

PS6

Strahlung

Version vom 10. Juli 2013

Inhaltsverzeichnis

0	Allgemeine Grundlagen	1
0.1	Zur Korpuskulartheorie des Lichtes	1
1	Planck'sches Wirkungsquantum	2
1.1	Grundlagen	2
1.1.1	Begriffe	2
1.1.2	Fotoeffekt	3
1.1.3	Äußerer Fotoeffekt	3
1.1.4	Einsteingleichung	3
1.2	Aufgabenstellung	7
1.3	Versuchsaufbau und Durchführung	7
1.3.1	Experimenteller Aufbau	7
1.3.2	Hinweise zur Durchführung	9
1.3.3	Versuchsdurchführung und Auswertung	9
1.4	Literaturangaben	10
2	Wärmestrahlung	11
2.1	Grundlagen	11
2.1.1	Begriffe	11
2.1.2	Wärmestrahlung	11
2.1.3	Schwarzer Körper	11
2.1.4	Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz	12
2.1.5	Planck'sches Strahlungsgesetz	13
2.1.6	Farbtemperatur einer Glühlampe	15
2.2	Aufgabenstellung	17
2.3	Versuchsaufbau und Durchführung	17
2.3.1	Experimenteller Aufbau	17
2.3.2	Durchführung	19
2.4	Hinweise zu Protokollierung und Fehlerrechnung	19
2.5	Literaturangaben	19

Lehr/Lernziele

- Jeder Körper emittiert und absorbiert entsprechend seiner Temperatur elektromagnetische Strahlung (Wärme- oder Temperaturstrahlung).
- Die Gesetze der Strahlung schwarzer Körper (Hohlraumstrahler) werden behandelt.
- Ein Einstieg in die Quantenphysik soll vermittelt werden.
- Atomare Oszillatoren, die mit einer bestimmten Frequenz schwingen können Energie nicht kontinuierlich sondern nur in diskontinuierlichen Paketen (Quanten) aufnehmen oder abgeben. Die Energie dieser Quanten ist der Frequenz proportional.
- Es soll veranschaulicht werden, dass elektromagnetische Strahlung Quanteneigenschaften besitzt (Photonen).
- Es soll gezeigt werden, dass Atome nur in bestimmten Energiezuständen existieren. Strahlungsemission und Absorption entsprechen Übergängen im diskreten Energieniveauschema (Linienspektren).

0 Allgemeine Grundlagen

Das physikalische Verständnis der Versuche dieser Beispielgruppe (Fotoeffekt, Hohlraumstrahlung) beruht auf der Annahme, dass elektromagnetische Strahlung in quantisierten Energiepaketen vorkommt (Lichtquantenhypothese).

0.1 Zur Korpuskulartheorie des Lichtes

Bereits Newton ordnete Licht Teilcheneigenschaften zu. In seiner Korpuskulartheorie erklärte er die verschiedenen Farben durch Teilchenströme, die sich mit unterschiedlich hoher Geschwindigkeit geradlinig bewegen. Er nahm 'materielle' Teilchen an, die durch Einwirken von Kräften abgelenkt werden und Brechung, Reflexion und Beugung erklären sollten. Beobachtete Interferenzerscheinungen konnten aber nicht erklärt werden.

Die Wellentheorie (Huygens, Young, Fresnel), die auch die Beobachtungen zur Interferenz erklärte, löste die Newton'sche Teilchenvorstellung ab. Dem Wellenmodell lag die Annahme zugrunde, dass die Ausbreitung der Lichtwellen an ein Trägermedium dem sogenannten 'Lichtäther' gebunden ist. Maxwell erkannte die Natur der Lichtwellen als elektromagnetische Transversalwellen, die sich ohne Trägermedium unabhängig von der Frequenz mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Der sichtbare Wellenlängenbereich ist nur ein sehr klei-

ner Teil des gesamten elektromagnetischen Spektrums.

Die Experimente zur Wärme- oder Temperaturstrahlung und die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Materie konnten mit dem Wellenmodell der Strahlung nicht verstanden werden. Es wurde daher wieder auf Teilcheneigenschaften der Strahlung zurückgegriffen. Der neue Ansatz zur Korpuskulartheorie der Strahlung unterscheidet sich allerdings deutlich von den ursprünglichen Newton'schen Annahmen.

Die oszillierenden Atome eines strahlenden Körpers emittieren und absorbieren Strahlung nicht kontinuierlich, sondern in Energiepaketen, den Energiequanten, deren Energie proportional zur Frequenz ν der Strahlung ist. Als Proportionalitätsfaktor führte Planck rein empirisch die Größe h (später: Planck'sches Wirkungsquantum genannt) ein. Zunächst wurde der Begriff 'Quanten' nur als reine Rechengröße, ohne jede physikalische Bedeutung, verwendet. Erst nach der theoretischen Ableitung der Strahlungsgesetze durch Planck wurden sie als real existierende Größen anerkannt.

Einstein konnte mit der Erklärung des Fotoeffektes zeigen, dass elektromagnetische Strahlung selbst quantisiert existiert, also nicht kontinuierlich verfügbar ist sondern diskontinuierlich in Energiequanten (Photonen) von Vielfachen der Größe

$$E = h \cdot \nu. \quad (1)$$

Die Deutung des Fotoeffektes, der im Rahmen der klassischen elektromagnetischen Lichttheorie nicht erklärt werden kann, trug wesentlich zur Entstehung der Quantentheorie bei. Deshalb gehört dieser Versuch zu den Grundexperimenten der modernen Physik. Die Quantenphysik führte zum Welle-Teilchen-Dualismus, wobei in der quantenmechanischen Wahrscheinlichkeitsinterpretation Welle und Teilchen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit jeweils gleichzeitig miteinander existieren können.

1 Planck'sches Wirkungsquantum

1.1 Grundlagen

1.1.1 Begriffe

Energieschema (Bändermodell) in Metallen, Austrittsarbeit, äußerer und innerer Fotoeffekt, Lichtspektrum, Planck'sches Wirkungsquantum, Photon, Elektronenvolt, Einstein-Gleichung

1.1.2 Fotoeffekt

Fotoeffekt (auch fotoelektrischer Effekt) bezeichnet die Anregung oder Freisetzung elektrisch geladener Teilchen aus Materie, wenn diese mit Licht oder anderen elektromagnetischen Wellen bestrahlt wird. Es wird zwischen innerem und äußerem Fotoeffekt unterschieden. Innerer Fotoeffekt ist ein Begriff dafür, dass die Energie der einfallenden Strahlung ausreicht Elektronen vom Valenzband in das energetisch höher gelegene Leitungsband anzuheben (siehe Abbildung 1). Die elektrische Leitfähigkeit ändert sich daher mit der Bestrahlung.

1.1.3 Äußerer Fotoeffekt

Als äußeren Fotoeffekt bezeichnet man die Beobachtung, dass Elektronen aus einer metallischen Oberfläche bei Bestrahlung mit Licht freigesetzt werden. Bei Metallen ist das Leitungsband nicht vollbesetzt. Die Leitungselektronen sind frei in einem Potentialtopf beweglich. Bei der Temperatur $T = 0 \text{ K}$, sind alle Energiezustände bis zur Fermi-Kante (Fermi-Energie E_F) mit Elektronen besetzt (siehe Abbildung 1). Um Elektronen aus dem Metall abzulösen, müssen sie mit einer Energie angeregt werden, die mindestens der Austrittsarbeit entspricht. Sie wird in Elektronenvolt ($eV = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) gemessen. Bei Temperaturen über 0 K sind auch höhere Energiezustände mit Elektronen besetzt und daher tiefer liegende Energiezustände unbesetzt.

In der Abbildung 2 ist das Prinzip zur Messung des äußeren Fotoeffekts in einer Gegenfeld-Kompensationschaltung schematisch dargestellt. In einem evakuierten Glaskolben befindet sich eine Metallplatte (Kathode) und ihr gegenüber eine ringförmige Anode. Trifft Licht auf die Kathode, werden Elektronen herausgelöst und mit einem Amperemeter als Anodenstrom (Fotostrom I) nachgewiesen. Die kinetische Energie der Elektronen wird durch Anlegen einer Gegenspannung (U) in potentielle Energie umgewandelt. Zur Messung der Frequenzabhängigkeit der Gegenspannung wird monochromatisches Licht (hergestellt mit einem Interferenzfilter) verwendet. Für die Grenzspannung U_0 , bei der der Fotostrom gleich Null ist, gilt:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = eU_0 \quad (2)$$

1.1.4 Einsteingleichung

Nach der klassischen Wellentheorie werden die Elektronen durch die auftreffende elektromagnetische Strahlung zum Mitschwingen angeregt und nehmen Energie auf. Sobald die aufgenommene Energie die Austrittsarbeit überschreitet können sie die Metalloberfläche verlassen.

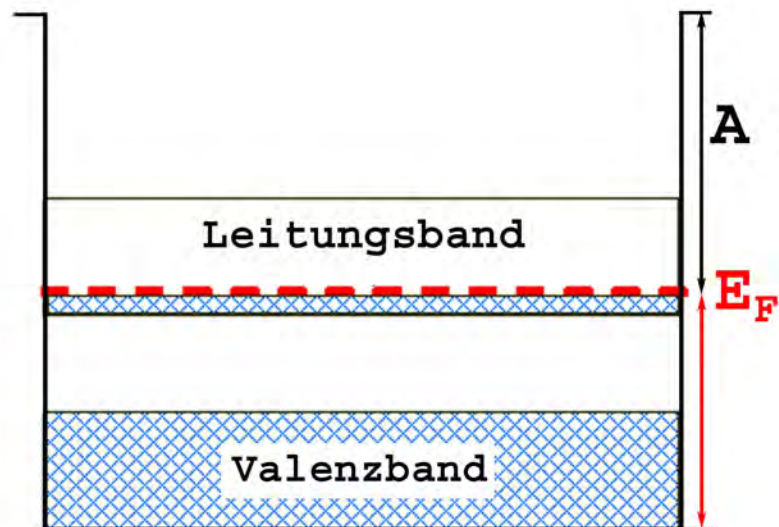


Abbildung 1: Energiebänder im Potentialtopf; E_F - Fermi-Energie, A - Austrittsarbeit.

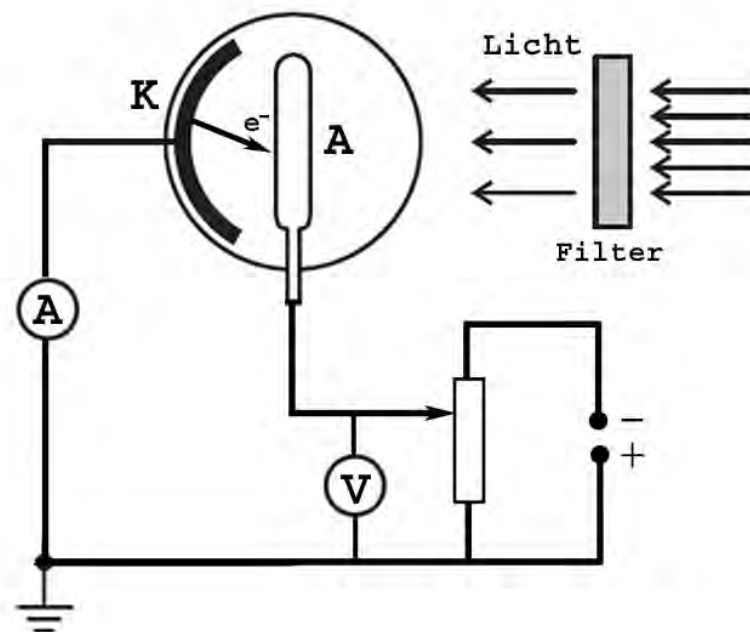


Abbildung 2: Gegenfeld-Kompensationsmethode schematisch dargestellt.

Zur Erklärung des Fotoeffektes im Rahmen der Wellentheorie werden folgende Beobachtungen erwartet:

- Der Fotostrom und die kinetische Energie der Elektronen sollten mit wachsender Lichtintensität zunehmen.
- Ein positiver Fotostrom müßte bei genügend hoher Lichtintensität für jede Frequenz des eingestrahlten Lichtes beobachtbar sein.

Beide Vorhersagen werden experimentell nicht bestätigt, gemessen hingegen wird:

- Mit zunehmender Intensität des einfallenden Lichtes einer Wellenlänge, steigt der Fotostrom tatsächlich proportional, aber die Elektronen erreichen den Anodenring immer mit der selben kinetischen Energie (also gleiche Gegenspannung).
- Es existiert eine untere Grenzfrequenz ν_g , bei der keine Elektronen ausgelöst werden. Mit zunehmender Frequenz nimmt die kinetische Energie der abgelösten Elektronen zu. Die Gegenspannung U_0 (bei Fotostrom Null) steigt mit der Lichtfrequenz.

Diese Beobachtungen stehen im Widerspruch zur klassischen Wellentheorie des Lichtes. Einstein erklärte die oben beschriebenen experimentellen Ergebnisse mit der Energiebilanzgleichung (Einstein-Formel):

$$h \cdot \nu = A + E_{kin} = A + eU_0 \quad (3)$$

Einfaches Umformen ergibt:

$$U_0(\nu) = \frac{h}{e} \cdot \nu - \frac{A}{e} \quad (4)$$

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
λ	m	Wellenlänge
ν	Hz, s^{-1}	Frequenz
h	Js	Planck'sches Wirkungsquantum
A	eV	Austrittsarbeit
U_0	V	Gegenspannung
v	m/s	Geshwindigkeit des Elektrons
E_{kin}	J, eV	kinetische Energie

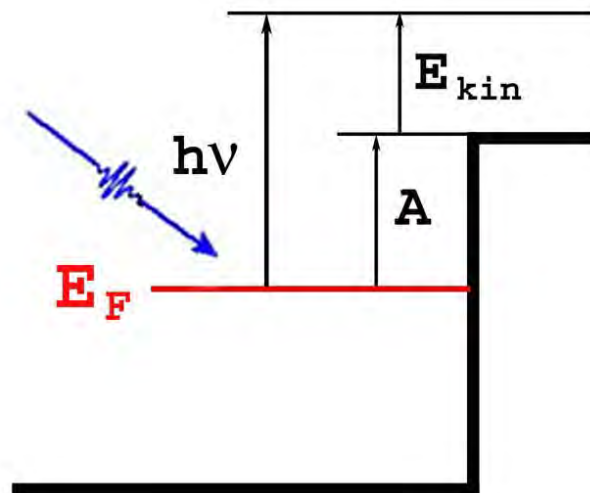


Abbildung 3: Energiebilanz entsprechend der Einsteingleichung.

Konstante	Wert	Bezeichnung
e	$1,602177 \cdot 10^{-19} C$	Elementarladung
c	$2,99792 \cdot 10^8 m/s$	Lichtgeschwindigkeit
m	$9,10939 \cdot 10^{-31} kg$	Masse des Elektrons
k	$1,38066 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$	Boltzmannkonstante

Licht besteht aus einem Strom von einzelnen Lichtquanten (Photonen) mit der Energie $h \cdot \nu$ (h : Planck'sches Wirkungsquantum). Ein Elektron wird von der Metalloberfläche nur dann abgelöst, wenn es Energie absorbiert, die größer ist als die Austrittsarbeit. Den Differenzbetrag behält das Elektron als kinetische Energie E_{kin} in Abhängigkeit der Lichtfrequenz (siehe Abbildung 3). Jedes Elektron (Fotolektron) absorbiert die Energie von einem Photon, denn die Wahrscheinlichkeit zwei Photonen zu absorbieren ist sehr gering. Die Zahl der Fotolektronen ist daher proportional zur Lichtintensität und ihre kinetische Energie nur von der Photonenenergie abhängig.

Die Einstein-Formel definiert einen lineareren Zusammenhang zwischen der Frequenz ν des eingestahlten Lichtes und der jeweils zugehörigen Gegenspannung U_0 (bei Fotostrom gleich Null). Durch geeignete Darstellung von Frequenz und Gegenspannung kann das Planck'sche Wirkungsquantum h , die Austrittsarbeit A und die untere Grenzfrequenz ν_g bestimmt werden.

Sehen Sie sich hierzu das Applet 1 zum Photoeffekt auf der eLearning Seite zu PS6 an.

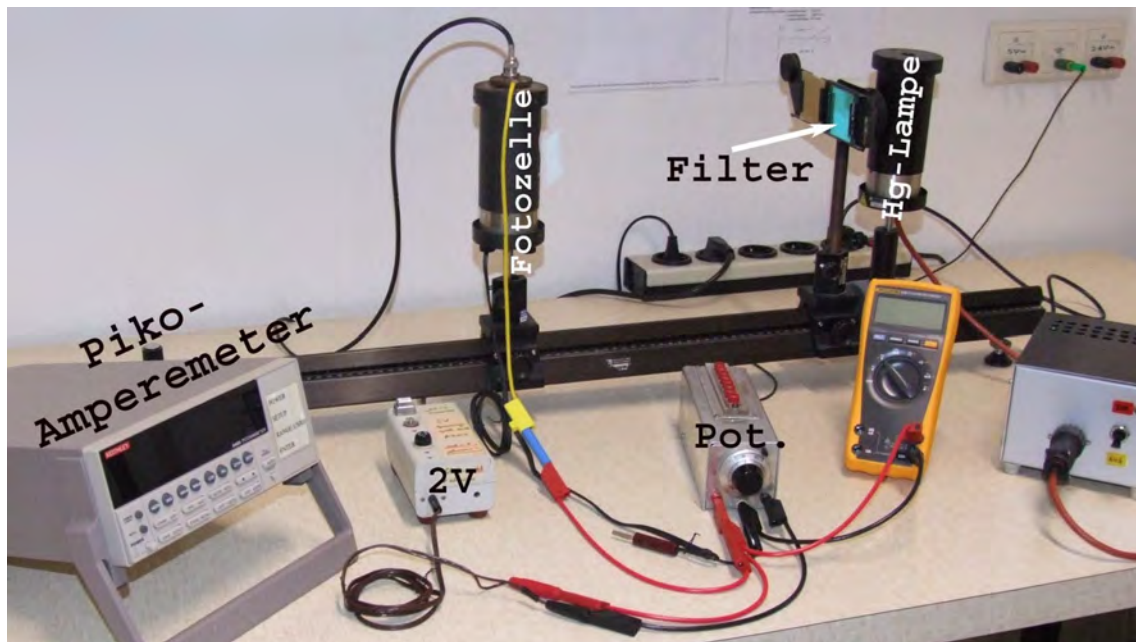


Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Messung des Planck'schen Wirkungsquantums (h).

1.2 Aufgabenstellung

1. Messen Sie den Fotostrom I als Funktion der Gegenspannung U im Bereich von 0 - 2 V für fünf verschiedene Frequenzen (siehe Tabelle) und stellen Sie I gegen U in einem Diagramm graphisch dar.
2. Bestimmen Sie zu jeder Frequenz (Wellenlänge) die Gegenspannung U_0 , bei der die schnellsten Elektronen den Anodenring gerade nicht mehr erreichen.
3. Stellen Sie entsprechend der Einsteingleichung die Spannung U_0 als Funktion der Frequenz ν graphisch dar und bestimmen Sie das Planck'sche Wirkungsquantum h , die Austrittsarbeit A der Fotokathode und die untere Grenzfrequenz ν_g .

1.3 Versuchsaufbau und Durchführung

1.3.1 Experimenteller Aufbau

Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 4 dargestellt. Als Lichtquelle wird eine Quecksilberdampfampe verwendet. Monochromatisches Licht wird mit dielektrischen Interferenzfiltern hergestellt. Die Fotozelle befindet sich in einem geerdeten Metallzylinder und besteht aus einer annähernd ebenen Fotokathode und einem etwa 10 mm entfernten Anodenring (siehe Abbildung 5). Die an der Kathode ausgelösten Elektronen gelangen auf den Anodenring und werden mit einem hochempfindlichen Pikoamperemter registriert (Fotostrom



Abbildung 5: Aufbau der Fotozelle.

I). Die regelbare Gegenspannung wird mit einem Potentiometer aus einem 2 V - Netzgerät erzeugt. Die elektrische Schaltung der Versuchsanordnung zeigt die Abbildung 6.

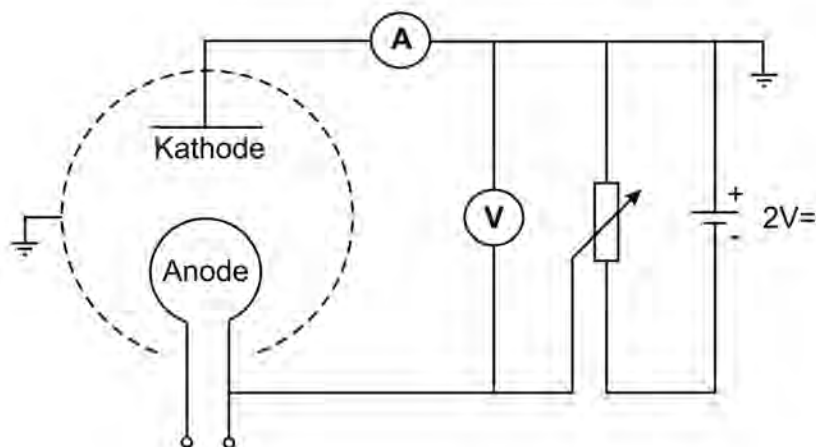


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues zur Messung des Planck'schen Wirkungsquantums.

Mit Applet 2 zum Fotoeffekt können Sie das Experiment interaktiv durchführen.

1.3.2 Hinweise zur Durchführung

- Die Fotozelle nicht ohne Filter beleuchten.
- Die optische Anordnung ist justiert und darf nicht zerlegt werden.
- Die elektrische Schaltung nicht zerlegen.
- Mit der Messung erst 15 Minuten nach einschalten der Quecksilberdampflampe und des Pikoamperemeters beginnen.
- Pikoamperemeter mit POWER - Knopf einschalten, SETUP drücken, mit RANGE auf USR0 stellen und ENTER drücken.

1.3.3 Versuchsdurchführung und Auswertung

Messen Sie den Anodenstrom (Fotostrom I) in Abhängigkeit der Gegenspannung U im Bereich von 0 bis 2 Volt. Führen Sie die Messung mit jedem der beiliegenden fünf dielektrischen Interferenzfilter (Wellenlängen und Frequenzen: siehe Tabelle) durch. Stellen Sie in einem Diagramm I gegen U graphisch dar. Mit zunehmender negativer Gegenspannung sinkt der Fotostrom I nicht auf Null (entsprechend der Einstein'schen Erklärung), sondern auf einen konstanten negativen Wert I_0 . Der Grund dafür sind geringe Mengen vom Kathodenmetall, die am Anodenring kondensieren. Es werden daher auch Elektronen an der Anode ausgelöst, die einen Gegenstrom I_0 erzeugen. Der Fotostrom $I - I_0$ nähert sich asymptotisch dem Wert Null an, da es für $T > 0$ K auch Leitungselektronen oberhalb der Fermikante gibt. Für die Geometrie der verwendeten Fotozelle gilt (wird hier ohne Beweis verwendet):

$$I - I_0 \propto U^2. \quad (5)$$

Tragen Sie daher $\sqrt{I - I_0}$ gegen U auf und extrapolieren Sie eine Gerade zum Schnittpunkt mit der U - Achse. Lesen Sie die damit eindeutig definierte Gegenspannung U_0 (auch die schnellsten Elektronen erreichen die Anode nicht mehr) ab. (**Achten Sie bei der graphischen Darstellung auf das Vorzeichen der Gegenspannung.**)

Stellen Sie in einem Diagramm die Gegenspannung U_0 gegen die Frequenz ν dar. Führen Sie eine lineare Regression durch und bestimmen Sie die Austrittsarbeit A und das Planck'sche Wirkungsquantum h . Entnehmen Sie aus dem Diagramm bei $U_0 = 0$ die untere Grenzfrequenz ν_g .

Wellenlänge	Frequenz
λ [nm]	$\nu = c/\lambda$ in 10^{14} Hz
578	5,187
543	5,521
434	6,908
407	7,366
365	8,213

1.4 Literaturangaben

- Standardwerke laut Praktikumsleitfaden.

2 Wärmestrahlung

2.1 Grundlagen

2.1.1 Begriffe

Schwarzer Körper, Hohlraumstrahlung, Strahlungsgesetze, Lichtstärke, Beleuchtungsstärke, Energiequanten

2.1.2 Wärmestrahlung

Jeder Körper tauscht mit seiner Umgebung Wärme aus. Neben Wärmeströmung und Wärmeleitung erfolgt der Austausch auch über Wärmestrahlung. In dieser Praxiseinheit werden die Gesetze zur Wärmestrahlung behandelt. Wärmestrahlung ist wie auch Licht von elektromagnetischer Natur in einem bestimmten von der Temperatur abhängigen Wellenlängenbereich (sichtbar und unsichtbar).

Körper emittieren bei jeder Temperatur Strahlung. Die Elektronen der schwingenden Atome bewegen sich beschleunigt und emittieren damit elektromagnetische Strahlung. Bei hohen Temperaturen liegt ein Teil der emittierten Strahlung im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Schaltet man z.B. eine Herdplatte ein, so gibt sie zunächst Wärme ab und mit steigender Temperatur erscheint sichtbares Licht. Ein Eisenstab, den wir erhitzen glüht von dunkel über rot zu weiß. Mit steigender Temperatur nimmt der kurzwellige blaue Anteil des Spektrums zu. Zur Analyse und Charakterisierung der spektralen Intensitätsverteilung der elektromagnetischen Wärmestrahlung wird ein idealer Strahler (schwarzer Strahler oder schwarzer Körper) verwendet, der unabhängig von seiner materiellen Beschaffenheit Strahlung emittiert und absorbiert.

2.1.3 Schwarzer Körper

Der Begriff des idealen schwarzen (nur in der Theorie existierenden) Körpers wurde von Gustav Kirchhoff eingeführt. Ein schwarzer Körper absorbiert die gesamte auf ihn auftreffende elektromagnetische Strahlung und wandelt sie in Wärme um. Experimentell gut angenähert ist ein schwarzer Körper durch einen erhitzten Hohlraum mit einer sehr kleinen Öffnung (siehe Abbildung 7). Die durch die Öffnung eintretende Strahlung wird an den Wänden reflektiert und vollständig absorbiert (entsprechend der Definition des schwarzen Körpers). Im Hohlraum steht die Strahlung modelliert durch Oszillatoren (Resonatoren) im thermischen Gleichgewicht mit den Wänden, die auf einer bestimmten Temperatur T gehalten werden. Dies bedeutet, dass die Innenwände ständig Strahlung absorbieren und emittieren. Es entstehen stehende elektromagnetische Wellen, deren Wellenlängen durch

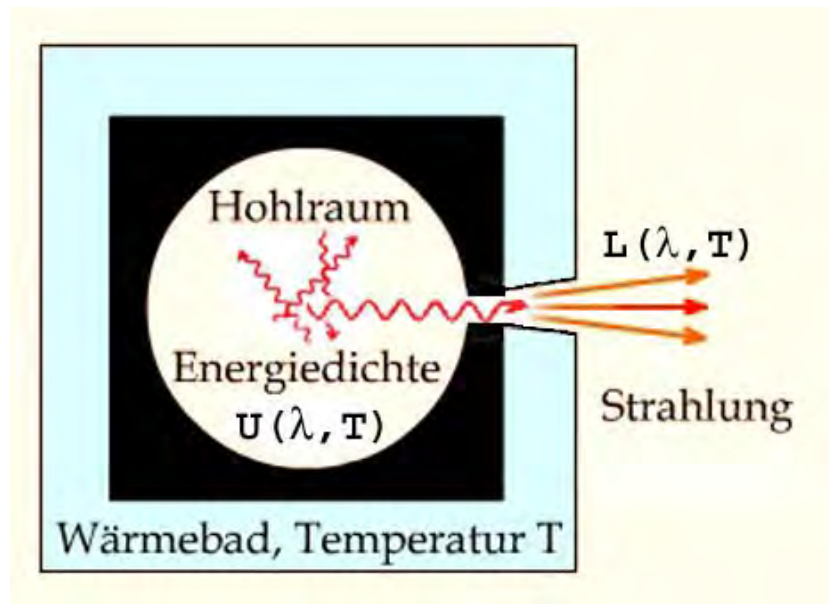


Abbildung 7: Schwarzer Körper durch einen Hohlraumstrahler realisiert.

die Eigenschwingungen im Hohlraum definiert sind. Die Energiedichte $U(\lambda, T)$ der Hohlraumstrahlung ist unabhängig vom Material der Wände, die den Hohlraum begrenzen. Sie ist homogen, isotrop und ausschließlich eine Funktion der Temperatur und Wellenlänge. Die aus dem Hohlraum austretende Strahlung $L(\lambda, T)$ (spektrale Strahldichte) wird als Schwarzkörper- oder Hohlraumstrahlung bezeichnet. Die Öffnung muss klein sein, damit das thermische Gleichgewicht im Hohlraum erhalten bleibt. Andererseits soll sie groß genug sein, um vernünftig viel austretende Strahlung messen zu können. Bei genügend hohen Temperaturen hat ein 'schwarzer Strahler' nicht mehr die Farbe 'schwarz'. Die Sonne ist z.B. in guter Näherung ein strahlender schwarzer Körper.

Die räumlich konstante spektrale Energiedichte $U(\lambda, T)$ der Strahlung im Hohlraum und die abgestrahlte spektrale Strahldichte $L(\lambda, T)$ unterliegen dem Planck'schen Strahlungsgesetz.

2.1.4 Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz

Nach dem aus der Thermodynamik folgenden Kirchhoff'schen Strahlungsgesetz ist das Verhältnis des Emissionsvermögens zum Absorptionsvermögen bei einer bestimmten Wellenlänge und gegebener Temperatur für alle Körper gleich. Ein Körper strahlt daher umso besser, je wirksamer er Strahlung absorbiert. Der ideale schwarze Körper oder Hohlraumstrahler absorbiert die gesamte einfallende Strahlung und hat daher maximales Emissionsvermögen. Dem Kirchhoff'schen Gesetz folgend ist (bei gegebener Wellenlänge und Temperatur) das Verhältnis von Emissionsvermögen zu Absorptionsvermögen eines Körpers gleich dem Emissionsvermögen des schwarzen Körpers bei gleicher Temperatur und Wellenlänge.

Ein Körper, der für alle Wellenlängen nur einen Bruchteil der auftreffenden Strahlung absorbiert ist ein grauer Strahler. Die in diesem Beispiel verwendete Glühlampe mit erhitztem Wolframfaden hat einen Emmissionskoeffizienten von ca. 0.47. Wird die gesamte Strahlung reflektiert (Absorption null und Reflexion eins) spricht man von einem weißen Körper oder idealen Spiegel.

2.1.5 Planck'sches Strahlungsgesetz

Nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz strahlt ein schwarzer Körper in einem Wellenlängenbereich $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ die von der Temperatur abhängige Energie $L(\lambda, T) \cdot d\lambda$ pro Sekunde, Flächeneinheit und Raumwinkel ab (Abbildung 8). $L(\lambda, T)$ ist die gerichtete (in einen definierten Winkelbereich) spektrale Strahldichte.

$$L(\lambda, T) \cdot d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \cdot d\lambda \quad (6)$$

Der Raumwinkel Ω ist definiert als Teilfläche einer Kugel dividiert durch das Quadrat des Radiuses der Kugel. Er hat die Einheit Steradian (sr) mit der Dimension 1. Der gesamte Raumwinkel beträgt 4π .

Einschub:

Die spektrale Energiedichte $U(\lambda, T)$ im Hohlraum multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit c ist der Energiefluss, der gleichzusetzen ist mit der, in den gesamten Raum (Raumwinkel 4π) abgestrahlten Energie pro strahlender Fläche (spektralen Strahldichte $L(\lambda, T)$):

$$U(\lambda, T) = \frac{4\pi}{c} \cdot L(\lambda, T) \quad (7)$$

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
T	K	Temperatur
σ	W/m^2K	Stefan - Boltzmann Konstante
k	JK^{-1}	Boltzmannkonstante
h	Js	Planck'sche Wirkungsquantum
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
λ	m	Wellenlänge
$L(\lambda, T)$	$W/m^2nm^{-1}sr$	spektrale Strahldichte
$U(\lambda, T)$	$J/m^3nm^{-1}sr$	spektrale Energiedichte
Ω	Steradian [sr]	Raumwinkel

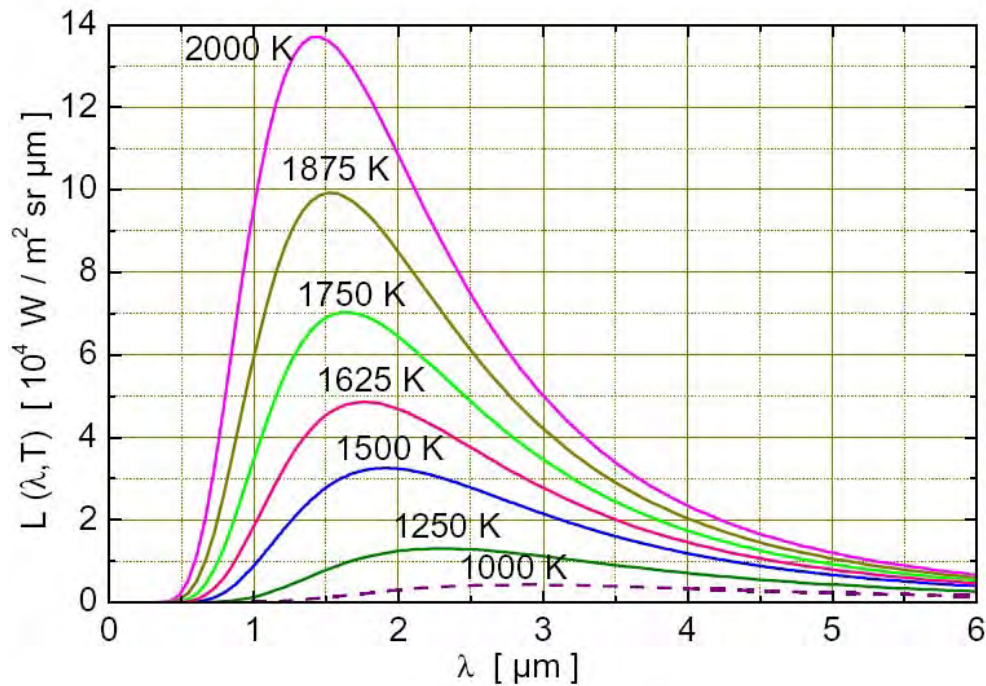


Abbildung 8: Spektrale Strahldichte der Schwarzkörperstrahlung. Mit sinkenden Temperatur verschiebt sich das Maximum der Intensität zu längeren Wellenlängen

Sehen Sie sich hierzu das **Applet zum Planck'schen Strahlungsgesetz** auf der **eLearning Seite zu PS6** an.

Die elektromagnetische Strahlung im Hohlraum ist modelliert aus harmonischen Eigenschwingungen (Oszillatoren, stehende Wellen). Die mittlere Energie der Schwingungsmoden ist quantisiert, sie steht nicht kontinuierlich zur Verfügung sondern in Form von Energiequanten von Vielfachen von $h \cdot \nu$ (h - Planck'sches Wirkungsquantum, ν - Frequenz). Es sind nicht alle Eigenschwingungen mit Energiequanten gleichmäßig angeregt, sondern mit einer aus der statistischen Thermodynamik folgenden Anregungswahrscheinlichkeit (\rightarrow Bose - Einstein Statistik).

Die Quantisierung der Energie steht im Gegensatz zum Postulat der klassischen Thermodynamik, dass die Eigenschwingungen kontinuierlich dem Äquipartitionsprinzip entsprechend, Energie aufnehmen und abgeben können.

Für kleine Frequenzen folgt mit der Annahme $h \cdot \nu \ll k \cdot T$ das Gesetz von Rayleigh-Jeans. Bei hohen Frequenzen ($h \cdot \nu \gg k \cdot T$) nimmt die Strahlungsdichte exponentiell ab (Wien'sches Strahlungsgesetz). Beide Näherungsformeln wurden mit den Gesetzen der klas-

sischen Thermodynamik und Elektrodynamik hergeleitet, erklären aber nicht korrekt die Strahlungsemission über den gesamten Frequenzbereich des Strahlers.

Detailliertere Abhandlungen finden Sie in der Grundlagen-Vertiefung auf der eLearning Seite von PS6.

Das Integral der spektralen Strahldichte $L(\lambda, T)$ bei der Temperatur T über den gesamten Wellenlängenbereich und über alle Richtungen des Halbraumes, ergibt die gesamte Strahlungsleistung (spezifische Ausstrahlung) $P(T)$ pro strahlender Fläche (Stefan-Boltzmann Gesetz):

$$P(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right] \quad (9)$$

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
P	W/m^2	abgestrahlte Leistung
σ	$W/m^2 K$	Stefan - Boltzmann Konstante

Detailliertere Abhandlungen finden Sie in der Grundlagen-Vertiefung auf der eLearning Seite von PS6.

2.1.6 Farbtemperatur einer Glühlampe

Zur fotometrischen Auswertung der Strahlungsgesetze eignet sich Licht einer Glühlampe, die mit unterschiedlichen Glühfadentemperaturen strahlt.

Detailliertere Abhandlungen finden Sie in der Grundlagen-Vertiefung auf der eLearning Seite von PS6.

Bei definierter Wellenlänge λ und Temperatur T ist die Lichtstärke I der Strahlungsquelle ein Maß für die spektrale Strahldichte $L(\lambda, T)$ bei dieser Wellenlänge. Für zwei verschiedene Betriebsbedingungen der Glühlampe (Strahlungstemperaturen T_1 und T_2) gilt:

$$\frac{L(\lambda, T_1)}{L(\lambda, T_2)} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\exp(ch/k\lambda T_2)}{\exp(ch/k\lambda T_1)} \quad (10)$$

wobei $\exp(ch/k\lambda T) \gg 1$ angenommen wird. Diese Annahme ist gerechtfertigt, weil der sichtbare Strahlungsbereich einer Glühlampe (relativ niedrige Strahlungstemperatur der Glühwendel) dem Wien'schen Strahlungsgesetz gehorcht.

Die obige Formel logarithmiert ergibt:

$$\ln \frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \cdot \frac{ch}{k\lambda} \quad (11)$$

Die zugeführte elektrische Leistung P wird entsprechend dem Stefan - Boltzmann'schen Gesetz in Strahlung umgewandelt, so dass gilt:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1^4}{T_2^4} \quad (12)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 12 in Gleichung 11 folgt weiter:

$$\ln \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{T_1} \cdot \left(\sqrt[4]{\frac{P_1}{P_2}} - 1 \right) \cdot \frac{ch}{k\lambda} \quad (13)$$

Die Beleuchtungsstärke der Lichtquelle ist direkt proportional zur ihrer Lichtstärke I und verkehrt proportional zum Quadrat des Abstandes von der Lichtquelle. Bei gleicher Beleuchtungsstärke in beiden Betriebsbedingungen folgt das Verhältnis der Lichtstärken I_1/I_2 aus:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad (14)$$

Daher entspricht Verhältnis der Lichtstärken I_1/I_2 auch dem Verhältnis der Anstiege der Beleuchtungsstärken gegen $1/r^2$.

Die Temperaturen T_1 und T_2 sind aus den Gleichungen 12, 13 und 14 berechenbar.

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
P_1, P_2	W	elektrische Leistungen
I_1, I_2	Candela [cd]	Lichtstärken
T_1, T_2	K	Temperaturen
r_1, r_2	m	Abstände

Detailliertere Abhandlungen finden Sie in der Grundlagen-Vertiefung auf der eLearning Seite von PS6.

2.2 Aufgabenstellung

1. Tragen Sie in einem Diagramm die der Beleuchtungsstärke proportionale Spannung in mV gegen $\frac{1}{r^2}$ für zwei Betriebsbedingungen (vom Betreuer erfragen) der Glühlampe auf.
2. Bestimmen Sie die jeweils zugehörigen elektrischen Leistungen P_1 und P_2 .
3. Berechnen Sie für beide Betriebsbedingungen die Strahlungstemperaturen der Glühlampe

2.3 Versuchsaufbau und Durchführung

2.3.1 Experimenteller Aufbau

Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 10 schematisch dargestellt. Ein dielektrischer Interferenzfilter ($\lambda = 560nm$) erzeugt monochromatisches Licht, das auf eine im Abstand r von der Glühlampe entfernte Fotozelle trifft. Der elektrische Strom in der Fotozelle ist der Beleuchtungsstärke proportional. Ein Strom - Spannungswandler (Abbildung 9) erzeugt eine dem Fotostrom proportionale Spannung.

Die Strom - Spannungsversorgung der Glühlampe erfolgt über einen Netztrafo. Drei verschiedene Betriebsbedingungen (A, B und C) für die Glühlampe sind wählbar (elektrische Schaltung siehe Abbildung 11).

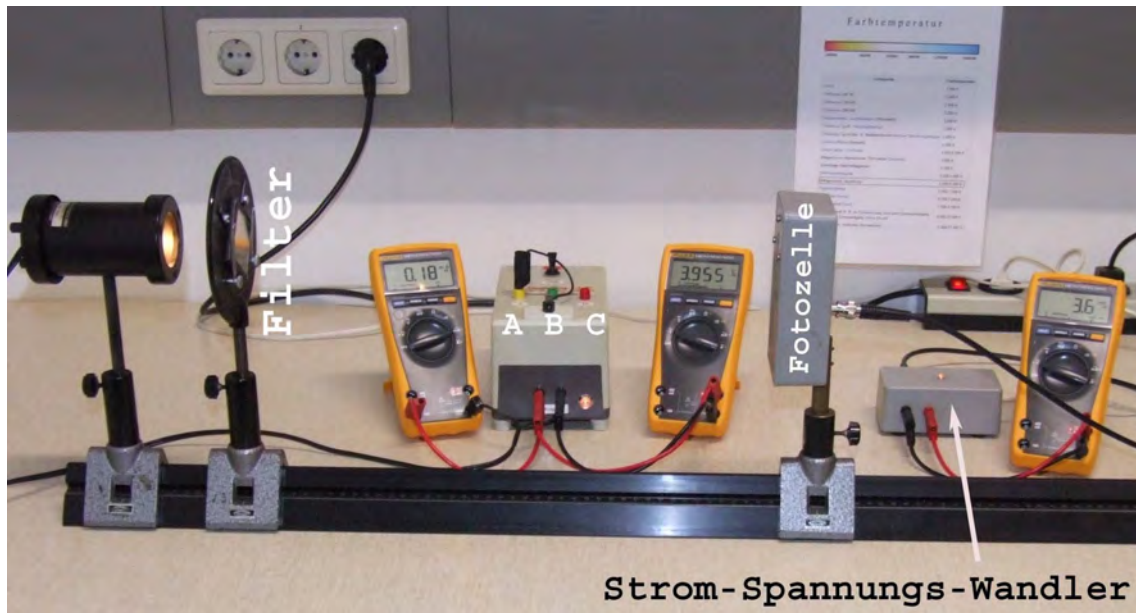


Abbildung 9: Versuchsaufbau zur Messung der Strahlungstemperatur einer Glühlampe.

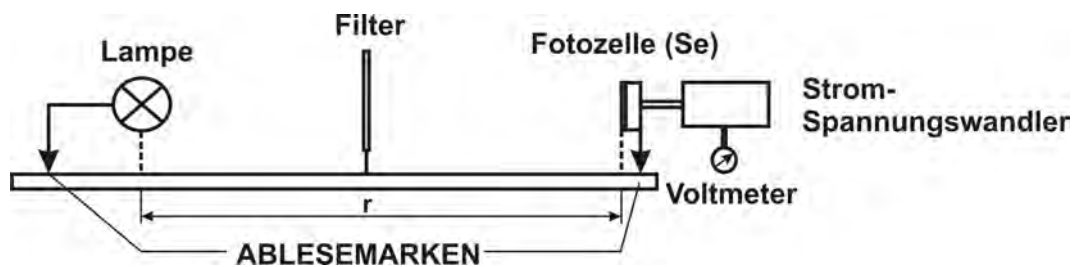


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues (Strahlungstemperatur einer Glühlampe).

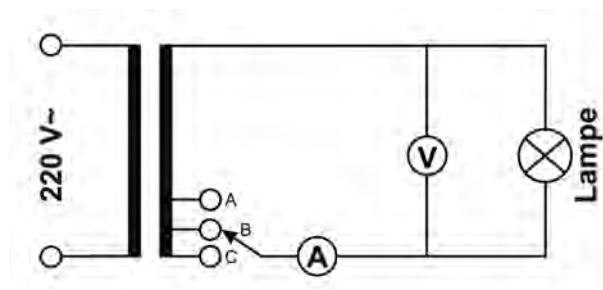


Abbildung 11: Elektrisches Schaltbild mit Glühlampe.

2.3.2 Durchführung

Erfragen Sie von Ihrem Betreuer zwei verschiedene Betriebsbedingungen der Glühlampe. Messen Sie für beide Betriebseinstellungen jeweils die Spannung an der Fotozelle für verschiedene Abstände r von der Glühlampe. Tragen Sie in einem Diagramm die Spannung an der Fotozelle gegen $1/r^2$ für beide Strahlungsbedingungen der Glühlampe auf. Welchen graphischen Zusammenhang erwarten Sie?

Beachten Sie folgende Hinweise:

- Abstand Ablesemarke - strahlende Fläche: $38 \pm 1 \text{ mm}$.
- Abstand Ablesemarke - Fotozelle: $17,5 \pm 0,5 \text{ mm}$.
- Der Abstand r soll den Wert 50 cm nicht unterschreiten.

Bestimmen Sie aus diesem Diagramm das Verhältnis der Lichtstärken I_1/I_2 (Gleichung 14). Messen Sie die den beiden Betriebsbedingungen zugehörigen elektrischen Leistungen P_1 und P_2 . Berechnen Sie die beiden Strahlungstemperaturen T_1 / T_2 (Gleichungen 12 und 13).

2.4 Hinweise zu Protokollierung und Fehlerrechnung

Lesen und verwenden Sie den Praktikumsleitfaden bei der Erstellung der Diagramme und Ausarbeitung des Protokolls zu dieser Praktikumseinheit.

Führen Sie eine Fehlerrechnung nach den Gesetzen der Fehlerfortpflanzung durch und überlegen Sie welche Messfehler besonders wichtig und welche weniger von Bedeutung für das Ergebnis sind. Beachten Sie für die Strahlungstemperatur die vierte Wurzel aus dem Leistungsverhältnis.

2.5 Literaturangaben

- Standardwerke laut Praktikumsleitfaden.