

# Versuch Nr. 6: Aufbau eines Spektrometers und Messung optischer Eigenschaften

Gruppe 24:  
Axel Öland  
Alexander Baumer  
Manuel Diehm

## 1 Einleitung

Ziel des Versuchs ist die Messung und anschließende Diskussion optischer Emissionsspektren von verschiedenen Farbstoffen, Farbstoffgemischen, einer Glühbirne sowie einer Energiesparlampe. Zur Messung der Spektren wird ein Aufbau, welcher sich aus einer Xe-Lampe, 4 Linsen, einem Probenhalter, einem Monochromator, einem Photomultiplier, einem Spannungsmessgerät und einem Computer zur Steuerung und Aufnahme der Messwerte, zusammen setzt, verwendet.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Beugung und Interferenz von Licht am optischen Gitter

Trifft eine elektromagnetische Welle auf ein optisches Gitter, dessen Gitterkonstante in der Größenordnung der Wellenlänge der EM-Welle liegt, so kommt es zu Beugungs- und Interferenzeffekten die makroskopisch anhand von Beugungs- bzw. Interferenzmustern beobachtet und gemessen werden können. Die Grundlage für die Erklärung dieser Beugungs- und Interferenzerscheinungen liefert das Prinzip von Huygens, das besagt, dass von jedem von einer Wellenbewegung erfassten Punkt eine neue Elementarwelle ausgeht. Zwischen diesen, in unserem Fall am Gitter entstehenden, Elementarwellen kommt es durch Überlagerung zur Interferenz(vgl:Abb.1).

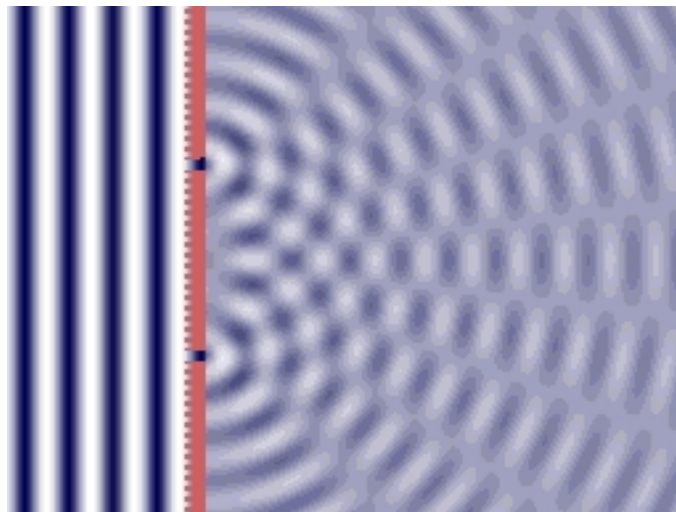


Abbildung 1: Wellenfront und interferierende Elementarwellen

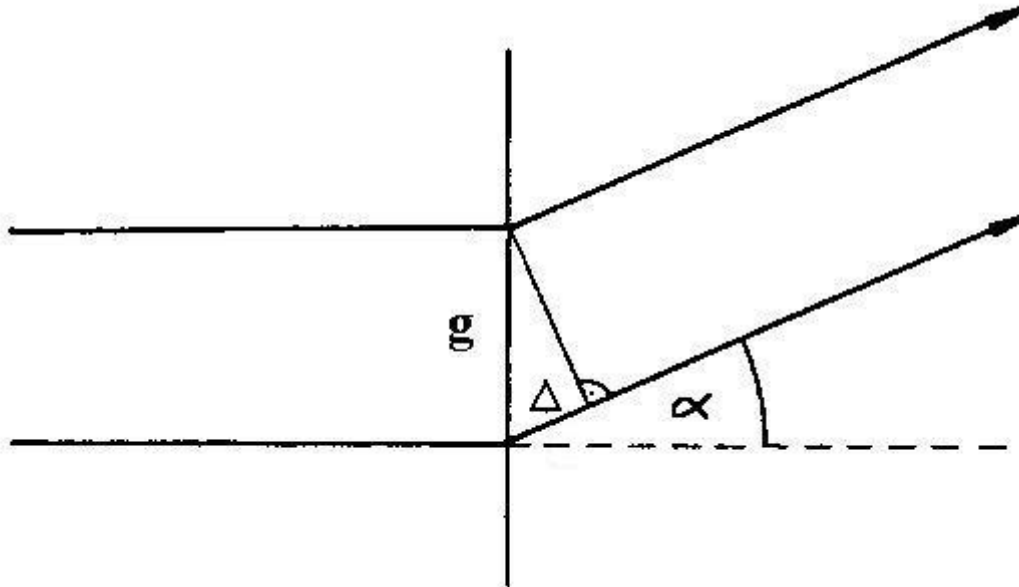


Abbildung 2: Geometrische Betrachtung

Durch geometrische Betrachtung (vgl. Abb.2) kann man folgendes zeigen:

$$\sin\alpha = \frac{\Delta}{g} \quad \Delta : \text{Gangunterschied} \quad g : \text{Gitterkonstante} \quad (1)$$

Mit der Bedingung für konstruktive Interferenz, die einen Gangunterschied bedingt, der ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist, also  $\Delta = n \cdot \lambda$  kommt man zu folgender Bedingungsgleichung für die Winkel unter denen die Maxima (Welche für uns in diesem Versuch interessant sind) des Beugungsmusters zu beobachten sind:

$$\sin\alpha = \frac{n \cdot \lambda}{g} \quad (2)$$

Mit Hilfe eines optischen Gitters lässt sich also Licht nach der Wellenlänge separieren, da Licht verschiedener Wellenlänge unter verschiedenen Winkel gebeugt wird. Dies bildet die Grundlage für die Intensitätsmessung verschiedener Wellenlängen.

## 2.2 Abbildungsgesetze dünner konvexer Linsen

Mit Hilfe des zweiten Strahlensatzes (vgl:Abb.3) kann man zeigen, dass:

$$\frac{g}{f} - \frac{f}{g} = \frac{g}{b} \quad (3)$$

und daraus folgt nach Division durch g und entsprechender Umstellung die Abbildungsgleichung:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad (4)$$

Ebenfalls mit Hilfe des Strahlensatzes kann man zeigen, dass:

$$\frac{G}{B} = \frac{b}{g} = \beta \quad (5)$$

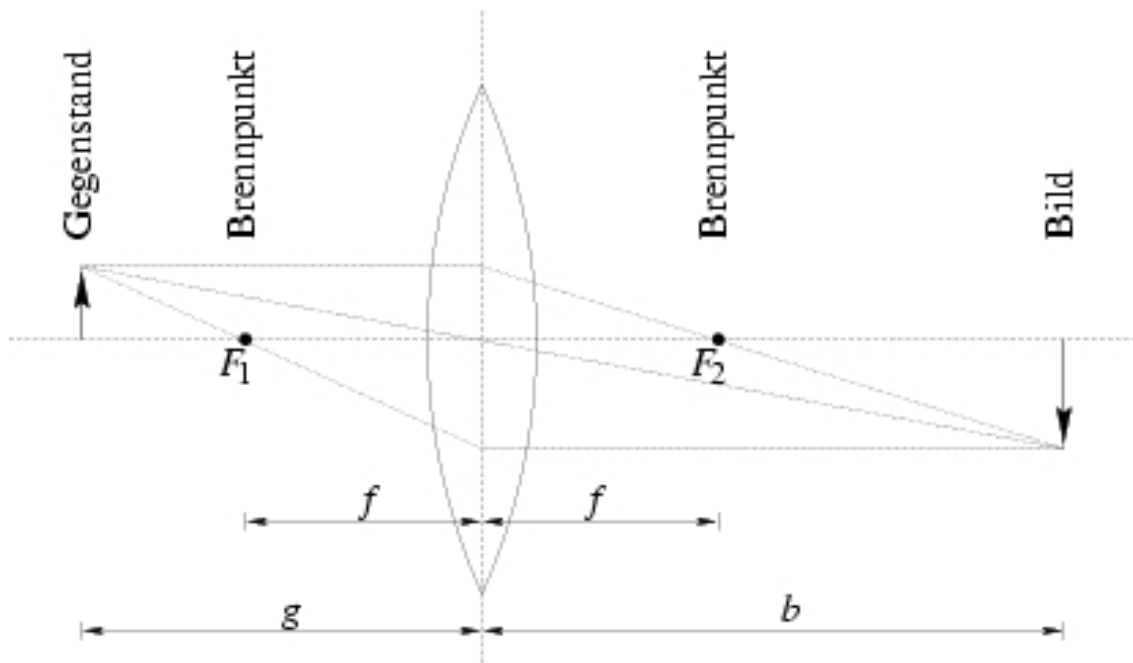


Abbildung 3: Strahlengang einer dünnen konvexen Linse

Das ist der Abbildungsmaßstab.

Spezialfälle:

Wenn  $g = 2 \cdot f$ , dann  $b = g$  und  $B = G$

Wenn  $g = f$ , dann  $b = \infty$ , d.h. das Licht wird parallelisiert

### 2.3 Anregung und Lichtemission von Atomen (Am Beispiel des H-Atoms)

Trifft ein Photon, dessen Wellenlänge der Energie  $\Delta E$  entspricht, auf ein Elektron, dann wird das Elektron in eine neue Schale im Abstand  $\Delta E$  angehoben und absorbiert das Photon.

$$\Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = E_n - E_m \quad m < n \quad (6)$$

$E_n$ : Energie der Schale n       $E_m$ : Energie der Schale m

Dort verweilt das Elektron mit einer durchschnittlichen Dauer von  $10^{-8} \text{ s}$  und fällt dann wieder auf die unterste freie Schale zurück, wobei wieder ein Photon der Energie  $\frac{h \cdot c}{\lambda} = \Delta E$  entsteht (vgl. Abb. 4 - Schalen und Übergänge von Elektronen im H-Atom)

Bei den von uns untersuchten Farbstoffen ist das Prinzip dasselbe, allerdings liegen hier die Energieniveaus in zwei Bändern, dem Valenzband und dem Leitungsband (vgl. Abb. 5), vor, wo ihre Abstände sehr gering sind. Daher muss man bei der Anregung nicht eine konkrete Energie verwenden, sondern es reicht irgendeine Energiedifferenz zwischen den beiden Bändern zur Anregung eines Elektrons. Auch erhält man hier keine Photonen exakt einer Wellenlänge bei der Emission, da auch hier das Elektron die gesamte Bandbreite für den Übergang zur Verfügung hat.

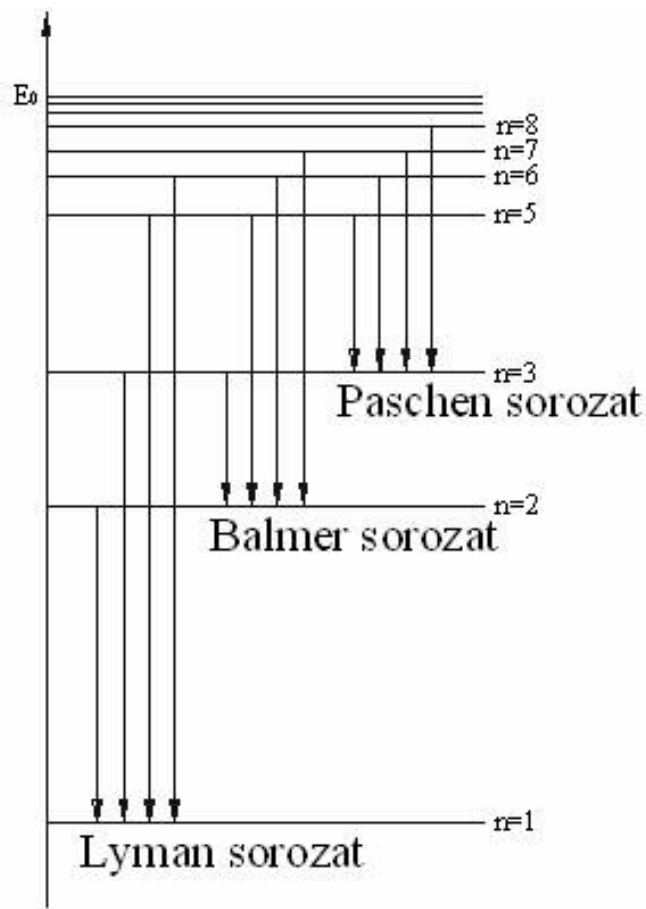


Abbildung 4: Schalen und Übergänge von Elektronen im H-Atom

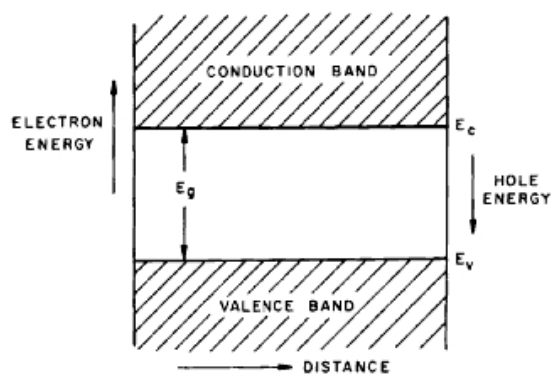


Fig. 6 Simplified band diagram of a semiconductor.

Abbildung 5: Bändermodell

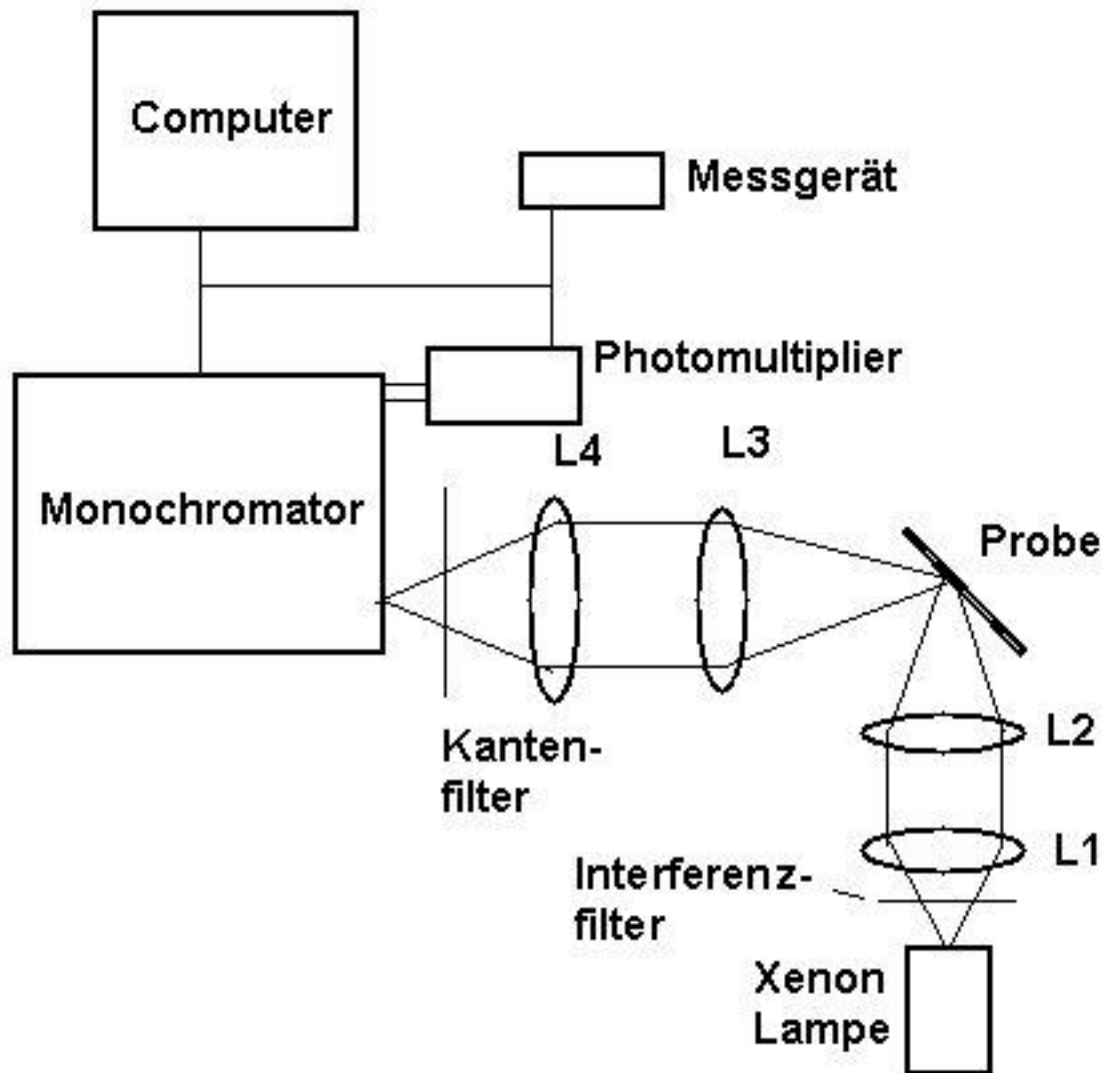


Abbildung 6: Versuchsaufbau

### 3 Versuchsaufbau

Beim Versuchsaufbau (vgl:Abb.6) ist zu beachten, dass die Brennweiten der Linsen entsprechend dem Öffnungsverhältnis des Monochromators gewählt werden. Zuerst muss das Licht der Xenon-Lampe so auf einen Spiegel<sup>1</sup> fokussiert werden, dass es in Richtung des Monochromators reflektiert wird. Zwischen der Lampe und dem Spiegel wird dazu eine Linse (L1 - Brennweite 100 mm) zur Parallelisierung des Lichts und eine weitere Linse (L2 - Brennweite 100 mm) zur Fokussierung, angebracht. Nach der Reflektion am Spiegel wird das Licht erneut mit einer Linse (L3 - Brennweite 100 mm) Parallelisiert und anschließend mit einer weiteren Linse (L4 - Brennweite 150 mm) auf die Öffnung des Monochromators scharfgestellt. Dieser spaltet das Licht in einzelne Wellenlängen auf und lässt jeweils nur eine Wellenlänge in den Photomultiplier, der das Signal verstärkt und in den Rechner speist.

Der Interferenzfilter dient dazu, ausschließlich Licht einer Wellenlänge von der Xenon-Lampe durchzulassen. Der Kantenfilter verhindert, dass UV-Licht der Wellenlänge über 300 nm in den Monochromator gelangt.

### 4 Auswertung der Spektren

#### 4.1 Messung Nr. 1 - Abb.7

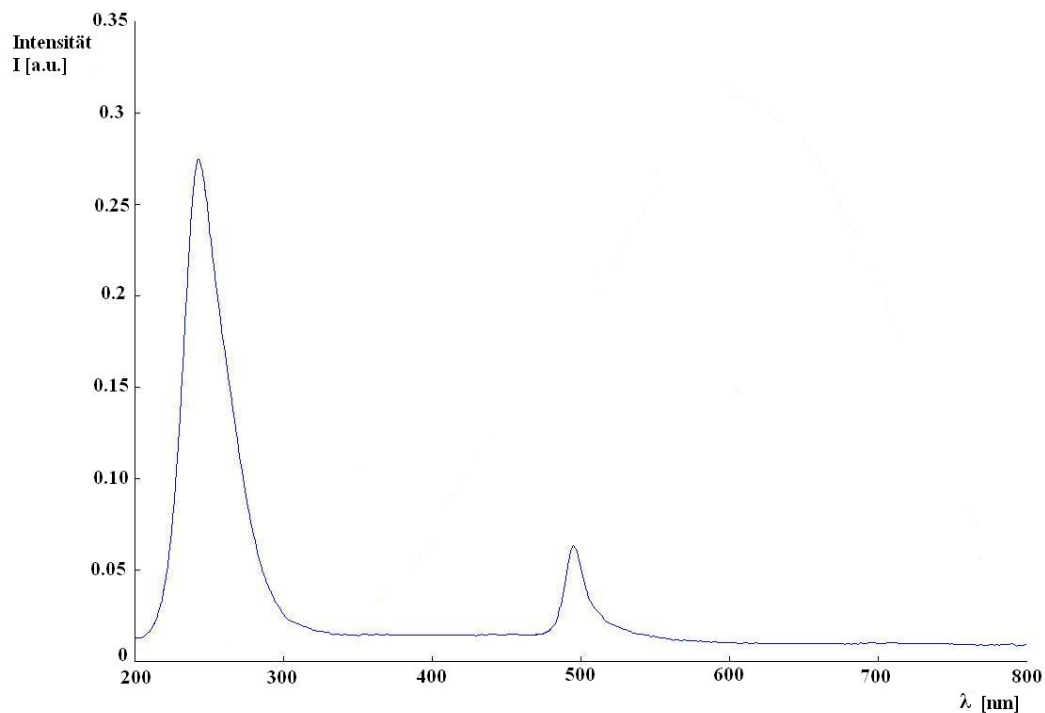


Abbildung 7: Spektrum der Xe-Lampe

Probe: Licht einer Xe-Lampe, reflektiert an diffusem Streuer  
Spannung für den Photomultiplier: 800 V

<sup>1</sup>Bei den Messungen wird hier entweder eine Probe oder ein diffuser Streuer (Mattglasscheibe) eingesetzt

Messbereich: 200-780 nm

Im Probenhalter befindet sich ein diffuser Streuer, welcher nur ca 20% des Lichts reflektiert, damit das Signal nicht zu stark wird. Beim Emissionsspektrum ist ein starkes Maximum bei ca. 250 nm zu erkennen. Außerdem tritt bei ca. 500 nm ein deutlich kleinerer Peak auf, der dem Maximum entspricht, dessen Ordnung doppelt so groß ist, wie die des Maximums bei 250 nm.

## 4.2 Messung Nr. 2 - Abb.8

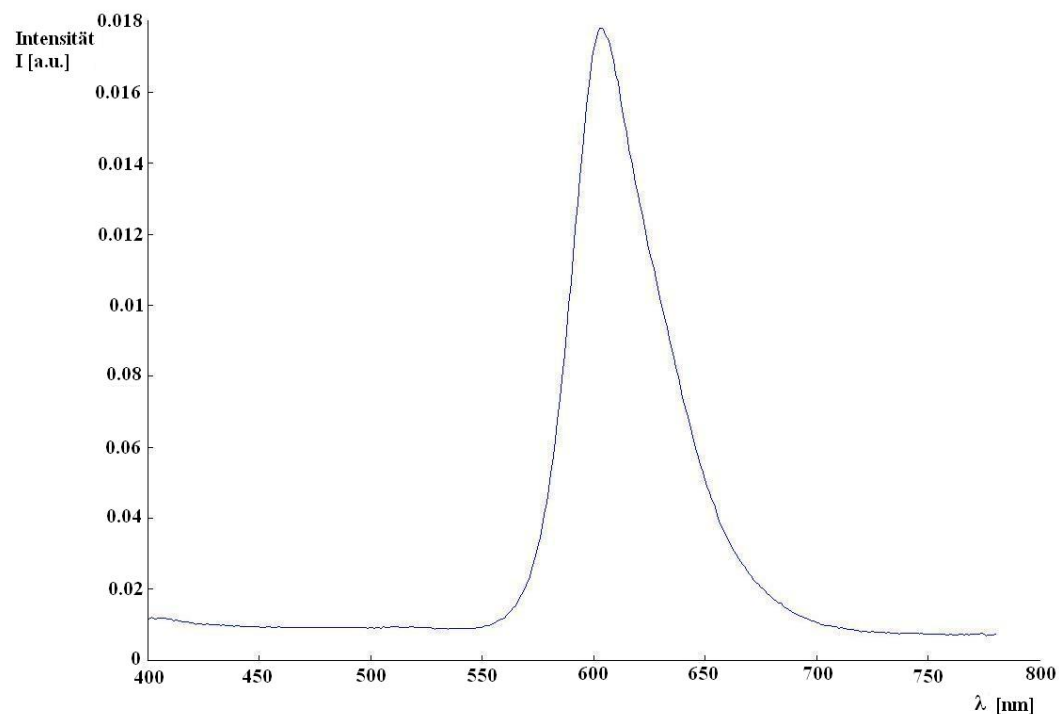


Abbildung 8: Spektrum der pinken Farbe

Probe: Pinke Farbe (Probe 1)  
Spannung für den Photomultiplier: 800 V  
Messbereich: 400 nm - 780 nm

Bei der Pinken Probe ist ein Peak bei ca. 620 nm, was charakteristisch ist, da z.B. Rot bei 650-660 nm liegt. Man erkennt, dass diese Farbe „rein“ ist, da die Kurve nur einen Peak besitzt.

## 4.3 Messung Nr. 3 - Abb.9

Probe: Grüne Farbe (Probe 6)  
Spannung für den Photomultiplier: 800 V  
Messbereich: 400 nm - 780 nm

Wie für die Farbe Grün charakteristisch, liegt der Peak des Spektrums bei ca. 520 nm.

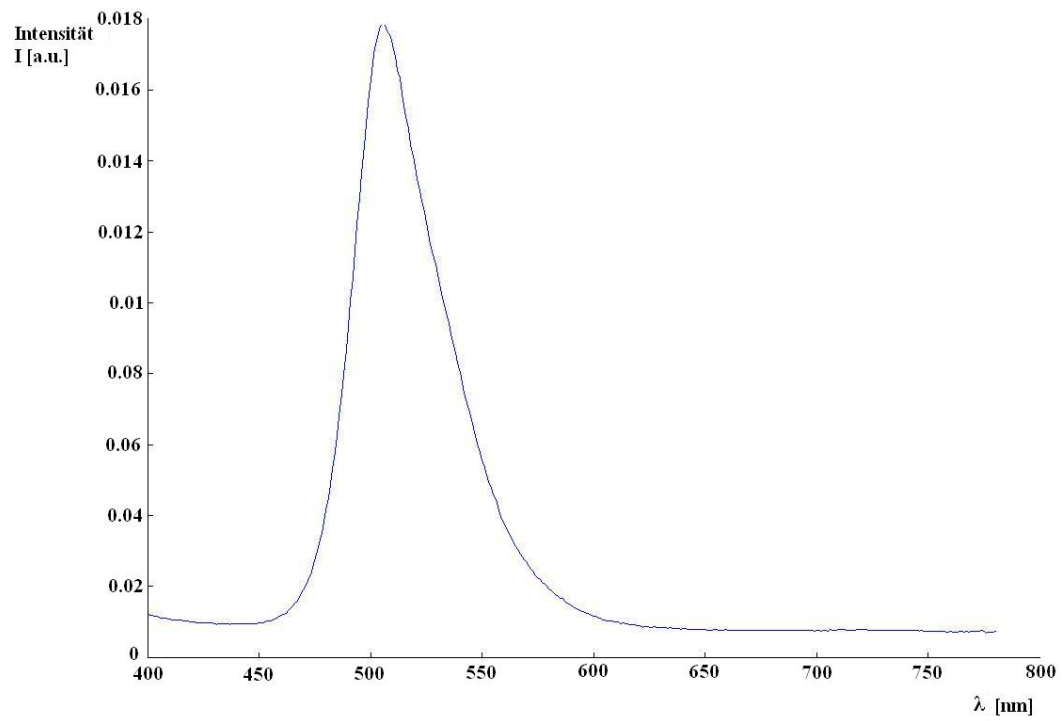


Abbildung 9: Spektrum der grünen Farbe



#### 4.4 Messung Nr. 4 - Abb.10

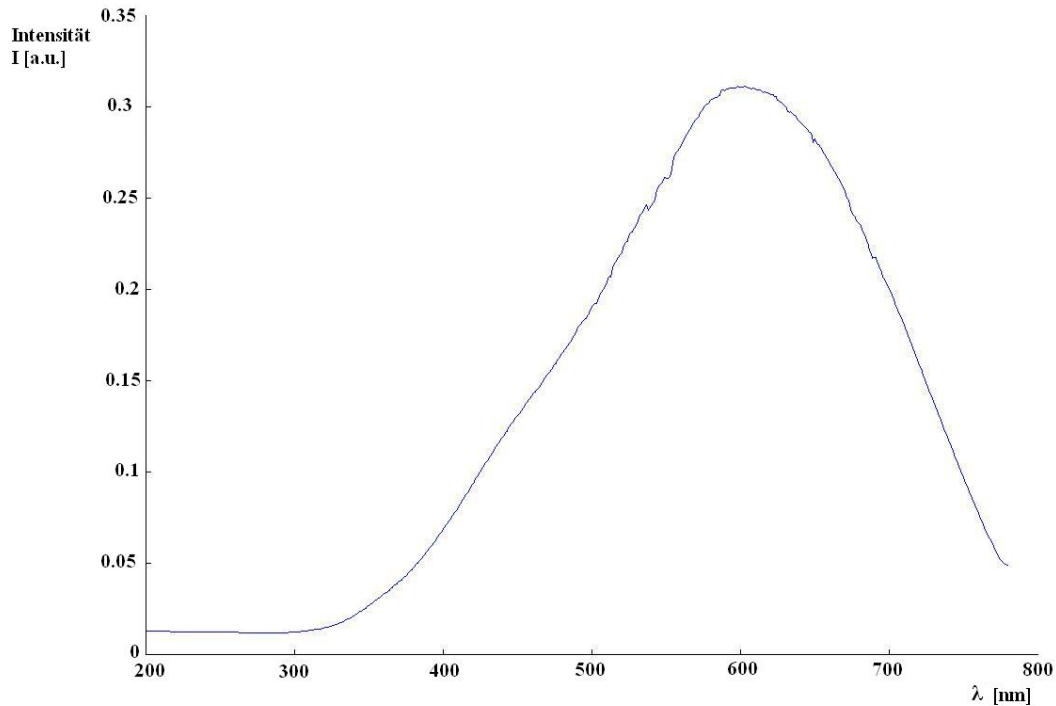


Abbildung 10: Spektrum einer Glühbirne

Probe: Licht einer Glühlampe reflektiert an diffusem Streuer  
 Spannung für den Photomultiplier: 600 V  
 Messbereich: 200 nm - 780 nm

Das aufgezeichnete Spektrum der Glühlampe ist ein kontinuierliches Spektrum, ohne besonders ausgezeichnete Wellenlängen. Jedoch kann man erkennen, dass es ein gewisses Intensitätsmaximum im Wellenlängenbereich um 615 nm gibt. Das aufgezeichnete Spektrum kann jedoch nicht mit dem realen Spektrum übereinstimmen, da nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz gilt:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (7)$$

$$\leftrightarrow T = \frac{b}{\lambda_{max}} = \frac{2,8978 \cdot 10^{-3} m \cdot K}{615 \cdot 10^{-9} m} = 4711,87K \quad (8)$$

b: Wien-Konstante<sup>2</sup>

Das Wien'sche Verschiebungsgesetz ist ein Spezialfall des Planck'schen Strahlungsgesetzes:

$$dP_y = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{A}{e^{\frac{hc_0}{\lambda T}} - 1} \cdot d\lambda \quad (9)$$

<sup>2</sup>Als Formelzeichen wurde der Buchstabe b gewählt, wie es z.B. in: H.Kuchling, Taschenbuch der Physik, Fachbuchverlag Leipzig, 2001 vorgeschlagen wird.

Mit:

$dP_\gamma$ : Leistung, abgestrahlt im Wellenlängenbereich  $\lambda$  bis  $\lambda + d\lambda$ ,

$h$ : Planck-Konstante (Wirkungsquantum) =  $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$c_0$ : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum =  $2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ,

$\lambda$ : Wellenlänge der Strahlung,

$k$ : Boltzmann-Konstante =  $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ,

$T$ : Temperatur des Strahlers,

$A$ : Fläche des Strahlers,

$e$ : Basis der natürlichen Logarithmen = 2,718....

Eine Temperatur von 4711 K ist für eine Glühbirne, deren Glühdraht aus Wolfram besteht, viel zu hoch, da Wolfram eine Schmelztemperatur von 3680 K besitzt und somit schmelzen würde. Das gemessene Spektrum entspräche eher dem Sonnenspektrum. Die Oberflächentemperatur der Sonne lässt sich ebenfalls mit Hilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes errechnen und beträgt danach etwa 5800 K. Das wirkliche Spektrum der Glühlampe ist demnach etwas weiter in den infraroten Bereich verschoben. Der Grund für diese Abweichung liegt in der Messmethode.

Der elektrische Impuls, welcher mit Hilfe des Photomultipliers entsprechend der Lichtintensität erzeugt wird, stützt sich auf den Photoeffekt. Licht mit einer großen Wellenlänge und dementsprechend geringer Energie ist nicht mehr in der Lage Elektronen aus der Kathodenoberfläche des Photomultipliers herauszuschlagen, wenn diese Energie einen materialspezifischen Grenzwert unterschreitet. Außerdem erhöht sich die kinetische Energie der herausgeschlagenen Elektronen, wenn Lichtquanten höherer Energie auf die Kathodenoberfläche treffen. Daher wird das Signal, welches vom Computer ausgewertet wird, mit zunehmender Wellenlänge immer schwächer und verfälscht somit das Ergebnis. Das Maximum der spektralen Strahlungsenergiedichte verschiebt sich dadurch bei der Messung in kurzwelligere Bereiche.

Das wirkliche Spektrum der Glühlampe lässt sich ebenfalls durch das Wien'sche Verschiebungsgesetz abschätzen. Für die Temperatur des Wolframdrahtes nehmen wir sicherheitshalber nicht die Schmelztemperatur, sondern eine etwas niedrigere gelegene Temperatur an. Realistisch wären etwa 2900 K.

Dadurch ergibt sich für das wirkliche Maximum der spektralen Strahlungsenergiedichte:

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{T} = \frac{2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{2900 \text{ K}} = 993 \text{ nm} \quad (10)$$

993 nm liegen im nahen Infrarotbereich.

Die Leistung, die eine Glühlampe aufnimmt entspricht dem Integral über die Intensität, also gerade der Fläche unter der Kurve. Es ergibt sich daraus, dass nur etwa 5% der aufgenommenen Leistung auf das sichtbare Licht entfallen. Der Rest der Leistung geht als Wärme verloren.

## 4.5 Messung Nr. 6 - Abb.11

Probe: Licht einer Energiesparlampe reflektiert an diffusem Streuer

Spannung für den Photomultiplier: 600 V

Messbereich: 200nm - 780 nm

In der Energiesparlampe wird weißes Licht auf andere Art und Weise erzeugt als in der Glühlampe. Hier wird ein Gas zum Aussenden von UV-Strahlung (daher der Peak im UV-Bereich) angeregt, welches dann auf die, auf die Innenwand der Glasröhre der Lampe aufgedampften, fluoreszierenden, Leuchtstoffe trifft. Durch additive Farbmischung des von den Leuchtstoffen ausgesendeten monochromatischen Lichts unterschiedlicher Wellenlänge ergibt sich weißes Licht.

Im aufgezeichneten Emissionsspektrum kann man sehr gut die zugehörigen Linien der einzelnen Farben erkennen. Verantwortlich für die Bildung des weißen Lichts sind hauptsächlich die Wellenlängen:

- 611 nm = rot
- 547 nm = grün
- 440 nm = blau

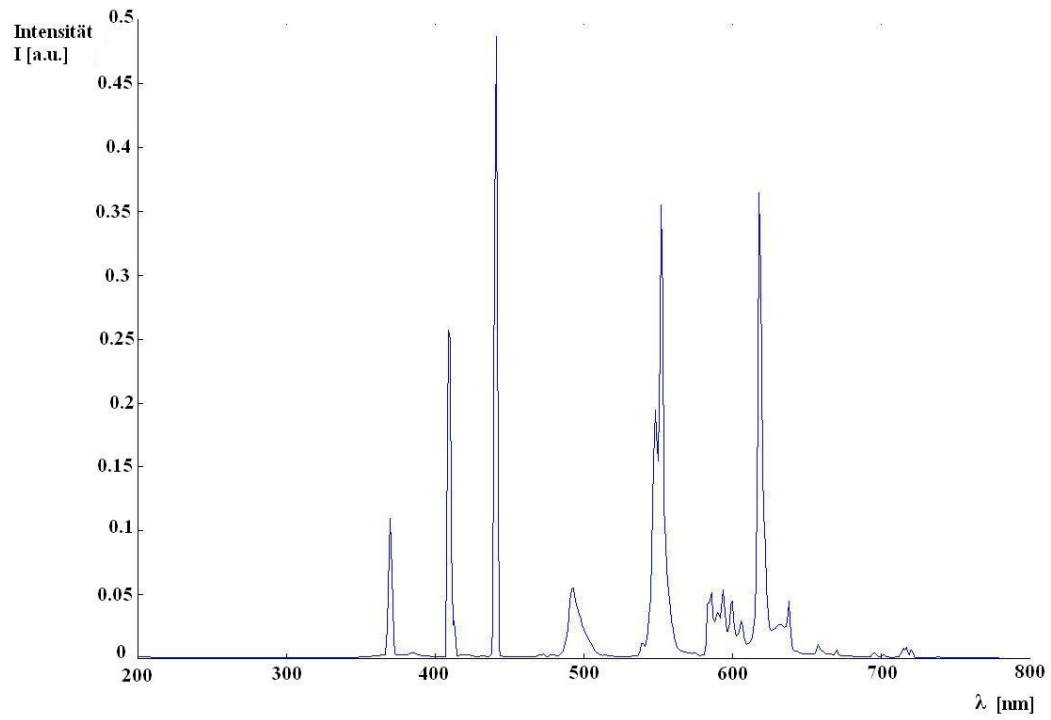


Abbildung 11: Spektrum einer Energiesparlampe

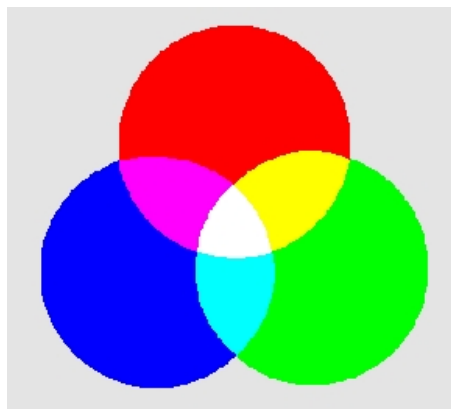


Abbildung 12: Farbaddition von rotem, grünem und blauem Licht

Additive Farbmischung der drei Farben ergibt weißes Licht(vgl. Abb.12).

Dazu im Gegensatz steht die subtraktive Farbmischung (vgl.Abb.13), wie sie z.B. beim Drucken vorkommt. Hier entsteht eine Farbe durch Absorption aller anderen Wellenlängen, sodass bei Mischung der Grundfarben (Magenta, Gelb und Cyan) Schwarz entsteht, da alle Wellenlängen des sichtbaren Lichts absorbiert werden.

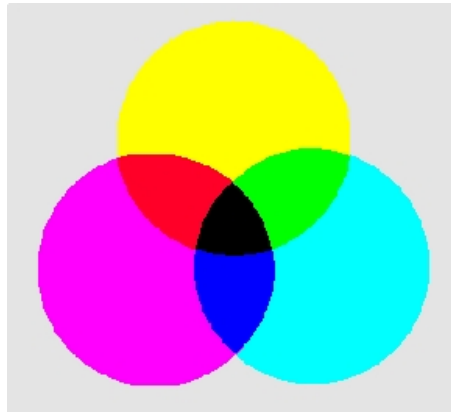


Abbildung 13: Subtraktive Farbmischung von Gelb, Cyan und Magenta