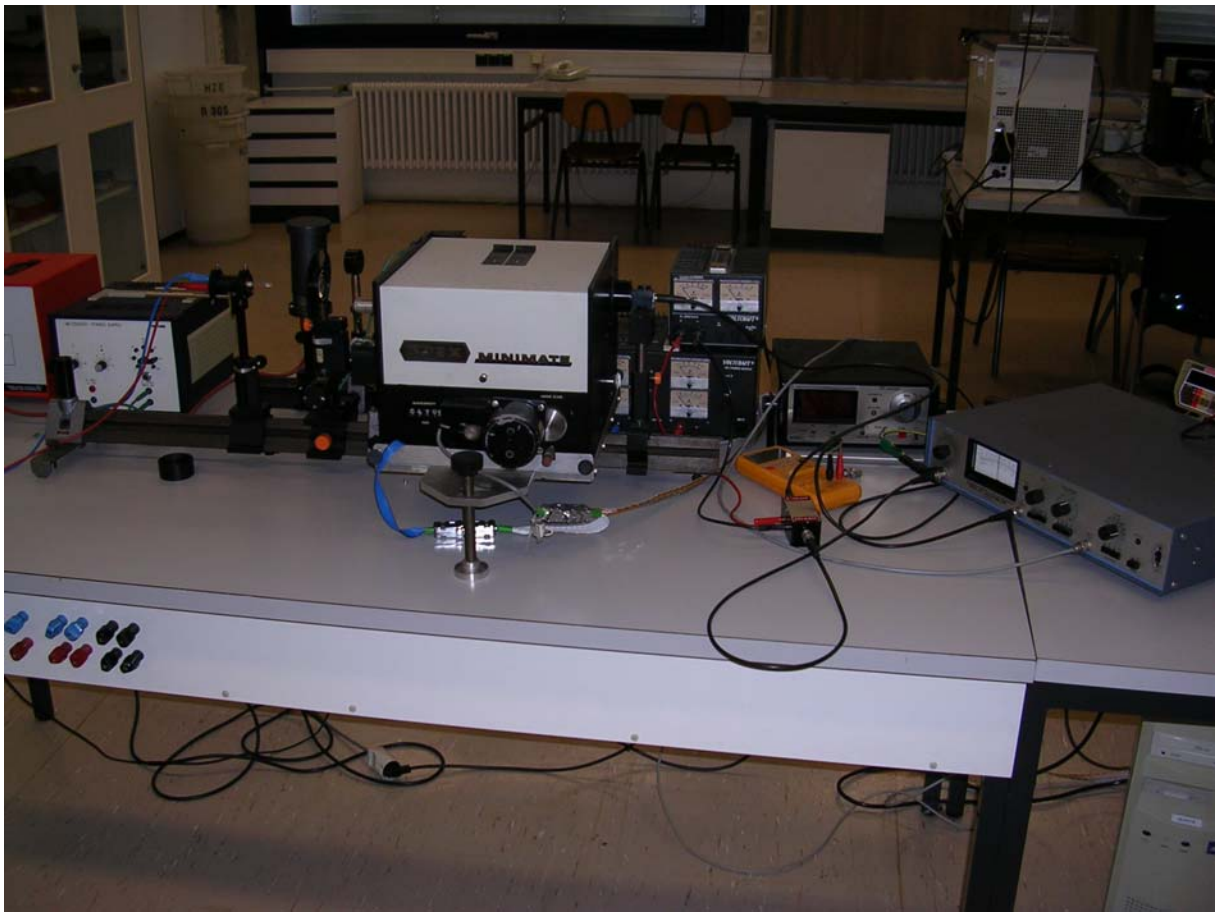
V Optische Eigenschaften von Halbleitern für WI 2



1 Physikalische Grundlagen

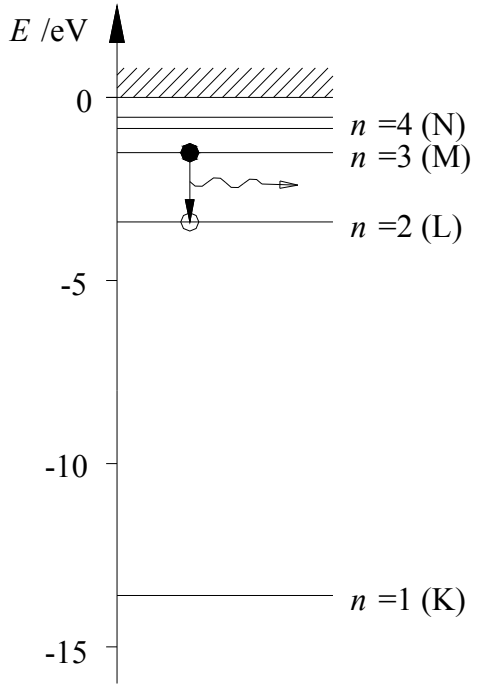
1.1 Quantenphysik

Bei der Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit Materie kommt die Quantennatur der Strahlung zum Vorschein. Nach EINSTEIN kann Strahlung aufgefasst werden als ein Strom von *Lichtquanten* oder *Photonen*, deren Energie zur Frequenz der elektromagnetischen Welle proportional ist:

$$E_{\mathrm{ph}} = hf = \frac{hc}{\lambda}, \qquad (1)$$

mit hc = 1,24 µm eV.

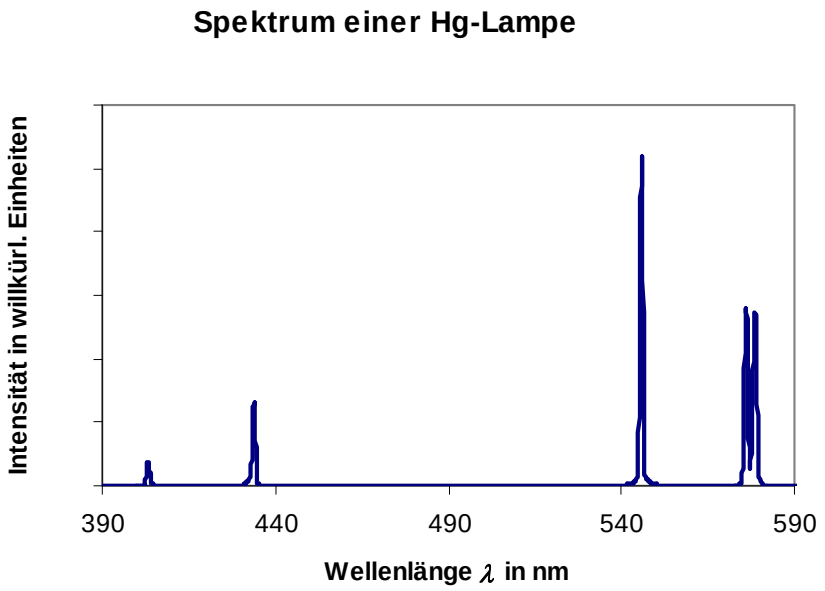
Sendet ein Körper Licht aus, so sind damit stets Elektronenübergänge von einem hohen auf ein niedriges Energieniveau verknüpft. Umgekehrt wird bei der Absorption die Energie der Lichtquanten benutzt, um Elektronen auf höhere Energieniveaus zu heben. Die umgesetzte Photonenenergie entspricht dabei stets der Differenzenergie der beteiligten elektronischen Energieniveaus.

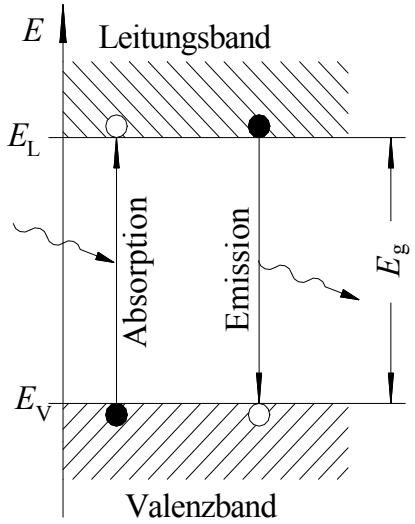


In isolierten Atomen, wie sie z.B. in den Gasen von Spektrallampen vorliegen, können sich Elektronen energetisch gesehen nur auf ganz scharf definierten Energieniveaus aufhalten. Die Abbildung zeigt das Energieniveauschema von Wasserstoff. Macht hier ein Elektron z.B. einen Übergang von $n = 3$ nach $n = 2$, so wird die Energie $E_{ph} = 1{,}89$ eV frei und daher nach Gl. (1) Licht einer wohl definierten Wellenlänge von $\lambda = 656$ nm (rot) emittiert.

Das Licht von Spektrallampen besteht immer aus mehreren scharf definierten Wellenlängen, sogen. Spektrallinien.

Das unten stehende Beispiel eines solchen Spektrums stammt von einer Quecksilber-Spektrallampe.



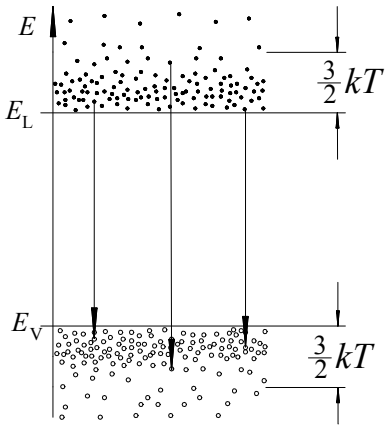


In Festkörpern sind die erlaubten Energieniveaus der Elektronen in Bändern angeordnet. Bei Halbleitern wird das oberste, auch bei tiefen Temperaturen mit Elektronen gefüllte Band als *Valenzband* (VB) bezeichnet, das durch eine verbotene Zone vom *Leitungsband* (LB) getrennt ist. Die Breite der verbotenen Zone, die *Energielücke* (gap), liegt in der Größenordnung von 1 Elektronenvolt (z.B. Si: E_g = 1,11 eV, GaP: E_g = 2,26 eV).
Da die Elektronen innerhalb eines Bandes keine scharf definierte Energie besitzen, ist das bei einem Elektronenübergang emittierte Licht spektral relativ breitbandig.

Das Leitungsband ist bei tiefen Temperaturen leer. Bei höherer Temperatur werden durch thermisch angeregte Gitterschwingungen Bindungen zwischen benachbarten Atomen aufgebrochen. Die Elektronen, die vorher an festen Plätzen gebunden waren, werden jetzt im Kristall frei beweglich, wodurch eine elektrische Leitung möglich wird. Im Bändermodell entspricht dieser Vorgang einer Anhebung von Elektronen vom VB ins LB. Dabei wird das LB mit Elektronen besetzt, während in der Elektronenverteilung des VB *Löcher* (Defektelektronen) entstehen, die ihrerseits beweglich sind und ebenfalls zur Leitfähigkeit beitragen.

1.2 Emission aus Halbleitern

Trifft ein freies Elektron auf ein Loch, so kann die aufgebrochene Bindung restauriert werden. Bei diesem, als *Rekombination* bezeichneten Vorgang, geht im Bändermodell ein Elektron aus dem Leitungsband ins Valenzband über. Die dabei frei werdende Energie von der Größenordnung E_g wird entweder in Form von Wärme (Gitterschwingungen) oder als Lichtquant abgegeben.



Die freien Elektronen und Löcher haben eine thermische Energieverteilung mit einer mittleren Energie von $\frac{3}{2}\,kT$. Bei der Emission entsteht daher Strahlung mit einer energetischen Bandbreite von etwa

$$\Delta E \approx 3kT\,. \qquad (2)$$

$k = 8{,}617 \cdot 10^{-5}$ eV/K: Boltzmann-Konstante,
T: absolute Temperatur in Kelvin.

Die *strahlende Rekombination* wird bei der Lumineszenzdiode (**L**ight **E**mitting **D**iode, LED) und beim Halbleiterlaser ausgenutzt.

1.3 Absorption in Halbleitern

Bei der Absorption elektromagnetischer Strahlung wird die Photonenenergie benutzt, um Elektronen vom VB ins LB zu heben, man spricht hier von der *Generation* eines freien Elektron-Loch-Paars. Demzufolge können nur Photonen absorbiert werden, für die gilt:

$$E_{\mathrm{ph}} \geq E_{\mathrm{g}} = \frac{hc}{\lambda_{\mathrm{g}}} . \qquad (3)$$

Ein Halbleiter wirkt deshalb immer als *Kantenfilter*, d.h. er ist für Wellenlängen $\lambda > \lambda_{\mathrm{g}}$ transparent, für $\lambda < \lambda_{\mathrm{g}}$ wird dagegen die Strahlung absorbiert.

In einem absorbierenden Halbleiter nimmt die Strahlungsleistung (Photonenfluss) nach innen exponentiell ab. Hat die in den Halbleiter eindringende Strahlung unmittelbar an der Oberfläche die Strahlungsleistung Φ_0, so ist die Strahlungsleistung Φ nach Durchlaufen der Schichtdicke d

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \mathrm{e}^{-\alpha \cdot d} ; \qquad (4)$$

$\alpha(\lambda)$ ist der wellenlängenabhängige *Absorptionskoeffizient*, der sich bestimmen lässt aus

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln\left(\frac{\Phi}{\Phi_0}\right). \qquad (5)$$

Bei der *Photodiode* erzeugt ein absorbiertes Photon ein freies Elektron-Loch-Paar, das aufgrund des inneren elektrischen Feldes bzw. der außen anliegenden Sperrspannung getrennt wird und als *Photostrom* in Erscheinung tritt. Der Photostrom ist exakt proportional zur absorbierten Strahlungsleistung.

2 Messtechnik

2.1 Wellenlängenmessung

Die Wellenlänge der Strahlung wird mit Hilfe eines *Monochromators* (Gitterspektrometer) gemessen. Beim verwendeten Typ (CZERNY-TURNER-Anordnung) wird das zu untersuchende Licht durch einen Eintrittsspalt über Spiegel auf ein Reflexionsgitter gelenkt. Durch Beugung am Gitter wird das Licht je nach Wellenlänge in verschiedene Richtungen abgelenkt, d.h. spektral zerlegt. Der Austrittsspalt an der Rückwand des Monochromators läßt nur den Anteil des Lichts durch, der an die Stelle des Austrittsspalts gebeugt wird. Da der Sinus des Beugungswinkels zur Wellenlänge proportional ist, lässt sich die Durchlassstellung durch Drehen des Gitters für jede gewünschte Wellenlänge einstellen. Beim eingebauten Gitter geht der nutzbare Wellenlängenbereich von UV bis $\lambda = 1$ µm. Die vom Monochromator durchgelassene Wellenlänge lässt sich von Hand einstellen oder über einen Schrittmotor von einem Rechner aus.

2.2 Strahlungsempfänger

Als Detektor dient eine in Sperrrichtung ($U_{\mathrm{R}} = 5$ V) betriebene Si-Photodiode. Zur Erhöhung des Signal-Rausch-Verhältnisses wird die *Lock-in-Technik* angewandt. Dazu wird der Lichtstrom der Lichtquelle mit einem mechanischen Chopper zerhackt (Chopfrequenz zwischen 50

und 200 Hz). Die eingestellte Chop-Frequenz wird als Referenzfrequenz einem Lock-in-Verstärker mit phasenempfindlichem Gleichrichter zugeführt, der nur Signale verstärkt, die mit dieser Frequenz ankommen, während alle anderen Frequenzen unterdrückt werden. Das analoge Ausgangssignal des Lock-in-Verstärkers wird mittels eines Digitalvoltmeters mit A/D-Wandler digitalisiert und über einen IEC-Bus einem Rechner zugeführt.

3 Messung

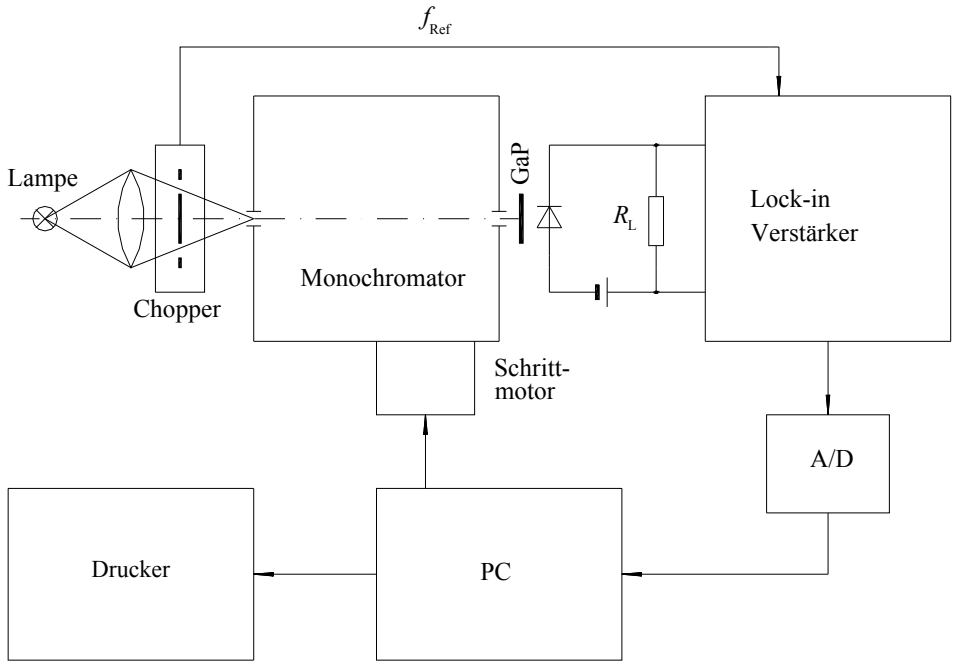
Vor jeder Messreihe und nach jeder Veränderung einer Systemkomponente sollten die jeweilige Lichtquelle, die Linse und evtl. auch die Photodiode sinnvollerweise bei einer Wellenlänge mit möglichst hoher Intensität so justiert werden, dass das Analoginstrument am Lock-in-Verstärker einen möglichst hohen Ausschlag zeigt. Ggf. Messbereich umstellen.

3.1 Kalibrierung des Monochromators

Kalibrieren Sie das Spektrometer mit Hilfe einer vor dem Eintrittsspalt aufgestellten Hg-Spektrallampe bei verschiedenen Wellenlängen. Beobachten Sie dazu mit 0,25 mm Ein- und Austrittsspalt beim Vorbeilaufen der Spektrallinien am Austrittsspalt deren Intensität. Der Wellenlängenvortrieb erfolgt von Hand (Rändelschraube der Motorjustierung lösen und diesen wegschieben) durch Drehung im Uhrzeigersinn (toter Gang). Notieren Sie die Wellenlängenanzeige, bei der Sie jeweils die größte Helligkeit beobachten.

Erstellen Sie eine Tabelle, welche neben den Literaturwerten 404,7 nm; 407,8 nm; 435,8 nm (violett); 491,6 nm (blau); 546,1 nm (grün); 577,0 nm und 579,1 nm (gelb) Ihre eigenen Ergebnisse enthält, sowie die Abweichungen zwischen den Mess- und Literaturwerten.

3.2 Absorptionskante von GaP



Bauen Sie die Anordnung nach obigem Blockschaltbild auf. Als Lichtquelle dient entweder eine Halogenlampe oder eine weiße LED. Der Abstand des Lampenreiters und der Linse von der Monochromatorwand wird so gewählt, dass ein maximales Empfängersignal entsteht. Ziel der Messung ist die Bestimmung des Absorptionskoeffizienten $\alpha(\lambda)$ nach Gl. (5) sowie des Bandgaps E_g des Halbleiters. Es müssen also zwei Messungen gemacht werde. Die erste liefert $\Phi_0(\lambda)$, die zweite $\Phi(\lambda)$.

1. **Nullmessung**
   Ohne Halbleiter im Strahlengang wird das Spektrum $\Phi_0(\lambda)$ der Lampe zwischen 500 und 600 nm gemessen. Dieses setzt sich zusammen aus dem Emissionsspektrum $\Phi_e(\lambda)$ der Lampe, der Durchlasscharakteristik $\tau(\lambda)$ des Monochromators und der Empfindlichkeit $S(\lambda)$ der Photodiode.

   Experimentelle Details:
   Die Anordnung so justieren, dass bei λ_{max} = 600 nm das Analoginstrument am Lock-in-Verstärker auf Vollausschlag steht. Der endgültige Abgleich erfolgt durch Verstellung der Phase am Lock-in-Verstärker. Bei Abdeckung der Lampe muss das Signal null sein, wenn nicht, dann mit "zero offset" auf null regeln. Die Steuerung des Experiments wird vom Rechner aus vorgenommen. Wählen Sie im Hauptmenü des Programms SPEKTRAL-ANALYSE den Menüpunkt „Absorptionsmessung“. Die gemessenen Werte werden gespeichert und auf dem Bildschirm dargestellt.

2. **Messung mit Halbleiterkristall**
   Am Austrittsspalt des Monochromators wird der GaP-Kristall angebracht. Das gemessene Signal entspricht der durchgelassenen Strahlungsleistung $\Phi(\lambda)$. Wieder muss bei λ = 600 nm der Verstärker Vollausschlag zeigen (empfindlichere Verstärkerstufe, zero offset, Phase). Das Signal wird gespeichert und die Kurve auf dem Bildschirm dargestellt.

ACHTUNG !
GaP-Kristall ist sehr spröde.
Nicht berühren!

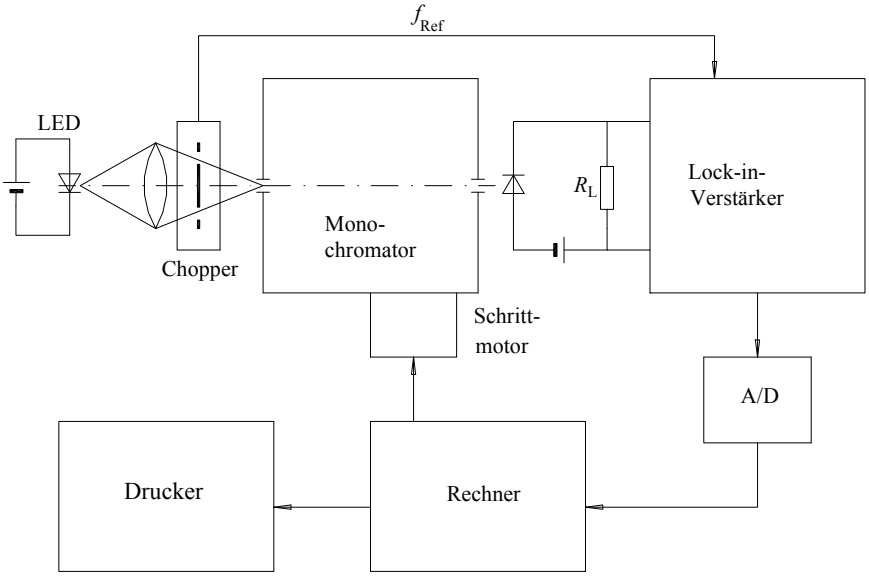
3. **Bestimmung des Absorptionskoeffizienten**
   Zur Bestimmung von $\alpha(\lambda)$ wird der Quotient $\Phi(\lambda)/\Phi_0(\lambda)$ durch den Rechner (Division der zwei Kurven) berechnet und ebenfalls auf dem Bildschirm dargestellt. Drucken Sie die drei Kurven aus und berechnen Sie nach Gleichung (5) den Absorptionskoeffizienten α bei etwa zehn Wellenlängen. Tragen Sie den Absorptionskoeffizienten α über λ auf. Dicke des GaP-Plättchens: d = 0,45 mm.

   Bestimmen Sie aus dem Diagramm $\alpha(\lambda)$ die Bandlücke E_g von GaP.

3.3 Emissionsspektren von LEDs

Die Glühlampe bzw. weiße LED wird durch eine (klare) rote LED ersetzt, das GaP-Plättchen wird entfernt.

<u>ACHTUNG</u> ! Versorgungsspannung für LED vorsichtig hochdrehen, Strom auf maximal 30 mA begrenzen.



Justierung des optischen Strahlengangs mit 2,5 mm Spalten auf maximales Empfängersignal bei der erwarteten Emissionswellenlänge von $\lambda \approx 635$ nm. Wählen Sie im Hauptmenü des Programms SPEKTRALANALYSE den Menüpunkt „Spektrenmessung“ und nehmen Sie mit Hilfe des Rechners ein Spektrum auf zwischen $\lambda = 550$ nm und $\lambda = 750$ nm und drucken Sie es aus.

Analog zum oben beschriebenen Vorgehen sollen die Spektren andersfarbiger LEDs (grün, gelb, blau, weiß) aufgenommen werden. Wählen Sie die Wellenlängenbereiche sinnvoll! Die Spektren der farbigen LEDs sollen alle 200 nm weit sein. Die weiße LED emittiert nahezu über das gesamte sichtbare Spektrum.

Vergleichen Sie in Ihrem Laborbericht die gemessenen Linienbreiten $\Delta\lambda$ mit den nach Gl. (2) erwarteten Werten. Welche Gründe gibt es für die Abweichungen von „Theorie“ und Experiment?

4 Fragen

1. Wie entstehen Röntgenstrahlen?
2. Was sind FRAUNHOFER-Linien?
3. Wie groß sind die Photonenenergien in eV im sichtbaren Spektralbereich?
4. Wie sieht qualitativ der Verlauf $\alpha(E_{ph})$ und $\alpha(\lambda)$ aus für Photonenenergien in der Gegend der Bandlücke E_g?
5. Zeigen Sie, dass für die Photonenenergie, die Lichtfrequenz und die Wellenlänge folgen de Beziehung gilt:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta f}{f} = (-)\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$