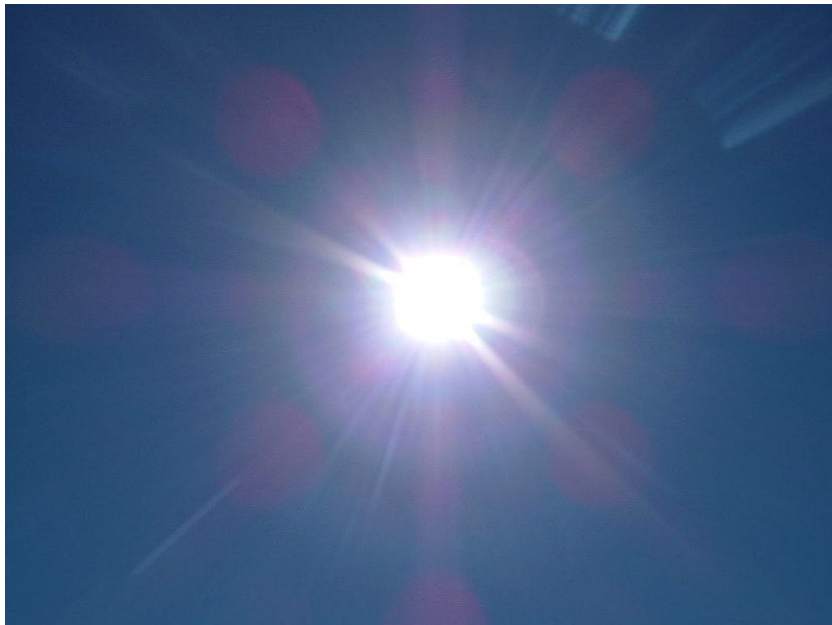


# Physikalisches Grundpraktikum für Physiker/innen

## Teil III

### Temperaturstrahlung



Grundpraktikum Physik: <http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/>



## 1. Stoffgebiet

- Strahlungsfelder
- Strahlungsgesetze
- Schwarze Strahlung
- Photometrie und Strahlungsmessung
- Pyrometrie
- Spektroskopie von Strahlung

## 2. Literatur

- D. Meschede  
*Gerthsen Physik*  
24., überarb. Aufl. 2010, Springer-Verlag  
Kap. 12
- *VERORDNUNG (EG) Nr. 244/2009 DER KOMMISSION vom 18. März 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht*  
Amtsblatt der Europäischen Union L76 v. 24.3.2009  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0003:0016:DE:PDF>

**3. Fragen**

1. Skizzieren Sie das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung und bezeichnen Sie die unterschiedlichen Spektralbereiche.
2. Geben Sie die Definitionen der folgenden Größen an:
  - Absorptionsvermögen (Absorptionsgrad)
  - Reflexionsvermögen (Reflexionsgrad)
  - Emissionsvermögen (Emissionsgrad)
  - Transmissionsvermögen (Transmissionsgrad)
3. Wieso strahlt ein Körper elektromagnetische Wellen ab, wenn ihm Wärmeenergie zugeführt wird?
4. Normale Glühlampen haben Betriebstemperaturen von etwa 2300 K. Berechnen Sie die Wellenlänge des Emissionsmaximums unter der Annahme, es handele sich um einen Schwarzen Körper. Zeichnen Sie mit Hilfe der Planck-Funktion das zugehörige Emissionsspektrum und schätzen Sie den sichtbaren Anteil ab.
5. Macht das EU-Verbot von normalen Glühbirnen Sinn?
6. Wie folgen Rayleigh-Jeanssches und Wiensches Strahlungsgesetz aus dem Planckschen Strahlungsgesetz?
7. Erläutern Sie das Prinzip der Pyrometrie.

## 4. Grundlagen

### 4.1 Strahlungsemission von Festkörpern

Freie Atome senden Licht mit charakteristischen Spektrallinien aus (Linienspektren). Durch den Zusammenschluss mehrerer Atome zu einem Molekül werden die Linien verbreitert, und neue Spektrallinien bzw. -gebiete kommen hinzu (Bandenspektren). Werden die Größe der Atomaggregate und die Packungsdichte größer, so gehen die individuellen Eigenschaften der Atome immer mehr verloren. Am Ende dieser Entwicklung steht der makroskopische Festkörper (oder die Flüssigkeit) mit typisch  $10^{20}$  Atomen pro  $\text{cm}^3$ . Festkörper können im Wellenlängenspektrum vom fernen Ultravioletten (UV) bis ins ferne Infrarote (IR) kontinuierlich Strahlung emittieren. Bei Festkörpern unterscheidet man nach der Art der Anregung zwei Strahlungsarten:

*Lumineszenzstrahlung:*

Unter Lumineszenzstrahlung versteht man alle Fälle von Lichtemission, die ihre Ursache nicht bzw. nicht allein in der Temperatur des Festkörpers haben. Lumineszenz kann durch sehr verschiedene Arten der Anregung entstehen. Beispiele sind

- Photolumineszenz-Anregung durch Licht, z.B. Bandübergänge in Halbleitern,
- Chemolumineszenz-Anregung durch chemische Reaktionsenergie,
- Tribolumineszenz-Anregung durch mechanische Einwirkung.

*Temperaturstrahlung:*

Liegt die Ursache der Strahlung eines Stoffes allein in seiner thermischen Energie, so spricht man von Temperaturstrahlung, von thermischer Strahlung oder Wärmestrahlung. Im vorliegenden Versuch soll nur die Temperaturstrahlung eines Festkörpers betrachtet werden.

### 4.2 Strahlungsgrößen

Die Temperaturstrahlung hängt von der Temperatur des Strahlers, von der Beschaffenheit seiner Oberfläche und seinen Materialeigenschaften ab. Das Emissionsvermögen  $E$  eines Körpers ist die ausgestrahlte Energie pro Flächeneinheit seiner Oberfläche und pro Zeiteinheit:

$$E = \frac{W}{Ft} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (1)$$

Das Absorptionsvermögen  $A$  ist das Verhältnis der absorbierten zur einfallenden Strahlungsenergie (bezogen auf dasselbe Zeitintervall):

$$A = \frac{W_{\text{absorbiert}}}{W_{\text{einfallend}}} \quad (2)$$

$A$  ist dimensionslos und daher nicht mit  $E$  vergleichbar. Viele Metalle haben ein kleines  $A$  ( $A \ll 1$ ), da der Großteil der einfallenden Strahlung reflektiert wird. Dennoch können Metalle die ins Metall eindringende Strahlung sehr stark absorbieren. Typisch ist, dass dieser Anteil der Strahlung bereits in extrem kleinen Schichtdicken von 50-500 nm an der Oberfläche völlig absorbiert wird.

### 4.3 Schwarze Strahler

Einen Strahler, dessen Absorptionsvermögen gleich dem maximal möglichen ist ( $A = 1$ ), also er lässt keine Strahlung durch und spiegelt oder streut auch nicht, bezeichnet man als Schwarzen Strahler oder absolut schwarzen Körper. Dieses Modell ist allerdings in der Natur nicht realisiert. Es gibt keinen Stoff, dessen optische Materialeigenschaften dem Schwarzen Körper entsprechen. Diese Bedingung wird aber von einem Hohlraumstrahler gut erfüllt. Dabei handelt es sich um einen nach außen thermisch isolierten Hohlzylinder mit einer kleinen Öffnung. Durch eingebaute Blenden und zusätzliche Schwärzung der Innenwände wird erreicht, dass Strahlung, die durch die Öffnung in den Hohlraum eintritt, vielfach reflektiert und gestreut wird, und bei jeder Reflexion zugleich eine starke Absorption erfährt. Ein solcher Hohlraum absorbiert praktisch alle einfallende Strahlung. Die Strahlung, die durch die Öffnung austritt, wenn der Zylinder erhitzt wird, ist nur eine Funktion der Temperatur der Wände des Hohlraums und unabhängig vom Material, aus dem der Hohlraum besteht. Da  $A = 1$  ist, folgt aus dem Kirchhoffschen Gesetz, dass die Emission aus der Öffnung des Hohlraumes genau die eines Schwarzen Körpers derselben Temperatur ist, die die Hohlrauminnenwände besitzen. Daher sind die Begriffe Hohlraumstrahler und Schwarzer Strahler äquivalent.

### 4.4 Plancksches Strahlungsgesetz

Die emittierte Strahlung wird üblicherweise durch ihre Strahlungsdichte beschrieben, die als der Energiestrom definiert ist, der von der Flächeneinheit in Normalenrichtung in die Raumwinkeleinheit emittiert wird Einheit:  $[\text{W}/\text{m}^2\text{sterad}] = [\text{W}/\text{m}^2]$ , da der Raumwinkel dimensionslos ist). Bezieht man zusätzlich die Strahlung auf einen begrenzten Spektralbereich  $\Delta\lambda$ , so spricht man von spektraler Strahlungsdichte mit der Einheit  $[\text{W}/\text{m}^3]$  (wobei  $\text{m}^3$  durch die Dimension Fläche mal Wellenlängenintervall zustande kommt).

Die abgestrahlte spezifische Intensität (spektrale Radianz), d.h. die Energie pro Einheitsfläche, pro Wellenlänge (bzw. pro Frequenz) und Einheitsraumwinkel (in Steradian) ist durch die Plancksche Strahlungsformel [1,2] beschrieben:

$$L(\lambda, T)d\lambda = 2hc^2 \frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} d\lambda \quad (3)$$

$$L(\nu, T)d\nu = \frac{2h}{c^2} \nu^3 \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} d\nu$$

mit  $L$ : spektrale Strahlungsdichte,  $\lambda$ : Wellenlänge,  $T$ : Temperatur,  $k_B$ : Boltzmann-Konstante,  $h$ : Plancksche Konstante;  $c$ : Lichtgeschwindigkeit.

Als (messbare) Strahlungsleistung folgt daraus

$$P(\lambda) = L(\lambda) \Delta\lambda \Delta\Omega \quad (4)$$

wobei  $\Delta\lambda$  die spektrale Bandbreite und  $\Delta\Omega$  der durch die Messanordnung erfasste Raumwinkel bedeuten. Bei der theoretischen Begründung von Gl. (3) hat Planck den Strahler durch ein Modell von Resonatoren beschrieben, die im Gegensatz zur klassischen Elektrodynamik in einem äußeren, periodisch wechselnden elektromagnetischen Feld Strahlungsenergie nicht stetig aufnehmen oder abgeben, sondern nur in Quanten der Energie  $hc/\lambda$ .

Leitet man das Plancksche Strahlungsgesetz nach  $\lambda$  ab und setzt die Ableitung Null, so ergibt sich für die Lage des Maximums der spektralen Verteilung der Strahlung (mit der Näherung  $e^x - 1 \approx e^x$ ) das Wiensche Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{\max} T = \text{const} = 2.879 \times 10^{-3} \quad (5)$$

Die Wellenlänge des Strahlungsmaximums verschiebt sich also mit wachsender Temperatur zu immer kürzeren Wellenlängen. Beispielsweise haben der menschliche Körper und die Sonnenoberfläche  $\lambda_{\max} = 10 \mu\text{m}$  bzw.  $0.5 \mu\text{m}$ .

Die gesamte Strahlungsdichte des Schwarzen Körpers erhält man, wenn man Gl. (3) über alle Wellenlängen und den Halbraum integriert (Stefan-Boltzmannsches Gesetz):

$$L_{\text{ges}} = \pi \int_0^{\infty} L(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{mit} \quad \sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} \approx 5.7 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \quad (6)$$

$L_{\text{ges}}$  ist die Fläche unter der spektralen Verteilungskurve der spektralen Strahlungsdichte  $L(\lambda, T)$  (Planck-Kurve).

#### 4.5 Reale Strahler

Bei dem Begriff des Schwarzen Körpers handelt es sich um eine Idealisierung, die sich technisch am besten über den Hohlraumstrahler annähern lässt. In Wirklichkeit ist kein strahlender Stoff im physikalischen Sinne schwarz. Selbst die „schwärzesten“ Körper absorbieren zwar bis zu 99% der auftreffenden Strahlung, dies aber nur in begrenzten Spektralbereichen. So ist normales Glas im IR schwarz, Ruß ist im IR nicht schwarz.

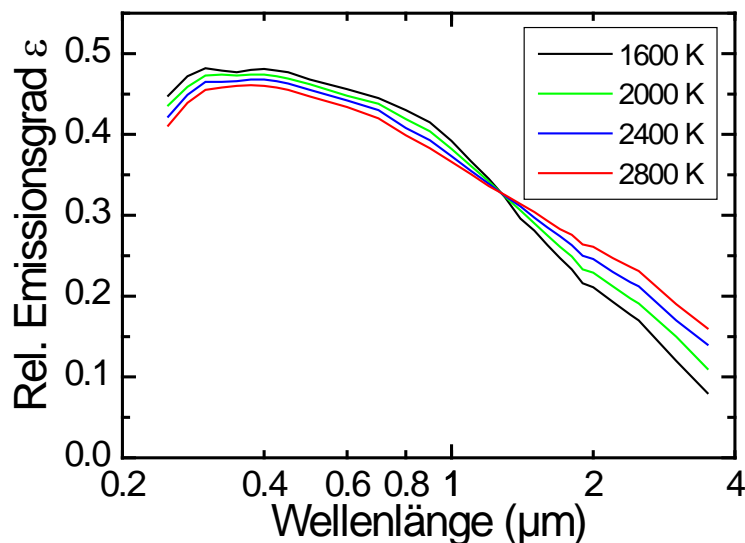


Abb. 1: Relativer Emissionsgrad von Wolfram als Funktion der Wellenlänge für verschiedene Temperaturen.

Graue Strahler sind Strahler, bei denen das Absorptionsvermögen kleiner als 1 ist, aber, wie beim Schwarzen Körper unabhängig von der Wellenlänge. Aus dem Kirchhoffschen Gesetz folgt, dass auch das Gesamtemissionsvermögen des Grauen Strahlers kleiner ist als das des Schwarzen Strahlers. Das Verhältnis der Strahlungsdichte eines Strahlers zur maximal möglichen Strahlungsdichte (d. h. der des Schwarzen Körpers) bei gegebener Temperatur wird als relativer Emissionsgrad  $\varepsilon$  bezeichnet:

$$\varepsilon = \frac{L}{L_{\text{schwarz}}} \quad (7)$$

Für Graue Strahler gilt  $\varepsilon < 1$  und  $\varepsilon \neq \varepsilon(\lambda)$ . Auch bei dem Begriff des Grauen Strahlers handelt es sich um eine Idealisierung. Für reale Strahler ist  $\varepsilon$  höchstens für beschränkte Wellenlängenbereiche konstant. So können z.B. der Kohlebogen oder die Wolframglühlampe im sichtbaren Spektralbereich in Näherung als Graue Strahler gelten.

Selektive Strahler sind Strahler, deren relativer Emissionsgrad wellenlängenabhängig ist. Für selektive Strahler gilt  $\varepsilon < 1$  und  $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$ .

Metalle besitzen i.A. ein großes Reflexionsvermögen und somit ein geringes Absorptionsvermögen und daher einen geringen relativen Emissionsgrad  $\varepsilon$ . Deswegen verwendet man beispielsweise dünne Metallschichten auf Fenstern zur Abschirmung von Wärmestrahlung. Die Abb. 1 zeigt die spektrale Abhängigkeit des relativen Emissionsgrades von Wolfram für vier Temperaturen. Man sieht, dass  $\varepsilon$  von Wolfram im sichtbaren Bereich auf etwa 10% konstant ist, so dass Wolfram in diesem Bereich angenähert als grau betrachtet werden kann. Im UV- und IR-Bereich ist  $\varepsilon$  stärker wellenlängenabhängig. Wolfram ist also dort ein selektiver Strahler.

### 5. Versuchsaufbau

Als Strahlungsquelle wird eine Wolframbandlampe verwendet. Die Temperatur des Glühbands kann durch Verändern des Betriebsstroms variiert werden. Das Netzgerät ist wahlweise mit Strom- und mit Spannungsstabilisierung zu betreiben. Hier ist eine Stromstabilisierung erforderlich (wieso?).

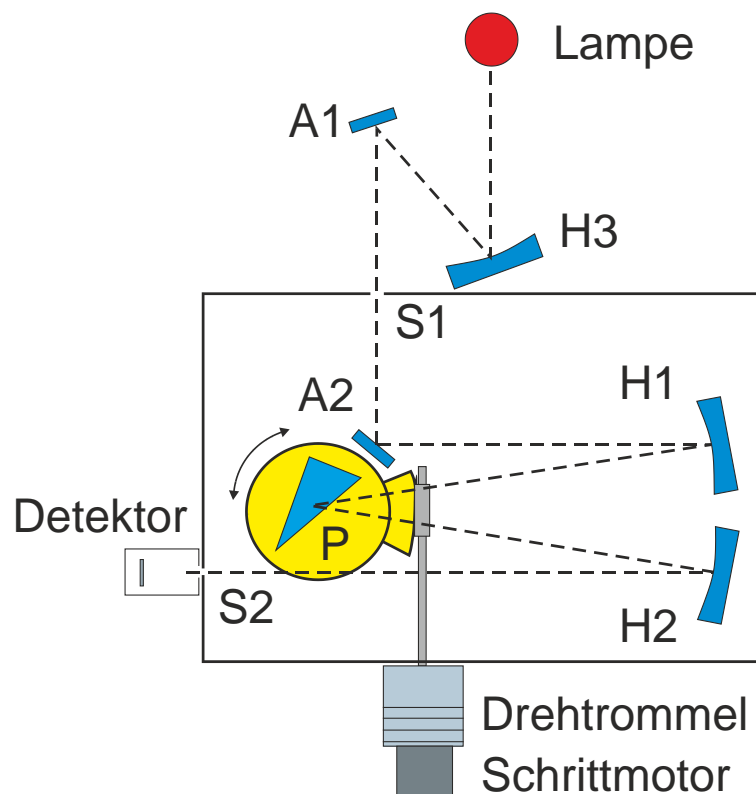


Abb. 2: Aufbau des Carl-Leiss-Spiegel-Monochromators.

Bei den hier erreichbaren Glühtemperaturen hat die spektrale Strahlungsdichte im IR-Bereich ihr Maximum, so dass zur spektralen Zerlegung ein auch den IR-Bereich erfassendes Spektrometer benötigt wird. Da optische Gläser im IR-Bereich starke Absorption zeigen, wird in dem benutzten Spektrometer der abbildende Strahlengang durch Hohlspiegel anstelle von Linsen erzeugt (Abb. 2). Das Prisma besteht aus Infrasil, ein wasserfreier Quarz, der zwischen

etwa 280 nm und 2600 nm zu mehr als 90% transparent ist. Den Strahlengang und den optischen Aufbau können Sie direkt beobachten, wenn Sie die Abdeckplatte des Spektrometers abnehmen. Achten Sie darauf, dass die Platte während des Versuches wieder dicht geschlossen ist und kein Falschlicht eindringen kann.

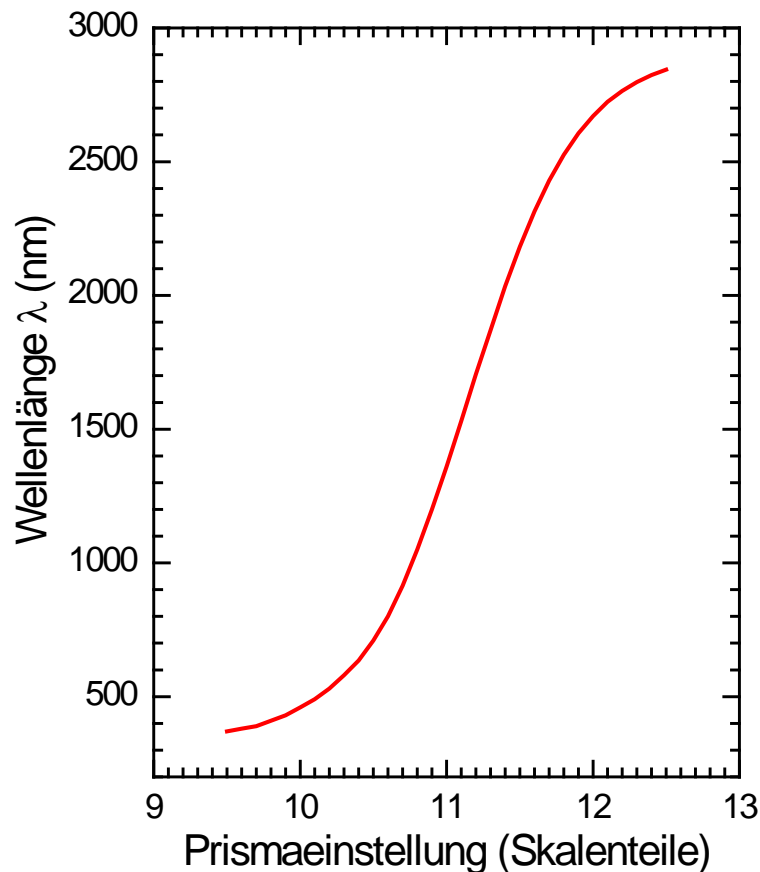


Abb. 3: Kalibrierung (Wellenlänge als Funktion der Prismastellung in Skalenteilen) für den Leiss-Monochromator.

Das Licht der Lampe wird über einen Hohlspiegel (H3) und einen Planspiegel (A1) auf den Eintrittsspalt S1 fokussiert. Dieser Spalt befindet sich über den Planspiegel A2 im Brennpunkt des Hohlspiegels H1. Dadurch erzeugt man ein paralleles Strahlenbündel, welches das Prisma P durchsetzt. Die Rückseite des Prismas ist verspiegelt, so dass das Strahlenbündel das Prisma ein zweites Mal durchläuft. Nach dem Durchgang durch das Prisma trifft es auf den Hohlspiegel H2, in dessen Brennebene sich der Austrittsspalt S2 befindet. In der Ebene des Austrittsspaltelies liegt wegen der Dispersion des Prismas das nach Wellenlängen aufgefächerte Strahlungsspektrum. Dieses wird als Ganzes über den Austrittsspalt verschoben, wenn man das Prisma dreht, so dass Strahlung unterschiedlicher Wellenlängenbereiche durch den Spalt austreten kann. Diese Drehung erfolgt von außen mit einem Schrittmotor über ein Schneckengetriebe und wird in Skalenteilen (SKT) an der Drehtrommel abgelesen. Zur Kalibrierung ist in Abb. 3 und Tab. 1 der Zusammenhang zwischen Skalenteilen und Durchlasswellenlänge am Spalt S2 angegeben.

Die Breite des Austrittsspaltelies bestimmt wesentlich die spektrale Reinheit (Monochromasie) der aus dem Spektrometer austretenden Strahlung. Die Strahlungsleistung wird mit Hilfe eines Detektors (Thermosäule) gemessen. Die Thermosäule besteht aus vielen hintereinandergeschalteten Thermoelementen. Die Verbindungsstellen befinden sich abwechselnd auf einer geschwärzten Fläche, die die gesamte auftreffende Strahlung absorbiert und in Wärme um-



wandelt und auf einer von der Strahlung abgeschirmten Fläche, die kalt (d.h. Raumtemperatur) bleibt. Die entstehende Thermospannung ist ein Maß für die auftreffende Strahlungsintensität und wird mit einem Mikrovoltmeter gemessen.

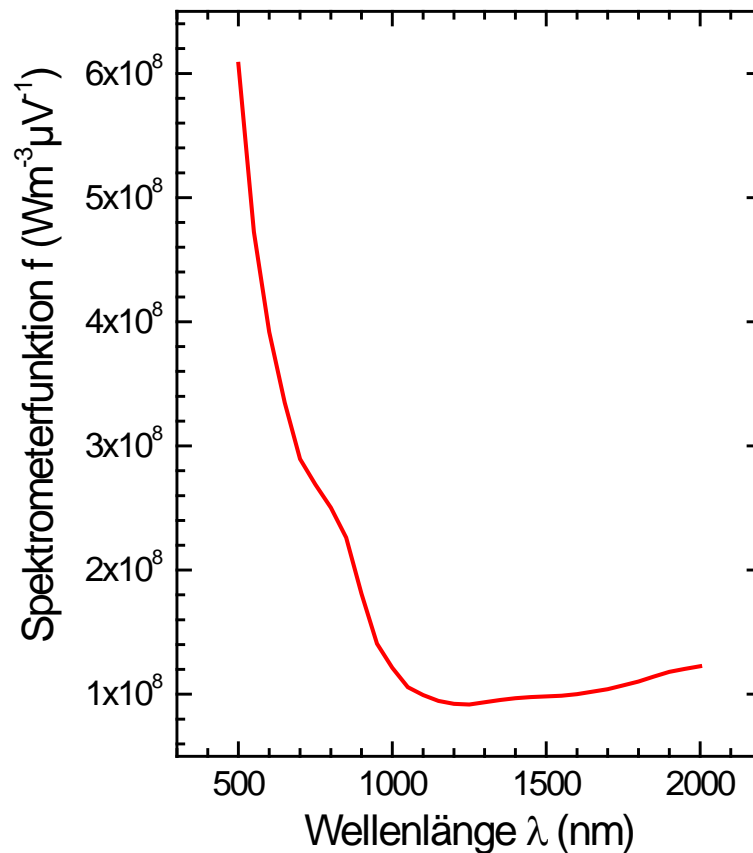


Abb. 4: Spektrometerfunktion  $f(\lambda)$  für den Leiss-Monochromator.

Thermosäulen haben eine hohe Empfindlichkeit, die vom IR bis zum UV nahezu unabhängig von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung ist. Dies liegt daran, dass die absorbierende Schicht durch eine geeignete Mischung von Stoffen in diesem ganzen Bereich praktisch ein Schwarzer Körper ( $A > 95\%$ ) ist. Mit unserer Thermosäule kann man sogar die thermische Strahlung des Menschen messen. Dennoch ist die Anzeige für unterschiedliche Wellenlängen noch zu korrigieren, weil das Durchlassvermögen des Spektrometers sich mit der Wellenlänge ändert. Dies ist bedingt durch die nichtlineare Dispersion des Prismas, sowie das wellenlängenabhängige Reflexionsvermögen der Spiegel. Diese Korrekturfunktion  $f(\lambda)$  nennen wir die „Spektrometerfunktion“ und ist in Abb. 4 dargestellt. Sie korrigiert zusätzlich bezüglich des Raumwinkels  $\Delta\Omega$  und der Strahler- und Empfängerfläche unserer Versuchsanordnung (s. Gl. (4)), so dass man die spektrale Strahlungsdichte  $L$  aus der am Detektor gemessenen Spannung  $U$  erhält:

$$L(\lambda) = U(\lambda) f(\lambda) \quad (8)$$

### Programm Planck 2.2+:

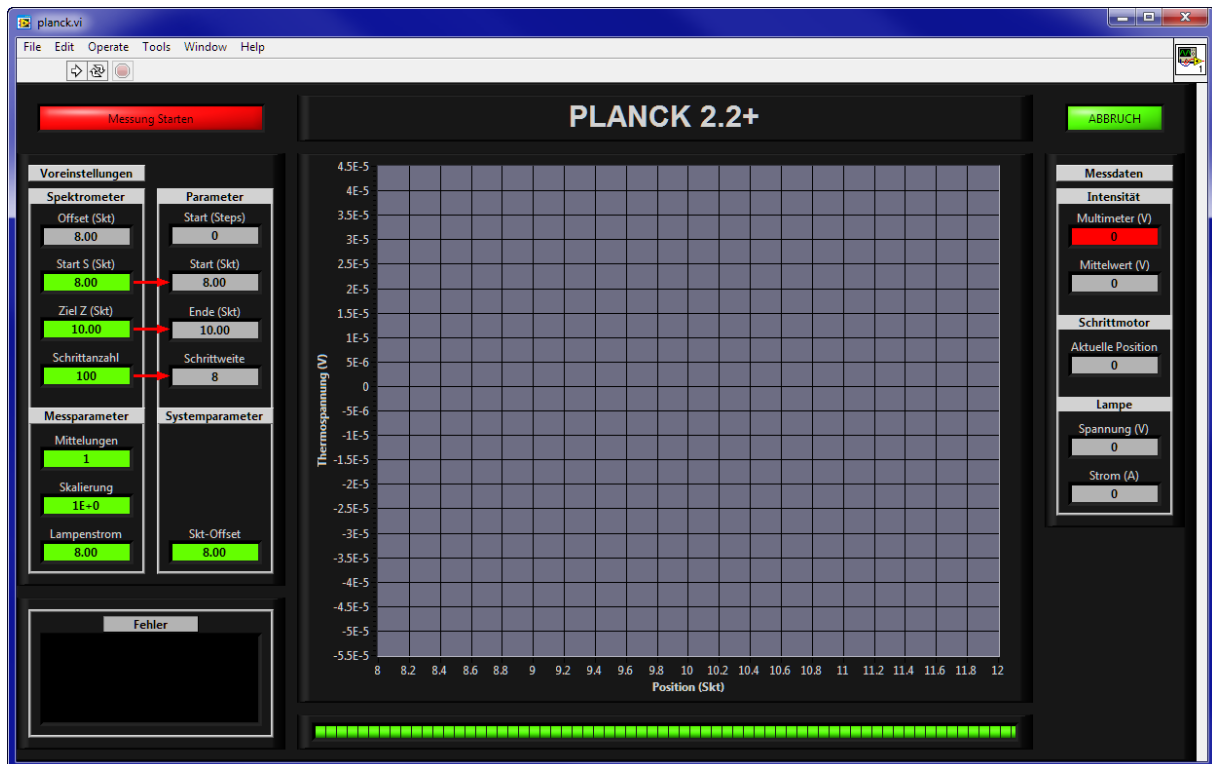


Abb. 5: Benutzeroberfläche des LabVIEW-Programms Planck 2.2+.

Die Steuerung des Spektrometers und die Erfassung der Messwerte erfolgt über ein LabVIEW-Programm. Das Programm *Planck 2.2+* (Abb. 5) erlaubt die Ansteuerung des Schrittmotors zur Drehung des Prismas über eine RS232-Schnittstelle, die Einstellung des Lampenstroms, sowie das Auslesen der Daten des PREMA 5017 Digital Multimeter über den GPIB-Bus.

Im folgenden ist der **Programmablauf** beschrieben:

#### 1. Initialisierung

- a. Initialisierung der Systemvariablen „Offset“ (Offset (Skt))
- b. Initialisierung des Schrittmotors (relative Nullposition wird auf aktuelle Position gesetzt)
- c. Initialisierung des Multimeters
- d. Festlegung einer Datei für die Datenspeicherung im ASCII-Format

#### 2. Parameterbelegung

- a. Überprüfung der Parameter für Startposition und Zielposition
- b. Ausgabe der interpolierten Parameter
- c. Einstellung der Mittelung der Spannungsmessungen pro Winkelschritt
- d. Einstellung des Lampenstroms
- e. Warten auf „Parameter akzeptieren“

#### 3. Messung

- a. Start der Messung, die Messung startet mit 30 s Verzögerung zur Stabilisierung der Lampe.
- b. Anfahren der Startposition

- c. Messung
- d. Grafische Darstellung der Daten
- e. Speicherung der Daten (die Daten werden an die in 1d gewählte Datei angehängt)
- f. Verfahren des Schrittmotors um die interpolierte „Schrittweite“
- g. Schleife von 3c- 3f mit Möglichkeit des Abbruchs über „Abbrechen“ in jedem Schritt. Im Falle eines Abbruchs fährt der Schrittmotor wieder auf die Nullposition aus 1b zurück, die Daten bleiben erhalten

#### 4. Ende der Messung

- a. Anfahren der Nullposition aus 1b
- b. Schließen der Schnittstellen
- c. Ende des Programms

*Die Nullposition wird in Schritt 1b in jedem Programmdurchlauf neu festgelegt. Ein Hinweis, dass die Ausgangsposition des Geräts mit dem „Offset“ übereinstimmen muss, wird im Durchlauf 1 ausgegeben. Wird dieser nicht beachtet, kann das Spektrometer beschädigt werden, da es ausschließlich einen „Software-Endschalter“ für den Fahrweg gibt.*

#### Ein typischer Messablauf:

1. Überprüfung der Geräte
  - a. Multimeter einschalten
  - b. Netzgerät für Lampe einschalten
  - c. Schrittmotorsteuerung einschalten
2. Wolframlampe von Hand auf etwa 12 A Strom einschalten und auf den Eintrittsspalt fokussieren. Die Lampe einige Minuten zur Stabilisierung brennen lassen.
3. Programm *Planck 2.2*+starten (Planck.exe)
4. Position des Spektrometers überprüfen (ein entsprechender Hinweis wird vom Programm ausgegeben). Stimmt die Position nicht mit dem im Hinweis angegebenen Wert überein, so ist die Schrittmotorsteuerung auszuschalten und der Motor manuell in die korrekte Position zu bringen. Dann kann die Schrittmotorsteuerung wieder eingeschaltet werden.
5. Programm starten
6. Parameter festlegen. Paramtereingaben sind mit „Enter“ zu bestätigen. Da für den Schrittmotor interpoliert wird, ergeben sich für Start (S) und Ende (Z) für gewöhnlich leicht abweichende Werte. Die Abweichung lässt sich durch geschickte Wahl der Schrittzahl minimieren. *Der „Software-Endschalter“ sieht einen bestimmten Bereich für die Start- und Zielposition vor, so dass nur bestimmte Werte für S, Z und die Schrittzahl zulässig sind. Diese berechnet das Programm in Abhängigkeit vom Systemparameter „Offset“. Das Spektrometer kann von 0 - 14 Skalenteilen messen. Ist der Offset so gewählt (und das Spektrometer passend vorbereitet), kann der Fahrweg zu Beginn der Messung minimiert werden, was Zeit spart. Die Empfehlung und Vorgabe im Programm sind 8.0 Skalenteile. Dies kann im Programm geändert werden, darf aber nur unter gleichzeitiger Einstellung des neuen Nullwerts am Gerät geschehen.*
7. Parameter akzeptieren. Ab diesem Schritt sind keine Benutzereingaben mehr erforderlich, die Zeit während der Messungen kann genutzt werden, um mit dem Betreuer die Theorie zu vertiefen und die Auswertung zu besprechen.

**Bitte nicht am Tisch wackeln, die Messung wird sonst verfälscht.**

## 6. Versuch

Messen Sie das Strahlungsspektrum der Wolframbandlampe für verschiedene Temperaturen, die durch den Lampenstroms  $I$  festgelegt sind. Starten Sie bei 8 A und erhöhen Sie den Lampenstrom in Schritten von 1 A bis zu 14 A. Der Strom darf 15 A nicht überschreiten. Im Anhang finden Sie die mit einem Pyrometer bestimmte Temperatur der Lampe als Funktion des Lampenstroms.

Die Spaltbreiten S1 und S2 am Spektrometer sollten auf 1.5 mm eingestellt sein. Messen Sie die Thermospannung  $U$  mit mindestens 100 Schritten zwischen 9.00 SKT und 12.00 SKT.

## 7. Auswertung

Die Daten liegen in der Form einer ASCII-Tabelle „Skalenteile – Intensität (Thermospannung)“ vor. Um sie zur Auswertung benutzen zu können, muss von Skalenteilen in Wellenlängen umgerechnet werden. Die Umrechnungsfaktoren sind in Tab. 1 aufgelistet und auf dem Mess-PC in der Datei „Eichung.dat“ im ASCII-Format und als Origin-Worksheet „Eichung.ogw“ abgespeichert. Die Strahlungsdichte  $L$  nach Gl. (9) kann mit Hilfe der Spektrometerfunktion aus Tab. 1 berechnet werden. Die Werte sind auf dem Mess-PC in der Datei „Korrektur.dat“ im ASCII-Format und als Origin-Worksheet „Korrektur.ogw“ abgespeichert. Benötigte Zwischenwerte der Skalenteile bzw. Wellenlängen können mit Hilfe von *Origin* interpoliert werden.

Importieren Sie Ihre Messwerte und diese beiden Dateien in *Origin* und führen Sie die entsprechenden Korrekturen durch. Zeichnen Sie die Messkurven für die verschiedenen Lampentemperaturen entsprechend Gl. (9).

Fitten Sie (versuchen Sie es zumindest) die verschiedenen Messkurven  $L(\lambda, I_i(T))$  und bestimmen die Wellenlänge des jeweiligen Maximums  $\lambda_{\max}$ . Stellen Sie die so ermittelten Werten  $\lambda_{i,\max}$  und  $T_i$  bzw.  $I_i$  in *Origin* dar und bestimmen Sie durch einen linearen Fit die Konstante des Wienschen Verschiebungsgesetzes (Gl. (5)).

Für „kleine“ Wellenlängen gilt

$$e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} \gg 1$$

und aus dem Planckschen Strahlungsgesetz (Gl.(3)) wird das Wiensche Strahlungsgesetz

$$\begin{aligned} L(\lambda, T) d\lambda &\approx 2hc^2 \frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}}} d\lambda \\ &= Z \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}}} d\lambda \end{aligned} \quad (9)$$

Damit hat man eine Gleichung mit der Struktur

$$L = \frac{C_1}{\lambda^5 e^{\frac{C_2}{\lambda T}}} \quad \text{mit} \quad C_2 = \frac{hc}{k_B}$$

Tragen Sie für  $\lambda = 1000$  nm und für die verschiedenen Temperaturen  $T_i$  (bzw.  $I_i$ )  $\ln(L)$  gegen  $1/T$  und bestimmen Sie aus der Steigung der Geraden  $m = -C_2/\lambda$  das Plancksche Wirkungsquantum  $h$ .

### Literatur

- [1] M. Planck, *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft **2** (1900) 237
- [2] M. Planck, *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum*, Annalen der Physik **309** (1901) 553

## Anhang

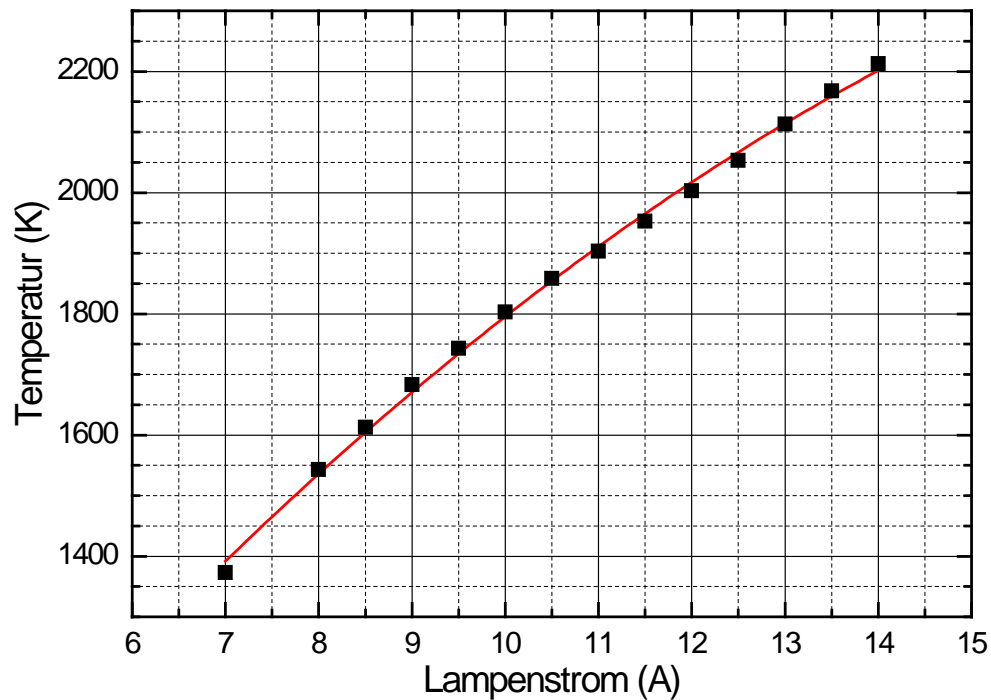
Tab. 1: Links: Kalibrierung (Wellenlänge als Funktion der Prismastellung in Skalenteilen) für den Leiss-Monochromator.  
Rechts: Spektrometerfunktion als Funktion der Wellenlänge für den Leiss-Monochromator.

| Prismastellung (Skalenteile) | Wellenlänge (nm) |
|------------------------------|------------------|
| 9.5                          | 370              |
| 9.6                          | 380              |
| 9.7                          | 390              |
| 9.8                          | 410              |
| 9.9                          | 430              |
| 10.0                         | 460              |
| 10.1                         | 490              |
| 10.2                         | 530              |
| 10.3                         | 580              |
| 10.4                         | 635              |
| 10.5                         | 710              |
| 10.6                         | 800              |
| 10.7                         | 915              |
| 10.8                         | 1050             |
| 10.9                         | 1200             |
| 11.0                         | 1360             |
| 11.1                         | 1530             |
| 11.2                         | 1705             |
| 11.3                         | 1870             |
| 11.4                         | 2035             |
| 11.5                         | 2182             |
| 11.6                         | 2314             |
| 11.7                         | 2429             |
| 11.8                         | 2526             |
| 11.9                         | 2606             |
| 12.0                         | 2671             |
| 12.1                         | 2724             |
| 12.2                         | 2765             |
| 12.3                         | 2798             |
| 12.4                         | 2824             |
| 12.5                         | 2844             |

| Wellenlänge (nm) | Spektrometerfunktion $f$ ( $\text{Wm}^{-3}\mu\text{V}^{-1}$ ) |
|------------------|---------------------------------------------------------------|
| 500              | 607669000                                                     |
| 550              | 472423000                                                     |
| 600              | 391744000                                                     |
| 650              | 334794000                                                     |
| 700              | 289428000                                                     |
| 750              | 268979000                                                     |
| 800              | 250390000                                                     |
| 850              | 226095000                                                     |
| 900              | 181047000                                                     |
| 950              | 140708000                                                     |
| 1000             | 121291000                                                     |
| 1050             | 105716000                                                     |
| 1100             | 99287400                                                      |
| 1150             | 94697900                                                      |
| 1200             | 92296000                                                      |
| 1250             | 91708200                                                      |
| 1300             | 93459400                                                      |
| 1350             | 95409600                                                      |
| 1400             | 96837200                                                      |
| 1450             | 97662900                                                      |
| 1500             | 98189600                                                      |
| 1550             | 98876300                                                      |
| 1600             | 100086000                                                     |
| 1650             | 102052000                                                     |
| 1700             | 104018000                                                     |
| 1750             | 107152000                                                     |
| 1800             | 110286000                                                     |
| 1850             | 114203500                                                     |
| 1900             | 118121000                                                     |
| 1950             | 120337000                                                     |
| 2000             | 122553000                                                     |

Die beiden Tabellen sind auf dem Mess-PC in den Dateien „Eichung.dat“ und „Korrektur.dat“ im ASCII-Format bzw. als Origin-Worksheets „Eichung.ogw“ und „Korrektur.ogw“ abgespeichert.

### Temperatur-Eichung Wolfram-Bandlampe (Glühfaden-Pyrometer, Netzgerät Agilent E3633A, 23.6.2010)



speichert.

Abb. 6: Temperatur der Wolfram-Bandlampe als Funktion des Lampenstroms.

Tab. 2: Temperatur der Wolfram-Bandlampe als Funktion des Lampenstroms.

| Strom (A) | Temperatur (K) |
|-----------|----------------|
| 7.0       | 1373           |
| 8.0       | 1543           |
| 8.5       | 1613           |
| 9.0       | 1683           |
| 9.5       | 1743           |
| 10.0      | 1803           |
| 10.5      | 1858           |
| 11.0      | 1903           |
| 11.5      | 1953           |
| 12.0      | 2003           |
| 12.5      | 2053           |
| 13.0      | 2113           |
| 13.5      | 2168           |
| 14.0      | 2213           |