the refracted beam should still hit the slit, as φ_{sym} is only roughly defined). Here (Fig. 2) it is also to note that this beam has a slightly eccentric position and thus the lens 2 touches the edge of the prism. Through translational displacement of the lens and fluxmeter on the carriage of goniometer arm however, this can be corrected.

3.2 Fluxmeter

The detector is mounted on the movable arm of the spectrometer and operates according to the principle of the thermopile (see, for example Kohlrausch, Vol. 1).

3.3 Measure of the Hg-Spectrum

Identify the deflection angles corresponding to the maximum intensities. Using the calibration curve $\lambda(\gamma)$, find the corresponding wavelengths and compare them with the literature values.

3.4 Determination of $E(\lambda)$ a Halogen with respect to Tungsten lamp

The temperature of the tungsten filament in the lamp is varied by changing the input voltage V_e of the power supply by means of a regulating transformer. Measure $E(\lambda)$ with the input voltages V_e indicated in the workplace.

The radiation energy absorbed by the detector only constitutes a measure of $E(\lambda)$ when the received wavelength interval $\Delta\lambda$ is independent of λ . It gives

$$\Delta\lambda = \left(\frac{d\lambda}{d\gamma} \right)_\lambda \Delta\gamma$$

Since the angle range $\Delta\gamma$ which is received by the detector is constant, the product of the measured intensity $(d\lambda/d\gamma)^{-1}$ and $I(\gamma)$ is proportional to $E(\lambda)$.

$$I(\gamma) \left(\frac{d\lambda}{d\gamma} \right)_\lambda^{-1} = CE(\lambda)$$

The factor $(d\lambda/d\gamma)$ is a function of λ and γ . It is added in the graphical representation for the experiment. The proportionality constant C contains the gray correction, further geometry constants (radiating surface, solid angle) and losses (absorption by lenses and prism), and it is not accessible in this experiment for us.

kel) und Verluste (Absorption durch Linsen und Prisma) und ist uns in diesem Experiment nicht zugänglich.

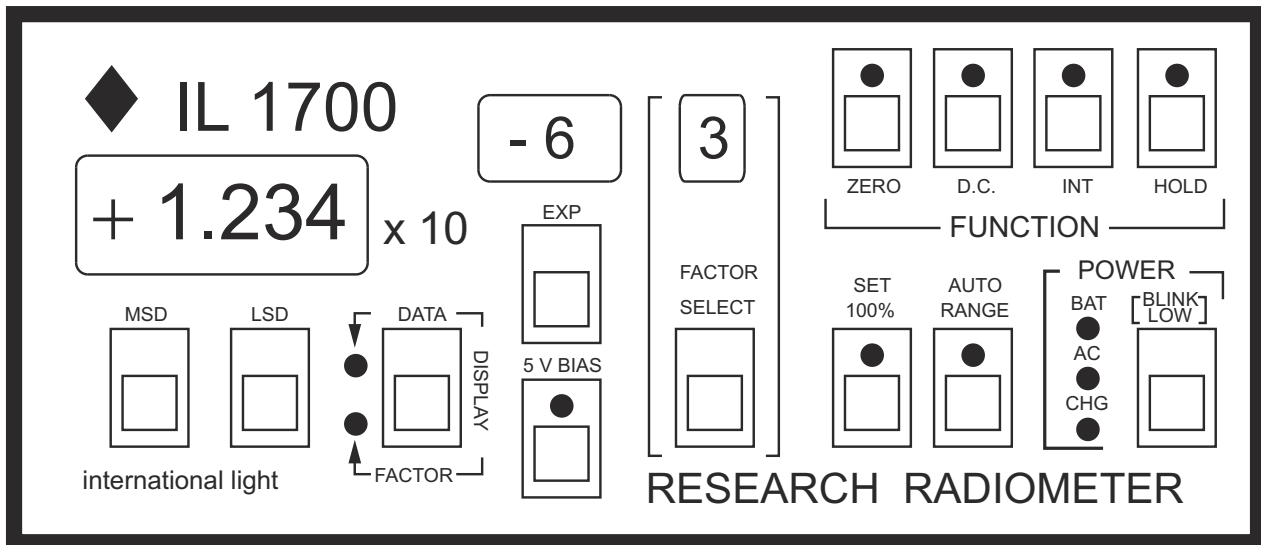


Fig. 6: Fluxmeter

3.5 Kurzbedienungsanleitung zu IL 1700

1. Gerät mit Hauptschalter POWER einschalten; Anzeige AC muss aufleuchten.
2. Taste DATA/DISPLAY/FACTOR antippen, bis Anzeige FACTOR aufleuchtet. Im Display sollte der auf dem Sensor angegebene Kalibrierfaktor erscheinen. Mit den Tasten MSD, LSD und EXP kann dieser Wert notfalls neu eingegeben werden.
3. Taste DATA/DISPLAY/FACTOR antippen bis Anzeige DATA aufleuchtet.
4. Anzeigen folgender Tasten müssen leuchten (andernfalls durch Antippen einschalten): D.C. und AUTORANGE.
5. Anzeigen folgender Tasten dürfen nicht leuchten (andernfalls durch Antippen ausschalten): 5 V BIAS, INT, HOLD, SET 100%.
6. Umgebungsbeleuchtung möglichst reduzieren und während der Messung konstant halten.
7. Detektor lichtdicht abdecken, 10 Sekunden warten, dann Taste ZERO drücken (Nullabgleich). Das Gerät ist einsatzbereit.
8. Die angezeigten Messwerte sind in W/cm^2 .

3.5 Quick reference guide for the IL 1700

1. Switch on the device with the main switch POWER; AC indicator should light up.
2. Press DATA / DISPLAY / FACTOR tap, lights up display FACTOR. In the display, the calibration factor indicated on the sensor should appear. With the buttons MSD, LSD and EXP, this value can be re-entered if necessary.
3. Press DATA / DISPLAY / FACTOR Touch to display DATA lights.
4. On display, the following key must be lit (otherwise by tapping Switch): DC and AUTORANGE.
5. On display, the following buttons may not light up (otherwise, by tapping off): 5 V BIAS, INT, HOLD, SET 100%.
6. Reduce ambient light as much as possible and keep it constant during the measurement.
7. Cover detector light-tight, wait 10 seconds, then press key ZERO (Zero the instrument). The device is ready to use.
8. The measured values are in W/cm^2 .

4 Fragen für Studierende des Studiengangs Physik

1. Wie heisst der zweite Hauptsatz der Thermodynamik?
2. Warum verbietet dieser Hauptsatz, dass in einem abgeschlossenen System im thermischen Gleichgewicht zwei Körper unterschiedliches Emissionsvermögen haben? Somit ist das Emissionsvermögen für einen schwarzen Strahler universell.
3. Was ist ein schwarzer, grauer bzw. selektiver Strahler?
4. Warum kann ein schwarzer Strahler durch einen Hohlraum mit einer kleinen Öffnung angenähert werden?
5. Welcher Bereich einer Darstellung des spektralen Emissionsvermögens $E_s(\lambda, T)$ versus Wellenlänge λ zeigt klassisches Verhalten, in welchem sind quantenmechanische Betrachtungen zwingend? Welche Grösse ist quantisiert?
6. Die Sonnentemperatur beträgt etwa 6000 K. Bei welcher Wellenlänge liegt damit das Maximum der ausgesendeten Strahlung?
7. In einer Darstellung von $E_s(\nu, T)$ versus Frequenz ν tritt ein Maximum auf (vgl. auch Fig. 1). Wird dieses Maximum auch das Wiensche Gesetz wie in Gl. (4) erfüllen?
8. Wenn Sie die Temperatur eines Strahlers verdoppeln, nimmt das über alle Wellenlängen aufsummierte spektrale Emissionsvermögen deutlich zu. Wie lautet die Temperaturabhängigkeit dieses Integrals? Wie heisst dieses Gesetz?
9. Was unterscheidet einen Körper, der rot angemalt ist, von einem Körper, der rot glüht? Auf was bezieht sich das spektrale Emissionsvermögen?
10. Was ist Wärmestrahlung?
11. Was ist ein optischer Kondensor? Welche Rolle spielt er und der Spalt im Spektrometer (Fig. 2)?
12. Wie bestimmen Sie Wellenlänge samt ihrer Messunsicherheit?

4 Questions for physics students

1. What is the name of the second law of thermodynamics?
2. Why prohibits in this law that in a closed system in thermal equilibrium have two different body emissivity? Thus, the emissivity of a black body is universal.
3. What is a black, gray or selective emitters?
4. Why can a black radiator be approximated by a cavity with a small opening?
5. Which area of a representation of the spectral emissivity $E_s(\lambda, T)$ versus wavelength λ shows classical behavior, in which are quantum mechanical considerations mandatory? What size is quantized?
6. The sun is about 6000 K temperature. At what wavelength is thus the maximum of the emitted radiation?
7. In a representation of it $E_s(\nu, T)$ versus frequency ν a maximum occurs (see. Also fig. 1). Is this maximum is also confirming the Wien's Law as in Eq. (4)?
8. If you double the temperature of the spot, taking the sum over all wavelengths spectral emissivity. What is the temperature dependence of this integral? What is the name of this law?
9. What distinguishes a body is painted red, of a body that glows red? To what are the spectral emissivity referring?
10. What is heat radiation?
11. What is an optical condenser? What is the role of it and of the gap in the spectrometer (Fig. 2)?
12. How do you determine wavelength together with their uncertainty?