



Universität Augsburg  
Mathematisch-Naturwissenschaftliche  
Fakultät

AG Experimentelle  
Plasmaphysik



# Handyspektrometer für den Unterrichtseinsatz

Zulassungsarbeit

von

Marina Müller

vorgelegt

am 26.03.2015



AG Experimentelle Plasmaphysik  
Universität Augsburg

# Handyspektrometer für den Unterrichtseinsatz

Zulassungsarbeit  
von  
Marina Müller

vorgelegt  
am 26.03.2015

Prüfer: apl. Prof. Dr.-Ing. U. Fantz



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen zur Spektroskopie</b>	<b>9</b>
2.1	Optik . . . . .	9
2.2	Spektroskopie mittels Übersichtsspektrometern . . . . .	17
2.3	Lichtquellen des Alltags . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Das Handyspektrometer</b>	<b>25</b>
3.1	Handykamera als Detektor . . . . .	25
3.2	Aufbau des Handyspektrometers . . . . .	26
3.3	Aufsetzeinheiten für Smartphones . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Charakterisierung des Handyspektrometers</b>	<b>37</b>
4.1	Aufnahme von Emissionsspektren . . . . .	37
4.2	Auswertung der Bilder mittels Grauwertprofilanalyse . . . . .	38
4.3	Wellenlängenkalibrierung und Intensitätskalibrierung . . . . .	41
4.4	Betrachtung der Messgenauigkeit anhand von Spektren verschiedener Lichtquellen . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Unterrichtseinsatz</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>61</b>
	<b>Anhang</b>	<b>67</b>
A	Kartonbausatz und Bauanleitung . . . . .	67
B	Weitere Emissionsspektren . . . . .	72
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>79</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>81</b>



# 1 Einleitung

Spektrometer gehören heutzutage zu den wichtigsten Messinstrumenten in der wissenschaftlichen Forschung. Mithilfe von ihnen wird das Emissions- oder Absorptionsverhalten verschiedener Materialien oder Gegenstände untersucht. Beschränkte sich ihr Anwendungsgebiet zu anfangs hauptsächlich auf den Bereich der Astrophysik, so werden sie mittlerweile in sämtlichen Bereichen der Physik, Chemie und Biologie für spektroskopische Untersuchungen herangezogen.

Emissionsspektroskopie kann dabei nicht nur in Forschungseinrichtungen mit hochauflösenden wissenschaftlichen Spektrometern betrieben werden. Inzwischen gibt es im Handel oder zum Download preiswerte Selbstbauspektrometer, mit denen bereits Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht unterschiedliche Lichtquellen untersuchen können. Als Detektor dient hierbei meist das menschliche Auge, sodass aufgrund der fehlenden digitalen Registrierung nur die Beugungsbilder beobachtet, aber keine Emissionsspektren erstellt werden können.

Ziel dieser Arbeit ist es nun, ein Selbstbauspektrometer für den Unterrichtseinsatz zu entwickeln, welches als Detektor eine Handykamera verwendet. Mit dem sogenannten Handyspektrometer sollen Emissionsspektren verschiedener Lichtquellen des Alltags, wie z.B. Halogenlampen, Kompaktleuchtstofflampen oder LEDs, qualitativ und quantitativ untersucht werden können. An das Handyspektrometer werden dabei folgende Anforderungen gestellt:

Der Bausatz soll aus einfachen Mitteln bestehen und sich das Handyspektrometer daraus mit wenig Aufwand zusammenbauen lassen. Desweiteren soll der sichtbare Spektralbereich (von ca. 400 – 750 nm) mittig auf den Sensor treffen und von diesem vollständig erfasst werden. Außerdem soll die Auflösung des Handyspektrometers bzw. das Apparateprofil eine Halbwertsbreite von ca. 2 nm besitzen. Weiterhin soll eine Aufsetzeinheit konstruiert werden, mithilfe derer das Spektrometer am Smartphone befestigt und das Eindringen von Streulicht vermieden wird.

Bei der Entwicklung dieses Handyspektrometers werden die einzelnen Bestandteile eines Spektrometers (Eintrittsspalt, Kollimator-Linse, dispersives Element, Detektor) entsprechend den Anforderungen an das Handyspektrometer ausgewählt bzw. angepasst. Wichtige Größen, welche bei der Entwicklung berücksichtigt werden müssen, sind der nutzbare Spektralbereich, die Dispersion, das spektrale Auflösungsvermögen sowie die Spaltbreite des Eintrittsspalts.

Beim fertigen Handyspektrometer wird auf den Sensor der Handykamera der Eintrittsspalt abgebildet, sodass das Beugungsbild aus verschieden farbigen und zueinander parallelen Linien besteht, wobei die verschiedenen Farben unterschiedlichen Wellenlängen entsprechen. Die Auswertung der Beugungsbilder erfolgt mittels Grauwertprofilanalyse mithilfe des Grafikprogramms *ImageJ* [1]. Es wird sowohl eine Wellenlängenkalibrierung des Systems durchgeführt, als auch eine Intensitätskalibrierung, welche die Sensitivität des Handyspektrometers widerspiegelt. Zur Überprüfung der Messgenauigkeit und zur Fehlerbetrachtung werden Emissionsspektren verschiedener Lichtquellen aufgenommen und ausgewertet. Um Rückschlüsse auf das Auflösungsvermögen des Systems zu gewinnen, wird das Emissionsspektrum eines Linienstrahlers genauer analysiert. Desweiteren wird das vom Handyspektrometer aufgenommene Spektrum einer weißen Kompaktleuchtstofflampe mit der Aufnahme eines kommerziellen Übersichtsspektrometers verglichen, um daraus Informationen über die Messgenauigkeit eines über den gesamten sichtbaren Bereich verteilten Spektrums zu erhalten. Weiterhin werden die Spektren einer UV-Lampe miteinander verglichen, um die Sensitivität der beiden Spektrometer im ultravioletten Bereich gegenüber zu stellen. Außerdem wird ein Vergleich zweier Handyspektrometer mit unterschiedlichen Eintrittsspaltbreiten angestellt, um zu untersuchen, inwiefern die Spaltbreite die Emissionsspektren beeinflusst.

Abschließend werden zur Anwendung des Handyspektrometers verschiedene Einsatzmöglichkeiten im Physikunterricht am Gymnasium vorgestellt.

## 2 Grundlagen zur Spektroskopie

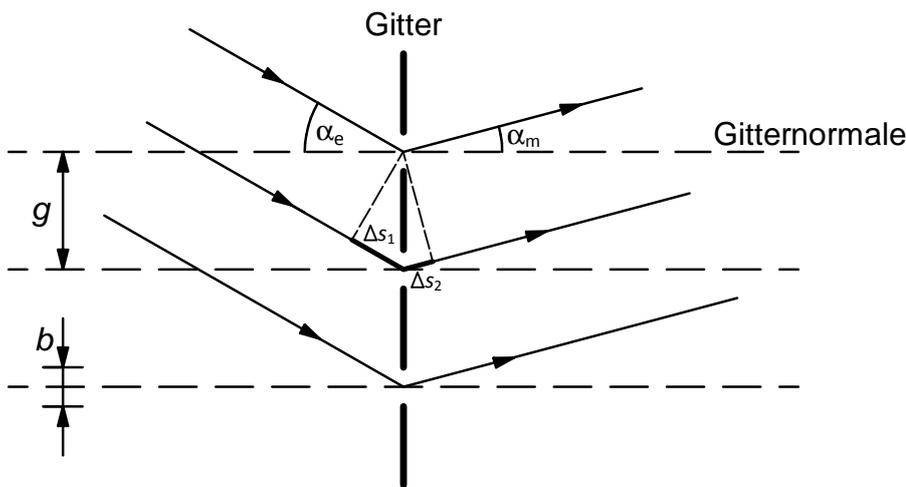
Die Spektroskopie beschäftigt sich mit der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie. Für spektroskopische Untersuchungen werden meist Spektrometer herangezogen. Mithilfe eines Spektrometers lässt sich Strahlung spektral zerlegen und messen, um anschließend aus den Spektren Informationen über das Emissions- oder Absorptionsvermögen des untersuchten Materials oder Gegenstands zu erhalten. Spektrometer finden heute besonders in den Bereichen Physik, Chemie und Biologie Anwendung. Zu den Hauptbestandteilen eines Spektrometers gehören ein Eintrittsspalt, ein dispersives Element, welches die eintreffende Strahlung in ihre spektralen Komponenten zerlegt, Linsen bzw. fokussierende Spiegel und ein Detektor, der das Spektrum registriert.

### 2.1 Optik

#### Beugung an einem Transmissionsgitter

Das wichtigste Bauteil eines Spektrometers ist das dispersive Element. Hierfür kann ein Transmissionsgitter verwendet werden. Dabei handelt es sich um ein Material, welches aus einer periodischen Abfolge von transparenten und undurchlässigen Bereichen besteht, d.h. aus Spalten und Stegen. Die charakteristischen Größen eines Gitters sind die Gitterkonstante  $g$ , welche den Abstand zwischen zwei benachbarten Spalten angibt, und die Breite  $b$  der einzelnen Spalte des Gitters. In Abbildung 2.1 ist ein Ausschnitt aus einem Beugungsgitter dargestellt, auf welches monochromatisches und paralleles Licht trifft, das mit der Gitternormalen den Einfallswinkel  $\alpha_e$  einschließt. Trifft das Licht auf das Beugungsgitter, so wird dieses an den einzelnen Spalten unter einem bestimmten Beugungswinkel  $\alpha_m$  zur Gitternormalen gebeugt: Nach dem Huygenschen Prinzip ist jeder Spalt Ausgangspunkt einer Elementarwelle. Die einzelnen Elementarwellen der Spalte überlagern sich und erzeugen somit ein Interferenzmuster. Die auf das Gitter treffenden Wellen besitzen zueinander einen Wegunterschied  $\Delta s_1$ . Diese Wegdifferenz bezeichnet man als Gangunterschied. Auch die gebeugten Wellen besitzen einen

Gangunterschied  $\Delta s_2$ . Somit ergibt sich für zwei Elementarwellen insgesamt ein Gangunterschied von  $\Delta s = \Delta s_1 + \Delta s_2$ . Beträgt dieser Gangunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge  $\lambda$ , kommt es zu konstruktiver Interferenz, man erhält also Beugungsmaxima der Ordnung  $m$  ( $m \in \mathbb{Z}$ ). Destruktive Interferenz tritt auf, wenn der Gangunterschied ein halbzahliges Vielfaches der Wellenlänge beträgt.



**Abbildung 2.1:** Ausschnitt aus einem Beugungsgitter, auf welches monochromatisches und paralleles Licht trifft mit Einfallswinkel  $\alpha_e$  und Beugungswinkel  $\alpha_m$ .  $g$  ist die Gitterkonstante und  $b$  die Breite der einzelnen Spalte des Gitters.  $\Delta s_1$  bezeichnet den Gangunterschied zwischen zwei eintreffenden Teilwellen und  $\Delta s_2$  den Gangunterschied zwischen zwei gebeugten Teilwellen.

Nach [2] erhält man für die Beugungsmaxima eines Transmissionsgitters für beliebige Einfallswinkel  $\alpha_e$  folgende Gittergleichung:

$$-\sin(\alpha_e) + \sin(\alpha_m) = \frac{m \cdot \lambda}{g}. \quad (2.1)$$

Der Beugungswinkel  $\alpha_m$  der Ordnung  $m$  lässt sich demnach berechnen durch

$$\alpha_m = \arcsin \left( \frac{m \cdot \lambda}{g} + \sin(\alpha_e) \right). \quad (2.2)$$

Der Beugungswinkel ist von der Wellenlänge abhängig, d.h. langwelliges Licht wird stärker gebeugt als kurzwelliges Licht. Mithilfe eines Transmissionsgitters können somit Strahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen räumlich getrennt werden. Den Abstand, der sich daraus zwischen den verschiedenen Beugungsmaxima in der Dispersionsebene des Spektrums ergibt, bezeichnet man als geometrischen

Abstand  $y$ . Bei der Dispersionsebene handelt es sich um die Ebene, in der das Spektrum auf einem Schirm oder Detektor abgebildet wird.

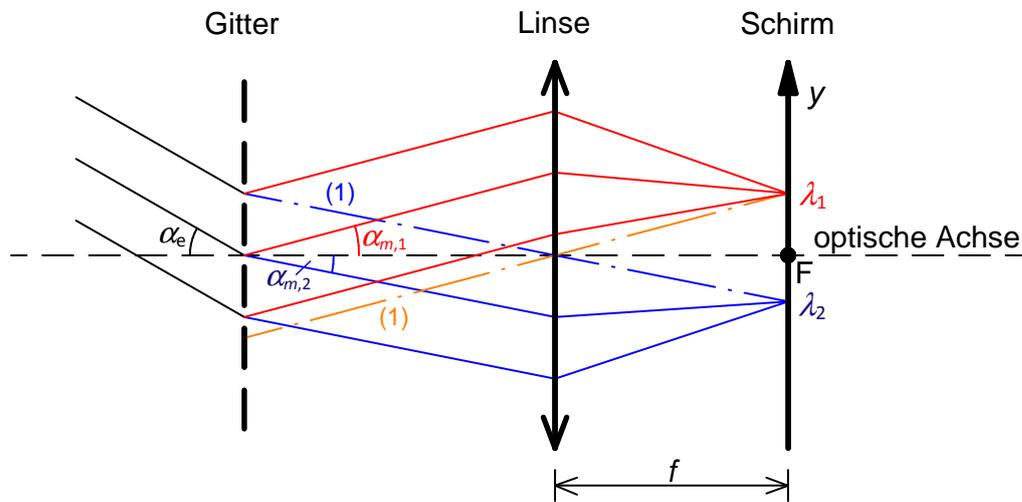
## Optische Abbildung von Linsen

In Spektrometern werden Linsen dazu verwendet, um einerseits achsenparallele Strahlen zu erzeugen und andererseits Strahlen auf einen Schirm bzw. Detektor zu fokussieren. Linsen sind optische Bauelemente, welche die auftreffenden Lichtstrahlen brechen. Treffen achsenparallele Lichtstrahlen auf eine Linse, werden die Strahlen so gebrochen, dass sie sich in einem gemeinsamen Punkt treffen, dem sogenannten Brennpunkt  $F$ . Der Abstand zwischen Linse und Brennpunkt wird als Brennweite  $f$  bezeichnet. Damit ein scharfes Bild entsteht, muss der Beobachtungsschirm im Brennpunkt stehen, d.h. in der Brennebene. Wie stark das Licht gebrochen wird, hängt von der Brennweite der Linse ab und vom Winkel, den die Lichtstrahlen mit der optischen Achse einschließen. Mithilfe des Mittelpunktstrahls, welcher durch die Mitte der Linse verläuft und deshalb nicht gebrochen wird, können die einzelnen Strahlengänge konstruiert werden. In Abbildung 2.2 ist ein Gitter abgebildet, auf welches paralleles Licht mit einem Einfallswinkel  $\alpha_e$  trifft, gebeugt und anschließend mithilfe einer Linse auf einen Schirm fokussiert wird. Eingezeichnet sind die Strahlengänge für zwei Lichtstrahlen mit verschiedenen Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ), die um den Winkel  $\alpha_{m,1}$  bzw.  $\alpha_{m,2}$  gebeugt werden. Da die gebeugten Lichtstrahlen unterschiedliche Winkel mit der optischen Achse einschließen, erhält man auf dem Beobachtungsschirm zwei verschiedene Punkte.

## Intensität der Gitterbeugung

Die Intensitätsverteilung an einem Beugungsgitter setzt sich nach [2] aus dem Produkt von drei Faktoren zusammen:

- Der Intensität  $I_0$  der einfallenden Strahlung,
- der Spaltfunktion  $F^2$ , die die Beugung am Einzelspalt mit der Spaltbreite  $b$  beschreibt und
- der sogenannten Gitterfunktion  $G^2$ , welche die Interferenz zwischen den  $N$  Spalten des Gitters mit der Gitterkonstanten  $g$  beschreibt.



**Abbildung 2.2:** Paralleles Licht fällt auf ein Beugungsgitter mit Einfallswinkel  $\alpha_e$ . Ein-gezeichnet sind die Strahlengänge von Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ) durch eine Linse mit Brennweite  $f$  und Brennpunkt  $F$ . Die gebeugten Lichtstrahlen schließen mit der optischen Achse die Winkel  $\alpha_{m,1}$  und  $\alpha_{m,2}$  ein. Der Beobachtungsschirm befindet sich in der Brennebene der Linse,  $y$  bezeichnet den geometrischen Abstand. (1) ist der jeweilige Mittelpunktstrahl.

Für die Spaltfunktion  $F^2$  und die Gitterfunktion  $G^2$  gilt:

$$F^2 = \frac{\sin^2(\beta)}{\beta^2} \quad \text{und} \quad G^2 = \frac{\sin^2(N \cdot \varphi)}{\sin^2(\varphi)}$$

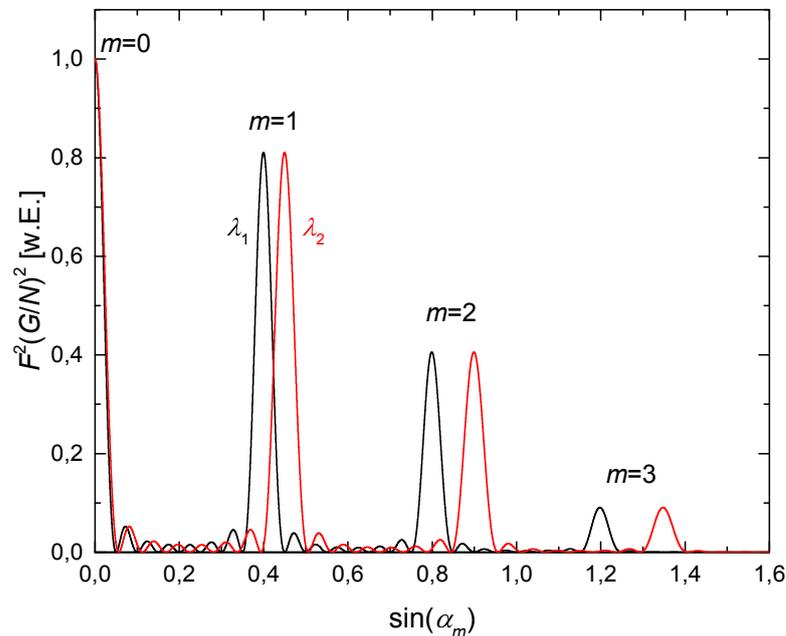
mit

$$\beta := \frac{\pi}{\lambda} \cdot b \cdot \sin(\alpha_m) \quad \text{und} \quad \varphi := \frac{\pi}{\lambda} \cdot g \cdot \sin(\alpha_m).$$

Daraus folgt nun für die Intensität der Gitterbeugung:

$$I = I_0 \cdot F^2 \cdot G^2 = I_0 \cdot \frac{\sin^2(\beta)}{\beta^2} \cdot \frac{\sin^2(N \cdot \varphi)}{\sin^2(\varphi)}. \quad (2.3)$$

In Abbildung 2.3 ist das Produkt aus Spaltfunktion  $F^2$  und normierter Gitterfunktion  $(G/N)^2$  grafisch für ein Gitter mit  $N = 8$ ,  $g = 1 \mu\text{m}$  und  $b = 0,25 \mu\text{m}$  für zwei verschiedene Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  dargestellt, wobei  $\lambda_1 < \lambda_2$ . Auf der  $x$ -Achse ist die Funktion  $\sin(\alpha_m)$  aufgetragen, welche proportional zum geometrischen Abstand  $y$  im Spektrum ist. Mit steigender Ordnung  $m$  nimmt die Intensität  $I$  der Beugungsmaxima ab.



**Abbildung 2.3:** Das Produkt aus Spaltfunktion  $F^2$  und normierter Gitterfunktion  $(G/N)^2$  für ein Gitter mit  $N = 8$ ,  $g = 1 \mu\text{m}$  und  $b = 0,25 \mu\text{m}$  für zwei verschiedene Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  mit  $\lambda_1 < \lambda_2$ . Auf der x-Achse ist die Funktion  $\sin(\alpha_m)$  aufgetragen, welche proportional zum geometrischen Abstand  $y$  ist.

## Nutzbarer Spektralbereich für Ordnung $m$

Nach Gleichung (2.2) ist der gleiche Beugungswinkel  $\alpha_m$  für verschiedene Kombinationen von  $m$  und  $\lambda$  des einfallenden Lichts unter einem festen Einfallswinkel  $\alpha_e$  möglich. Dies führt dazu, dass sich Spektren verschiedener Ordnung überlappen. Den nicht überlappenden Wellenlängenbereich einer bestimmten Ordnung  $m$  nennt man den nutzbaren oder freien Spektralbereich  $\Delta\lambda_{\text{nutz}}$  eines Gitters. Dieser ergibt sich aus der folgenden Grenzbedingung: Die kleinste Wellenlänge der höheren Ordnung fällt mit der größten Wellenlänge der niedrigeren Ordnung zusammen, d.h.

$$m \cdot \lambda_2 = (m + 1) \cdot \lambda_1, \quad \text{wobei } \lambda_1 < \lambda_2. \quad (2.4)$$

Mit Gleichung (2.4) erhält man somit für den nutzbaren Spektralbereich für die Ordnung  $m$ :

$$\Delta\lambda_{\text{nutz}} = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1}{m}. \quad (2.5)$$

Für höhere Ordnungen wird somit der nicht überlappende Wellenlängenbereich kleiner. Ist die kürzeste Wellenlänge einer Strahlungsquelle bekannt, kann mit Gleichung (2.5) für verschiedene Ordnungen der nutzbare Spektralbereich bestimmt

werden. Für den sichtbaren Bereich, welcher sich von ca. 400 nm bis ca. 750 nm erstreckt, ergibt sich somit für die 1. Ordnung ein nutzbarer Spektralbereich von

$$\Delta\lambda_{\text{nutz}, m=1} = 400 \text{ nm} \quad (400 \text{ bis } 800 \text{ nm in 1. Ordnung})$$

und für die 2. Ordnung ein nutzbarer Spektralbereich von

$$\Delta\lambda_{\text{nutz}, m=2} = 200 \text{ nm} \quad (400 \text{ bis } 600 \text{ nm in 2. Ordnung}).$$

## Dispersion

In der Spektroskopie versteht man unter Dispersion die Fähigkeit eines Gitters, Licht in seine spektralen Komponenten zu zerlegen. Dabei wird unterschieden zwischen Winkeldispersion und linearer Dispersion. Die Winkeldispersion  $D_W$  gibt das Winkelintervall  $d\alpha_m$  pro Wellenlängeneinheit  $d\lambda$  an. Leitet man Gleichung (2.1) nach der Wellenlänge ab, erhält man:

$$D_W = \frac{d\alpha_m}{d\lambda} = \frac{m}{g \cdot \cos(\alpha_m)}. \quad (2.6)$$

Die lineare Dispersion  $D_L$  gibt den geometrischen Abstand  $dy$  im Spektrum pro Wellenlängeneinheit  $d\lambda$  an und berechnet sich zu:

$$D_L = \frac{dy}{d\lambda} = f \cdot \frac{d\alpha_m}{d\lambda} = f \cdot D_W. \quad (2.7)$$

Hierbei bezeichnet  $f$  die Brennweite der Linse. Für Spektrometer wird meist die reziproke lineare Dispersion  $D_L^{-1}$  angegeben.

Setzt man in Gleichung (2.7) nun Gleichung (2.6) und (2.2) ein, erhält man:

$$D_L = f \cdot \frac{m}{g \cdot \cos(\alpha_m)} = f \cdot \frac{m}{g \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{m \cdot \lambda}{g} + \sin(\alpha_e)\right)\right)}. \quad (2.8)$$

Daraus folgt, dass die Dispersion ( $D_W$  bzw.  $D_L$ ) von der Wellenlänge abhängig ist, allerdings nicht linear. Für sehr kleine Winkel  $\alpha_m$  kann die Näherung  $\cos(\alpha_m) \approx 1$  verwendet werden, d.h. für kleine Beugungswinkel kann die Dispersion als konstant angenommen werden.

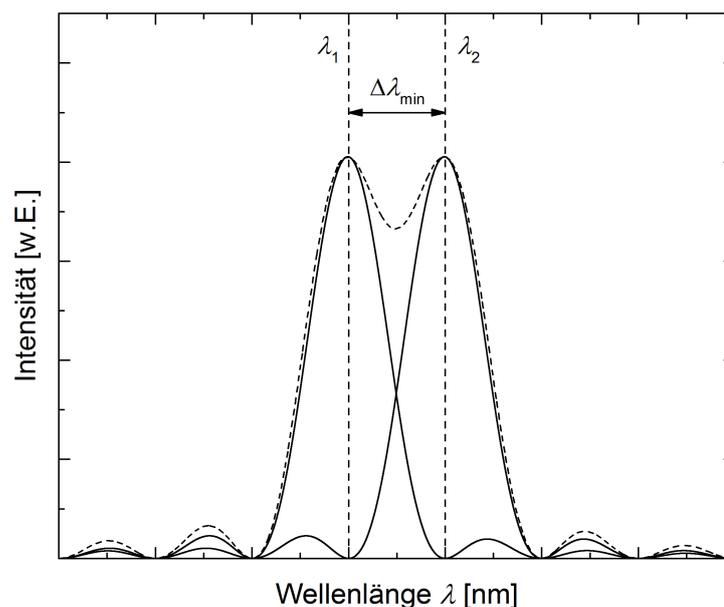
Bei Spektrometern wird die Dispersion an den Detektor angepasst, da dieser einerseits eine endliche Ausdehnung und andererseits eine begrenzte Auflösung besitzt. Je kleiner die Gitterkonstante und je höher die Ordnung, desto größer ist die Winkeldispersion bzw. die lineare Dispersion (siehe Abbildung 2.3).

## Spektrales Auflösungsvermögen

Das spektrale Auflösungsvermögen  $A$  eines Gitters ist ein Maß für die Fähigkeit, zwei eng benachbarte Spektrallinien noch klar voneinander unterscheiden zu können. Nach dem Rayleigh-Kriterium können zwei benachbarte Spektrallinien noch unterschieden werden, wenn das Maximum der einen in das erste Minimum neben dem Maximum der anderen fällt [2]. In Abbildung 2.4 wird das Rayleigh-Kriterium veranschaulicht. Für das spektrale Auflösungsvermögen  $A$  erhält man nach [2]:

$$A \equiv \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{\min}} = m \cdot N. \quad (2.9)$$

Hierbei bezeichnet  $N$  die Anzahl der ausgeleuchteten Spalte des Gitters und  $\Delta\lambda_{\min}$  die minimale Wellenlängendifferenz zweier spektraler Komponenten, welche gerade noch aufgrund des Rayleigh-Kriteriums getrennt sind.



**Abbildung 2.4:** Rayleigh-Kriterium zur Bestimmung des Auflösungsvermögens eines Gitters:  $\Delta\lambda_{\min}$  bezeichnet die minimale Wellenlängendifferenz zwischen den Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ . Die gestrichelte Kurve ist die Summe der Beugungsintensitäten beider Spektrallinien.

Das spektrale Auflösungsvermögen ist umso größer, je höher die Beugungsordnung  $m$  und die Linienzahl  $N$  ist. Die Linienzahl  $N$  berechnet sich als Quotient aus der Breite  $B$  des ausgeleuchteten Gitters und der Gitterkonstanten  $g$ :  $N = B/g$ . Um die Linienzahl zu erhöhen, müssen dementsprechend bei gegebener Gitterbreite die Gitterlinien enger zusammenrücken. Daraus folgt, dass das spektrale

Auflösungsvermögen bei gegebener Gitterbreite mit abnehmender Gitterkonstante steigt.

Die Verwendung höherer Beugungsordnungen führt einerseits zu einem höheren spektralen Auflösungsvermögen, andererseits aber auch zu einem kleineren nutzbaren Spektralbereich und reduzierten Beugungsintensitäten.

Um das maximal mögliche spektrale Auflösungsvermögen zu erreichen, muss die einfallende Strahlung das gesamte Beugungsgitter ausleuchten.

Die minimale Wellenlängendifferenz  $\Delta\lambda_{\min}$  entspricht der Halbwertsbreite des theoretischen Apparateprofils von optischen Systemen. Unter der Halbwertsbreite (*FWHM*) versteht man die gemessene Breite einer Spektrallinie bei halber Maximalintensität. Das Licht einer Spektrallinie enthält nicht eine einzige Wellenlänge, sondern einen Wellenlängenbereich. Die gemessene Halbwertsbreite setzt sich zusammen aus der natürlichen Linienbreite, der Doppler-Verbreiterung und dem Apparateprofil. Das Apparateprofil resultiert aus dem gesamten Aufbau des optischen Systems. Bisher wurde von einer Punktlichtquelle ohne räumliche Ausdehnung ausgegangen. In Realität ist allerdings Intensität nötig, weshalb ein Loch oder Spalt mit minimaler, aber endlicher Breite benötigt wird. Das Apparateprofil setzt sich deshalb aus der Rechteckverteilung der Intensität aufgrund der endlichen Spaltbreite und der Fraunhofer-Beugung am Gitter zusammen [3]. Je schmaler der Spalt, desto geringer ist die Halbwertsbreite und desto größer ist somit die Auflösung des optischen Systems. Ein schmalerer Spalt führt allerdings zu reduzierten Beugungsintensitäten, sodass ein Kompromiss zwischen hohem Auflösungsvermögen und hoher Signalstärke geschlossen werden muss. Auf die Halbwertsbreite von Spektrallinien wird in Kapitel 2.3 nochmals näher eingegangen.

## 2.2 Spektroskopie mittels Übersichtsspektrometern

### Aufbau und Funktionsweise von Übersichtsspektrometern

Je nachdem, wie die zu untersuchende Strahlung vom Spektrometer gemessen wird, kann zwischen Monochromator und Polychromator unterschieden werden: Ein Monochromator besteht aus einem sich drehendem Beugungsgitter und einem Einzeldetektor. Besitzt das Spektrometer hingegen ein feststehendes Beugungsgitter und ein Detektorarray, so spricht man von einem Polychromator [4]. Polychromatoren werden auch Übersichtsspektrometer genannt. Mit ihnen kann ein großer Wellenlängenbereich gleichzeitig beobachtet werden. Kommerzielle Übersichtsspektrometer sind z.B. von *Ocean Optics* [5] oder *Avantes* [6] erhältlich.

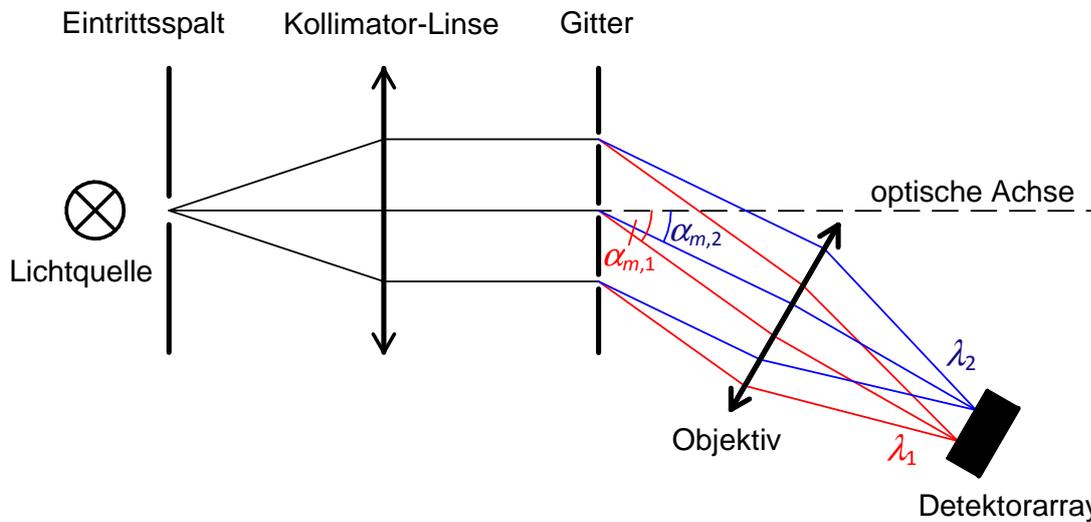
Im Folgenden werden der Aufbau und die Funktionsweise eines Polychromators mit einem Transmissionsgitter genauer erläutert.

In Abbildung 2.5 ist der Aufbau eines Gitterspektrometers vereinfacht dargestellt. Das Licht tritt durch einen Eintrittsspalt ein, welcher in der Brennebene einer Kollimator-Linse liegt. Der Eintrittsspalt hat die Funktion einer Punktlichtquelle mit räumlicher Ausdehnung (siehe Kapitel 2.1) und ist parallel zu den Gitterlinien ausgerichtet. Mithilfe der Kollimator-Linse wird das Licht in achsenparallele Strahlen gebrochen. Die Lichtstrahlen treffen auf das Gitter und werden um den Winkel  $\alpha_m$  gebeugt. Anschließend treffen die gebeugten Strahlen auf ein Objektiv, welches die Lichtstrahlen auf die Abbildungsebene fokussiert, in welcher sich ein Detektorarray befindet.

### Selbstbauspektrometer

Polychromatoren besitzen einen einfachen Aufbau, da sie nur eine geringe Anzahl optischer Bauelemente und keine mechanisch drehbaren Teile benötigen. Deshalb ist es möglich, solche Spektrometer selbstständig zu bauen. Im Handel oder zum Download sind bereits einfache Selbstbauspektrometer erhältlich. Im Folgenden werden zwei Selbstbauspektrometer etwas ausführlicher vorgestellt:

- Das Handspektroskop von *AstroMedia* [7] und
- das Mini-Spektrometer von *UWM Chemistry* [8].



**Abbildung 2.5:** Aufbau eines Polychromators mit Transmissionsgitter: Eingezeichnet sind die Strahlengänge von Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ , wobei  $\lambda_1 > \lambda_2$ . Die gebeugten Lichtstrahlen schließen mit der optischen Achse die Winkel  $\alpha_{m,1}$  und  $\alpha_{m,2}$  ein.

Der Kartonbausatz für das Handspektroskop von *AstroMedia* kann beim gleichnamigen Versandhandel kostenpflichtig erworben werden [7]. Das Spektrometer besitzt einen vorgefertigten Eintrittspalt der Breite 0,25 mm und als dispersives Element wird eine Beugungsfolie mit einer Gitterkonstanten von 1  $\mu\text{m}$  verwendet. Das Spektrometer besitzt weder ein Objektiv, noch einen Detektor, da die Augenlinse als Objektiv und die Netzhaut des Auges als Detektorarray dient. Das Spektrum wird auf eine Messskala abgebildet, sodass die Wellenlängen der Spektrallinien beim Betrachten einer Strahlungsquelle sofort abgelesen werden können. Um das Ablesen zu erleichtern, wird am Austrittsloch zusätzlich eine Linse mit einer Brennweite von +120 mm befestigt. Da sich diese zwischen Gitter und Objektiv befindet, wirkt diese als Lupe. Nach Herstellerangabe liegt die Ablesegenauigkeit bei 5 nm.

Das Handspektroskop besitzt eine Größe von ca.  $145 \times 105 \times 20 \text{ mm}^3$  und ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

Der Bausatz für das Mini-Spektrometer von *UWM Chemistry* steht zum kostenlosen Download zur Verfügung [8]. Das Gehäuse des Spektrometers wird aus Karton gefertigt und ein Stück CD dient als Reflexionsgitter. Um den benötigten Sektor aus der CD-ROM zu schneiden, muss auf die beschreibbare Seite der CD-ROM ein gut haftendes Klebeband angebracht werden, damit die reflektierende Schicht nicht abblättert. Der Eintrittspalt muss bei diesem Bausatz selbständig mithilfe eines

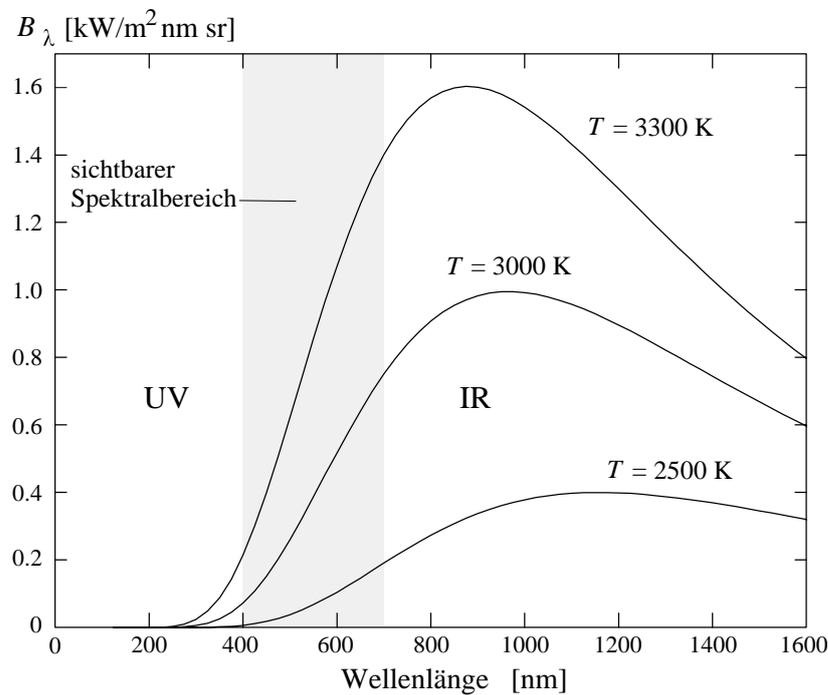


## 2.3 Lichtquellen des Alltags

### Halogenlampen als Temperaturstrahler

Halogenlampen unterscheiden sich in ihrem Aufbau und ihrer Funktionsweise kaum von Glühlampen und gehören somit zu den Temperaturstrahlern. Dabei handelt es sich um Strahler, bei denen ein Körper durch Zufuhr von Energie erhitzt wird und diese Wärmeenergie als Strahlung wieder abgibt. Bei heutiger Verwendung als Lampen wird elektrische Energie zugeführt. Halogenlampen bestehen aus einem Quarz-Glaskolben, welcher mit Edelgas und im Unterschied zur Glühlampe noch zusätzlich mit einem Halogen (Jod oder Brom) gefüllt ist. In diesem Kolben befindet sich eine Wendel aus aufgewickelmtem Wolframdraht, welche durch elektrischen Stromfluss erhitzt wird. Dabei verdampfen allerdings geringe Mengen an Wolfram, welche sich am Glaskolben niederschlagen und somit den Kolben schwärzen würden. Das zugefügte Halogen bindet dagegen die abgedampften Wolframatomme und führt diese wieder der Glühwendel zu [9]. Aufgrund dessen können Halogenlampen bei höheren Temperaturen betrieben werden als Glühlampen, was zu einer höheren Effizienz führt. Desweiteren besitzen Halogenlampen dadurch eine höhere Lebensdauer als Glühlampen.

Die Glühwendel ist ein sogenannter *realer schwarzer Körper*. Ein *idealer schwarzer Körper*, auch *schwarzer Strahler* genannt, absorbiert die eintreffende Strahlung vollständig und emittiert die aufgenommene Energie gemäß dem Planck'schen Strahlungsgesetz wieder als elektromagnetische Strahlung, welche nur von der Temperatur abhängig ist. Ein realer schwarzer Körper hingegen absorbiert die auftreffende Strahlung nicht vollständig und emittiert dementsprechend auch nicht die maximale Strahlung bei gegebener Temperatur. Temperaturstrahler besitzen ein kontinuierliches Emissionsspektrum. In Abbildung 2.8 ist die spektrale Strahldichte eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Wellenlänge für verschiedene Temperaturen dargestellt. Die Maxima verschieben sich entsprechend der Wien'schen Verschiebung mit zunehmender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen. Daraus folgt, dass ein schwarzer Strahler abhängig von seiner Temperatur in den unterschiedlichen Wellenlängenbereichen verschieden stark abstrahlt und somit eine charakteristische Farbtemperatur besitzt. Die Farbtemperatur einer Lichtquelle gibt die Temperatur eines schwarzen Strahlers mit der ähnlichsten Farbe an. Halogenlampen besitzen Farbtemperaturen von 2800 K bis 3400 K [10].



**Abbildung 2.8:** Spektrale Strahldichte eines schwarzen Strahlers als Funktion der Wellenlänge für verschiedene Temperaturen [11].

## Plasmen als Linienstrahler

Quecksilberdampf Lampen, Deuterium-Lampen oder Neonröhren gehören zu den Niederdruckgasentladungslampen. Bei dieser Lichtquelle erhält man aufgrund des niedrigen Drucks und der niedrigen Betriebstemperatur ein Spektrum mit scharfen Spektrallinien.

Der Funktionsweise von Gasentladungslampen liegt das Prinzip von elektronischen Übergängen in Niedertemperaturplasmen zugrunde. Ein Plasma wird häufig als der vierte Aggregatzustand bezeichnet. Dabei handelt es sich um ionisiertes Gas, welches aus Elektronen, positiven Ionen und meist hauptsächlich aus neutralem Gas besteht [12].

Gasentladungslampen bestehen aus einem Glas- oder Quarzkolben, in dem sich zwei Elektroden und ein Gas (-Gemisch) befinden. An die Elektroden wird eine Spannung angelegt, sodass sich zwischen ihnen ein elektrisches Feld aufbaut und durch das Plasma ein Strom fließt. Dabei werden die Elektronen im elektrischen Feld zwischen Anode und Kathode so stark beschleunigt, dass sie die Gas-Atome anregen und ionisieren können. Gehen die angeregten Gas-Atome in einen niedrigerenergetischeren Zustand (z.B. der Grundzustand) über, so wird Energie in Form

von elektromagnetischer Strahlung frei. Die Energie der entstehenden Photonen hängt dabei von der elektronischen Struktur des Elements ab. Jedes Element besitzt somit ein charakteristisches Linienspektrum.

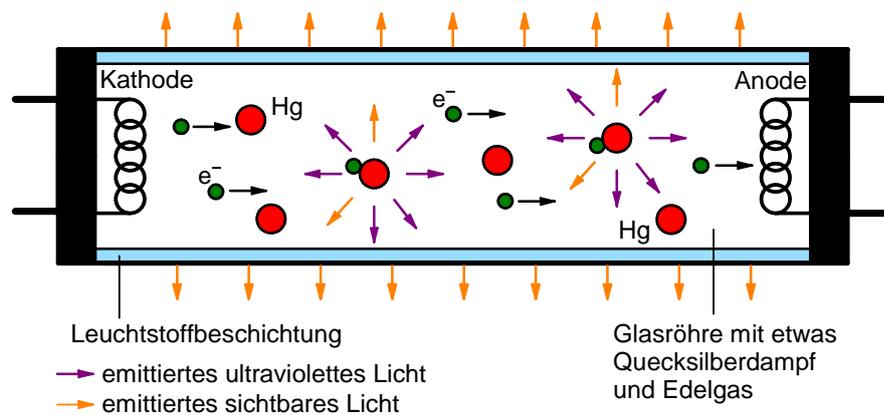
Aufgrund der endlichen Lebensdauer der beteiligten Zustände erhält man nach der Heisenbergschen Unschärferelation für die Energiezustände jeweils eine Energieunschärfe. Bei einem Übergang von einem angeregten Zustand in einen niederenergetischeren Zustand addieren sich die entsprechenden Energieunschärfen, was zu einer natürlichen Linienbreite führt [13]. Spektrallinien besitzen somit ein durch die Halbwertsbreite charakterisiertes Linienspektrum. Aufgrund der thermischen Bewegung der Atome kommt es außerdem zu Doppler-Verschiebungen der emittierten Strahlung. Diese führen insgesamt wiederum zu einer Linienverbreiterung, der sogenannten Doppler-Verbreiterung, welche von der Gastemperatur und der Teilchenmasse abhängig ist [13]. Unter Normalbedingungen ist die Doppler-Verbreiterung allerdings um Größenordnungen größer als die natürliche Linienbreite. Schließlich muss noch das Apparateprofil berücksichtigt werden, welches aus dem gesamten optischen Aufbau der Spektroskopie resultiert. Bei denen im Rahmen dieser Arbeit aufgenommenen Spektren dominiert das Apparateprofil. Da dieses bei einem Gitterspektrometer näherungsweise einer Gauß-Kurve entspricht, kann die gemessene Intensitätsverteilung von Spektrallinien als Gaußprofil angesehen werden.

Die Emissivität einer Spektrallinie ist die von ihr eingeschlossene Fläche im Liniensprofil. Sie gibt an, wie viele Photonen pro Zeiteinheit und pro Volumenelement emittiert werden und entspricht somit der Häufigkeit des zugehörigen optischen Übergangs pro Volumen [Photonen/(s · m<sup>3</sup>)]. Unter Berücksichtigung der Photonenenergien erhält man den spektralen Emissionskoeffizienten [W/(nm · m<sup>3</sup>)].

## Kompaktleuchtstofflampen als Lumineszenzstrahler

Kompaktleuchtstofflampen werden umgangssprachlich auch Energiesparlampen genannt und gehören zu den Lumineszenzstrahlern. Bei Kompaktleuchtstofflampen handelt es sich um gefaltete Leuchtstofflampen. Leuchtstofflampen bestehen aus einer Glasröhre, welche mit etwas Quecksilber und einem Edelgas, meist ein Gemisch aus Argon und Neon, gefüllt ist. Beim Betrieb treten durch Glühemission aus der Kathode Elektronen aus, welche zur Anode hin beschleunigt werden und das Füllgas ionisieren, d.h. das Gas wird in den Plasmazustand versetzt. Die Quecksilberatome werden durch Elektronenstöße angeregt und emittieren haupt-

sächlich im ultravioletten und nur schwach im sichtbaren Bereich. Die Innenseite der Glasröhre ist mit Leuchtstoffen beschichtet, die das UV-Licht in sichtbares Licht umwandeln. In Abbildung 2.9 ist die Funktionsweise einer Leuchtstoffröhre anschaulich dargestellt. Je nachdem, welcher Leuchtstoff verwendet wird, erhält man unterschiedliche Strahlungsverteilungen. Für Tageslicht-Lampen wird z.B. eine Mischung aus Zink-Beryllium-Silikat und Magnesium-Wolframat verwendet [2].



**Abbildung 2.9:** Aufbau und Funktionsweise einer Leuchtstoffröhre.

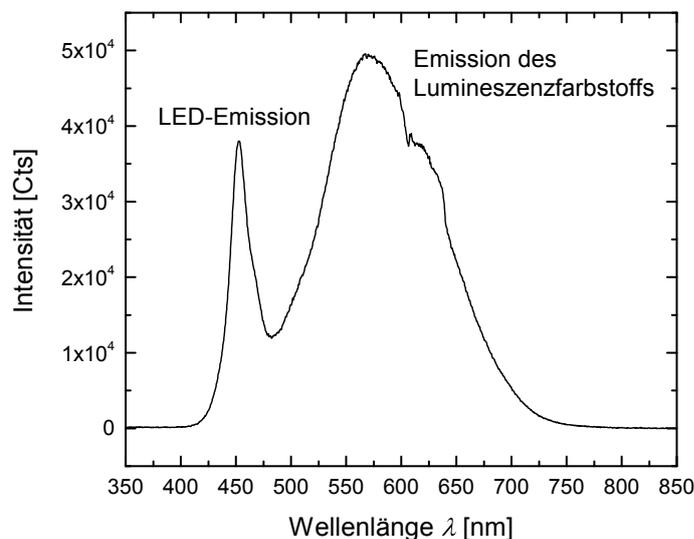
## LEDs als Festkörperstrahler

LEDs (Light Emitting Diodes) sind prinzipiell aufgebaut wie p-n-Halbleiterdioden in Durchlassrichtung. Halbleiterdioden bestehen aus einem p-n-Halbleiterkristall, d.h. aus einem p-dotierten und einem n-dotierten Halbleiter. Bei der Dotierung werden Atome im Halbleiterkristall durch Fremdatome ersetzt. Entstehen durch die Dotierung zusätzliche Elektronen, erhält man einen n-Halbleiter. Entstehen hingegen Löcher, so handelt es sich um einen p-Halbleiter. Wird nun ein p- und ein n-Halbleiter miteinander in Kontakt gebracht, so kommt es an der Kontaktfläche zur Rekombination von Elektronen und Löchern. Diese Ladungsträgerdiffusion wird aufgrund des Konzentrationsunterschieds verursacht: Im p-Halbleiter herrscht Elektronenmangel und im n-Halbleiter gibt es nur wenige Löcher, weshalb die Elektronen in den p-Halbleiter und die Löcher in den n-Halbleiter wandern und rekombinieren. Die p-Schicht ladet sich dadurch negativ und die n-Schicht positiv auf. Dabei entsteht ein elektrisches Feld, welches einer weiteren Diffusion entgegenwirkt und somit einen vollständigen Konzentrationsausgleich verhindert. Dies führt zu einer ladungsträgerarmen Übergangszone (Sperrschicht) in der Umge-

bung der Grenzschicht. Legt man nun in Durchlassrichtung eine Spannung an, d.h. am p-Halbleiter den Pluspol und am n-Halbleiter den Minuspol, so kann die Sperrschicht überwunden werden und die Ladungsträger (Elektronen und Löcher) diffundieren. Bei der Rekombination an der Kontaktfläche wird Energie in Form von Strahlung frei.

Die Energie der ausgesandten Photonen wird durch die Breite der Sperrschicht bzw. Bandlücke bestimmt. Da verschiedene Halbleiter unterschiedliche Bandlücken besitzen, erhält man je nach Zusammensetzung Licht in einer bestimmten Farbe. Eine Gallium-Nitrid-Diode liefert z.B. violettes Licht und eine Gallium-Arsenid-Phosphid-Diode oranges bis rötliches Licht [2]. Aufgrund der jeweils definierten Bandlücke sind LEDs monochromatische Strahler. Halbleiter besitzen keine diskreten Energieniveaus, sondern Energiebänder, in denen die Elektronen und Löcher jeweils über einen Energiebereich verteilt sein können. Dies hat zur Folge, dass LEDs eine breitere Spektralverteilung aufweisen als Linienstrahler [14]. LEDs besitzen eine spektrale Verteilung mit Halbwertsbreiten zwischen 6 nm (Violett) und 35 nm (Infrarot) [2].

Weißlicht-LEDs (WLEDs) sind im Grunde blaue Leuchtdioden, deren Kunststoffkörpern zusätzlich fluoreszierende Farbstoffe beigemischt werden, welche durch das blaue Primärlicht zum Leuchten angeregt werden. Die Mischung aus Primärlicht und Sekundärlicht der Farbstoffe lässt die LED für das menschliche Auge weiß erscheinen [4]. In Abbildung 2.10 ist das Emissionsspektrum einer WLED dargestellt.



**Abbildung 2.10:** Emissionsspektrum einer Weißlicht-LED.

## 3 Das Handyspektrometer

### 3.1 Handykamera als Detektor

Als Detektor wird beim Handyspektrometer eine Handykamera herangezogen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde als Versuchshandy ein *iPhone4s* von *Apple* verwendet. Dessen Handykamera besitzt ein Objektiv mit einer Brennweite von 4 mm und einen BSI-CMOS-Farbsensor mit einer Auflösung von  $3264 \times 2448$  Pixel und einer Chip-Größe von  $4,592 \times 3,450$  mm<sup>2</sup>. CMOS-Sensoren (Complementary Metal Oxide Semiconductor) gehören zu den Silizium-Halbleiterdetektoren und basieren wie die CCD-Sensoren (Charge Coupled Devices) auf dem inneren photoelektrischen Effekt. Die eintreffenden Photonen werden dabei in elektrische Ladungen umgewandelt. Im Gegensatz zum CDD-Sensor kann beim CMOS-Sensor jeder Pixel einzeln elektronisch ausgelesen werden. BSI steht für Back Side Illuminated und bedeutet, dass die Lichtrezeptoren direkt hinter den Mikrolinsen angebracht sind. Dies hat zur Folge, dass das Licht sofort zum Sensor gelangt und nicht durch die Leiterbahnen behindert wird. Dadurch steigt die Sensitivität der Kamera. Um einen Farbsensor zu erhalten, wird meist ein sogenanntes BAYER-Farbfilter über den Pixeln des Sensors angeordnet. Dabei handelt es sich um ein Primär-Farbfilter, das sich mosaikförmig aus den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau zusammensetzt (additive Farbmischung). Da Grün vom menschlichen Auge am empfindlichsten wahrgenommen wird, enthält der Chip doppelt so viele Grünpixel wie Rot- oder Blaupixel, um den Farbeindruck des menschlichen Auges nachzuempfinden [4].

## 3.2 Aufbau des Handyspektrometers

### Anforderungen

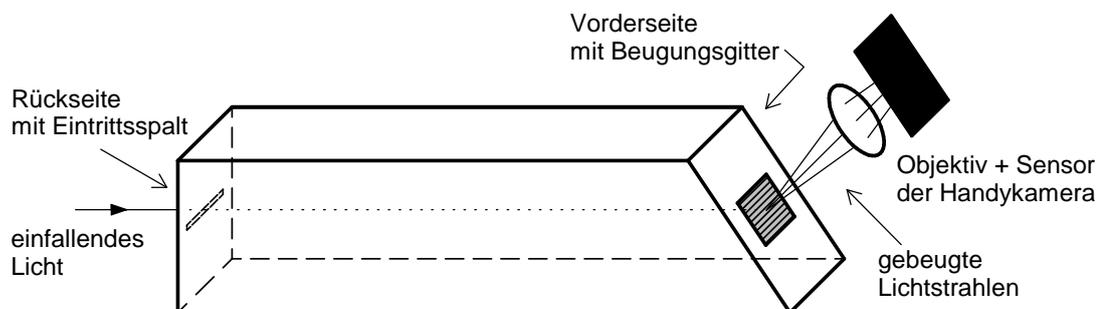
Mit dem Handyspektrometer sollen spektroskopische Untersuchungen im sichtbaren Bereich durchgeführt werden, welcher sich von ca. 400 nm bis 750 nm erstreckt. Dafür ergeben sich für das Handyspektrometer die nachfolgenden Anforderungen:

- Da als Detektor die Handykamera verwendet wird, das Spektrometer einen einfachen Aufbau besitzen und der gesamte sichtbare Wellenlängenbereich erfasst werden soll, wird das Handyspektrometer in Form eines Polychromators aufgebaut (siehe Kapitel 2.2).
- Damit das Handyspektrometer nicht zu schwer wird und einfach am Smartphone befestigt werden kann, wird für das Gehäuse ein leichtes Material benötigt, welches eine gewisse Stabilität aufweist und sich gut verarbeiten lässt.
- Die Handykamera besitzt ein relativ kleines Objektiv, weshalb nur ein kleiner Bereich des Gitters effektiv zum Emissionsspektrum beiträgt. Um dennoch ein hohes spektrales Auflösungsvermögen zu erhalten, muss die Gitterkonstante dementsprechend gering sein. Eine geringe Gitterkonstante führt außerdem zu einer hohen Dispersion, sodass die einzelnen Spektrallinien gut voneinander getrennt werden können. Allerdings besitzt der Sensor der Handykamera eine endliche Breite, weshalb eine zu große Dispersion dazu führt, dass evtl. nicht das gesamte Spektrum des sichtbaren Bereichs auf den Chip abgebildet wird. Hier muss also ein Kompromiss zwischen hoher Dispersion bzw. spektralem Auflösungsvermögen und erfassbarem Spektralbereich geschlossen werden.
- Um eine möglichst hohe Intensität und einen möglichst großen nutzbaren Spektralbereich zu erhalten, sollte das Spektrum 1. Ordnung zur Beobachtung herangezogen werden. Außerdem sollte das sichtbare Spektrum mittig auf den Sensor treffen. Beides kann durch eine entsprechende Anpassung des Einfallswinkels erreicht werden, wobei das Beugungsgitter dabei parallel zum Objektiv ausgerichtet wird.
- Damit auf das Beugungsgitter paralleles Licht trifft, muss zwischen Eintrittspalt und Gitter entweder eine Kollimator-Linse angebracht werden oder ein

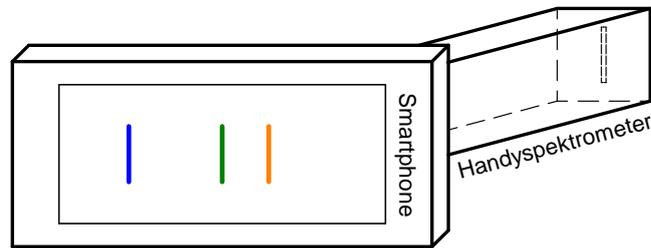
genügend großer Abstand bestehen. Da das Spektrometer einen möglichst einfachen Aufbau besitzen soll, wird auf eine Kollimator-Linse verzichtet. Die räumliche Kohärenz nimmt mit dem Abstand zum Eintrittsspalt zu, weshalb der Abstand zum Beugungsgitter möglichst groß sein sollte. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass mit dem Abstand auch das Gewicht des Handyspektrometers zunimmt, die Justierung erschwert wird und sich aufgrund des kleineren Raumwinkels die Intensität verringert.

- Das Auflösungsvermögen des Handyspektrometers bzw. die Halbwertsbreite des Apparateprofils sollte im Bereich von 2 nm liegen. Dies kann durch entsprechend geringe Eintrittsspaltbreiten erreicht werden. Allerdings nimmt mit der Spaltbreite auch die Intensität ab, weshalb ein Kompromiss zwischen hohem Auflösungsvermögen und hoher Signalstärke getroffen werden muss. Um mehr Flexibilität zu gewährleisten, sollte die Spaltbreite nicht fest vorgegeben sein, sondern selbständig ausgewählt werden können. Weiterhin ist wichtig, dass der Spalt parallel und einfach anzubringen ist.
- Damit das Spektrometer am Smartphone befestigt werden kann und kein Streulicht auf den Detektor gelangt, muss außerdem eine entsprechende Aufsetzeinheit konstruiert werden.

Unter Berücksichtigung aller Anforderungen wurde ein Schema des Handyspektrometers angefertigt, welches in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Auf der Gehäusevorderseite befindet sich das Beugungsgitter und auf der Rückseite der Eintrittsspalt. Die Vorderseite des Spektrometers wird vor die Handykamera des Smartphones positioniert. In Abbildung 3.2 ist das Schema eines Smartphones mit angebrachtem Handyspektrometer dargestellt.



**Abbildung 3.1:** *Schema des Handyspektrometers.*



**Abbildung 3.2:** Schema zur Positionierung des Handyspektrometers am Smartphone.

Im Folgenden wird auf die Umsetzung der einzelnen Anforderungspunkte näher eingegangen.

## Gehäuse

Für das Gehäuse hat sich ein Fotokarton mit  $300 \text{ g/m}^2$  als geeignet erwiesen, aus dem das quaderförmige Gehäuse gefaltet wird. Ein Fotokarton dieser Stärke liefert einerseits die gewünschte Stabilität und lässt sich andererseits noch gut verarbeiten. Desweiteren tritt von außen kein Streulicht ein.

## Beugungsgitter

Im Handel wird als Beugungsgitter eine Acetatfolie der Stärke  $0,05 \text{ mm}$  mit  $1000$  Linien pro Millimeter, d.h. mit einer Gitterkonstanten von  $1 \mu\text{m}$ , angeboten. Um abzuschätzen, ob bei dieser Gitterkonstanten das gesamte sichtbare Spektrum 1. Ordnung vom Sensor erfasst wird, werden für verschiedene Einfallswinkel mithilfe von Gleichung (2.8) die reziproken linearen Dispersionen für den sichtbaren Wellenlängenbereich für das Versuchshandy berechnet. Die Brennweite der Objektivlinse der Handykamera beträgt  $4 \text{ mm}$ . In Tabelle 3.1 sind für verschiedene Einfallswinkel  $\alpha_e$  die Intervalle der reziproken linearen Dispersion  $\Delta D_L^{-1}$  für den sichtbaren Bereich angegeben. Insgesamt erhält man Dispersionen zwischen  $165 \text{ nm/mm}$  und  $250 \text{ nm/mm}$ . Der Sensor der Handykamera besitzt eine Größe von  $4,592 \times 3,450 \text{ mm}^2$ . Auf den Chip passen somit mindestens  $758 \text{ nm}$ , d.h. das gesamte sichtbare Spektrum wird vom Sensor erfasst. Für das Handyspektrometer wird deshalb diese Folie als Beugungsgitter verwendet.

Die Beugungsfolie wird innen auf eine Aussparung auf der Vorderseite des Gehäuses geklebt (siehe Abbildung 3.1). Um die Justierung des Spektrometers am Smartphone zu erleichtern, werden die Abmessungen der Aussparung größer als die des Objektivs der Handykamera gewählt. Die Größe der Aussparung beträgt

$10 \times 16 \text{ mm}^2$ , d.h. die Beugungsfolie sollte ca.  $20 \times 25 \text{ mm}^2$  groß sein, damit sie noch gut befestigt werden kann. Die Beugungsfolie muss so angebracht werden, dass die Gitterlinien senkrecht zu den Sensor-Zeilen verlaufen.

Eine solche Beugungsfolie kann beim Versandhandel *AstroMedia* [15] erworben werden.

**Tabelle 3.1:** Intervall der reziproken linearen Dispersion  $\Delta D_L^{-1}$  für den sichtbaren Wellenlängenbereich für verschiedene Einfallswinkel  $\alpha_e$ .

$\alpha_e$ [°]	$\Delta D_L^{-1}$ [nm/mm]
0	165 – 229
–10	204 – 244
–20	228 – 250
–30	242 – 250
–40	242 – 250
–50	233 – 250
–60	221 – 248
–70	210 – 245
–80	203 – 243
–90	200 – 242

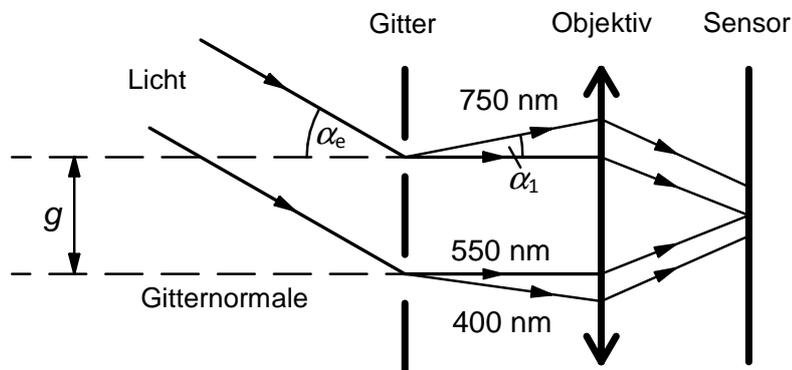
## Bestimmung des Abstands Eintrittsspalt - Gitter und des Einfallswinkels

Als Kompromiss zwischen möglichst parallelem Licht und geringem Gewicht des Spektrometers, einfacher Justierung sowie hoher Intensität, wurde für den Abstand zwischen Eintrittsspalt und Gitter eine Länge von  $l = 110 \text{ mm}$  gewählt.

Die bekannte grüne Quecksilberlinie bei  $546,07 \text{ nm}$  liegt ungefähr im mittleren Bereich des sichtbaren Spektrums. Der Einfallswinkel wurde deshalb so angepasst, dass Licht mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 550 \text{ nm}$  in 1. Ordnung senkrecht auf das Objektiv und somit mittig auf den Chip fällt. Die entsprechenden Strahlengänge und Winkel am Gitter sind in Abbildung 3.3 skizziert.

Mithilfe der Gittergleichung (2.1) berechnet sich der Einfallswinkel nun wie folgt:

$$\alpha_e = \arcsin \left( \sin(\alpha_1) - \frac{m \cdot \lambda}{g} \right) = \arcsin \left( \sin(0^\circ) - \frac{550 \text{ nm}}{1000 \text{ nm}} \right) \approx -33^\circ.$$



**Abbildung 3.3:** Paralleles Licht trifft unter einem bestimmten Einfallswinkel  $\alpha_e$  auf ein Beugungsgitter und wird gebeugt.  $\alpha_1$  bezeichnet den Beugungswinkel für die 1. Ordnung. Die gebeugten Strahlen treffen auf ein Objektiv, welches die Strahlen auf einen Sensor fokussiert.

Der Einfallswinkel der auf das Beugungsgitter fallenden Strahlung muss somit  $-33^\circ$  betragen, d.h. das Gehäuse muss so geneigt werden, dass dessen Vorderseite mit der Unterseite einen Winkel von  $57^\circ$  einschließt.

## Realisierung des Eintrittsspalts

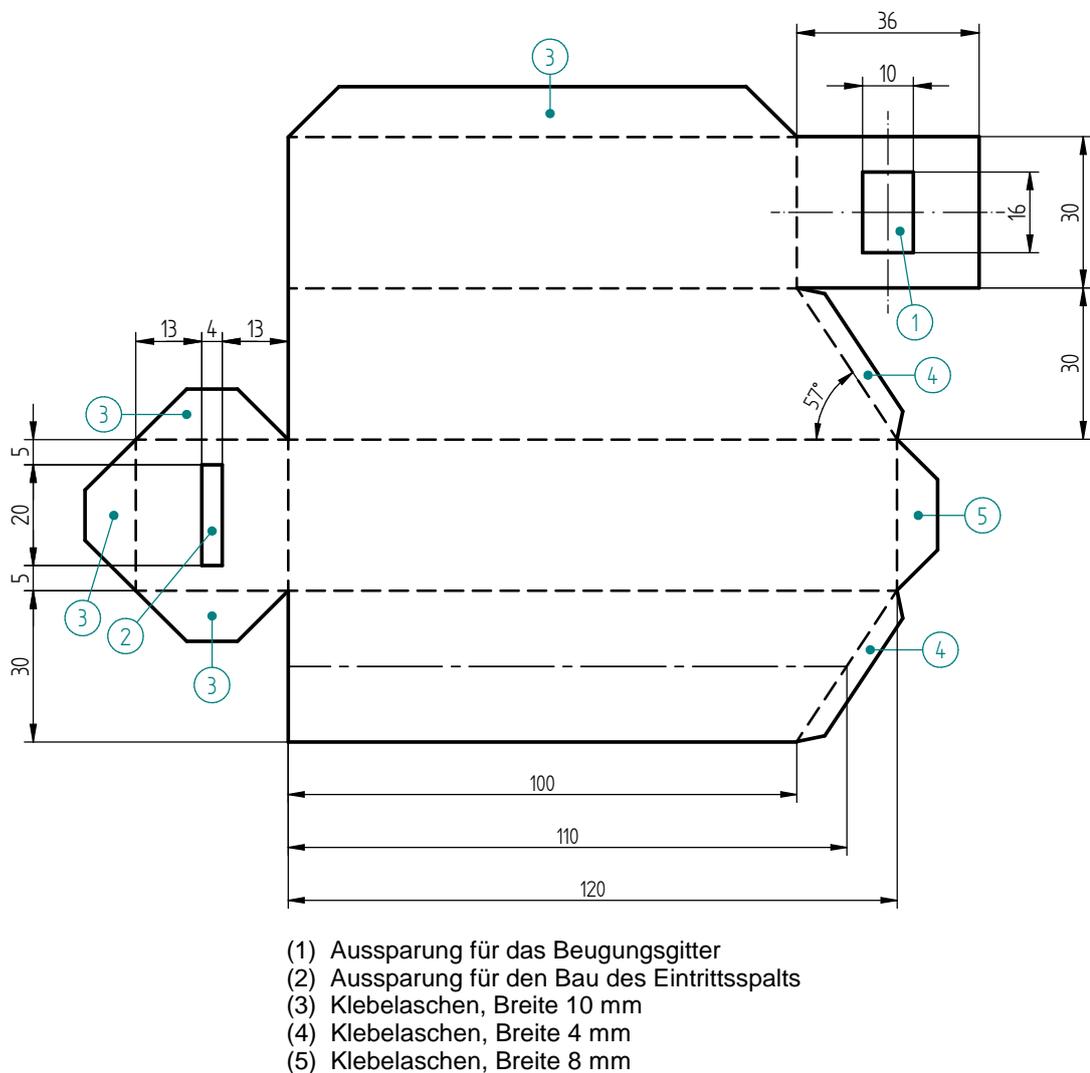
Für den Bau des Eintrittsspalts werden zwei Rechtecke aus Fotokarton der Größe  $6 \times 26$  mm verwendet, welche auf eine Aussparung am hinteren Ende des Gehäuses angebracht werden. Dabei werden beide Rechtecke so weit zusammengesoben, dass zwischen ihnen ein schmaler Spalt entsteht. Um einen möglichst parallelen Spalt mit der gewünschten Breite zu erhalten, wird beim Anbringen zwischen den beiden Rechtecken ein ebenes Material mit bekannter Dicke gespannt: Ein Blatt Papier mit  $80 \text{ g/m}^2$  besitzt z.B. eine Dicke von ca.  $0,10$  mm und ein Blatt Papier mit  $180 \text{ g/m}^2$  eine Dicke von ca.  $0,20$  mm. Die Spaltbreite kann somit individuell angepasst werden. Als Kompromiss zwischen hohem Auflösungsvermögen und hoher Signalstärke sollte die Spaltbreite allerdings im Bereich von  $0,10$  mm bis  $0,30$  mm liegen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Handyspektrometer mit einer Eintrittsspaltbreite von  $0,10$  mm und eines mit einer Eintrittsspaltbreite von  $0,20$  mm konstruiert.

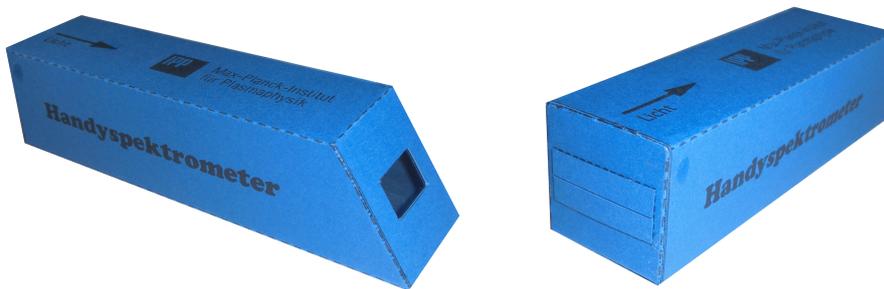
## Konstruktionsnetz

In Abbildung 3.4 ist das Netz des konstruierten Handyspektrometers unter Berücksichtigung aller Anforderungen mit Bemaßung in [mm] dargestellt und in Abbildung 3.5 Fotos des fertig zusammengebauten Handyspektrometers aus zwei unterschiedlichen Perspektiven.

Der entwickelte Kartonbausatz und die dazugehörige Bauanleitung sind im Anhang A aufgeführt.



**Abbildung 3.4:** Netz des Handyspektrometers mit Bemaßung in [mm].



**Abbildung 3.5:** Fertig zusammengebautes Handyspektrometer aus unterschiedlichen Perspektiven.

### 3.3 Aufsetzeinheiten für Smartphones

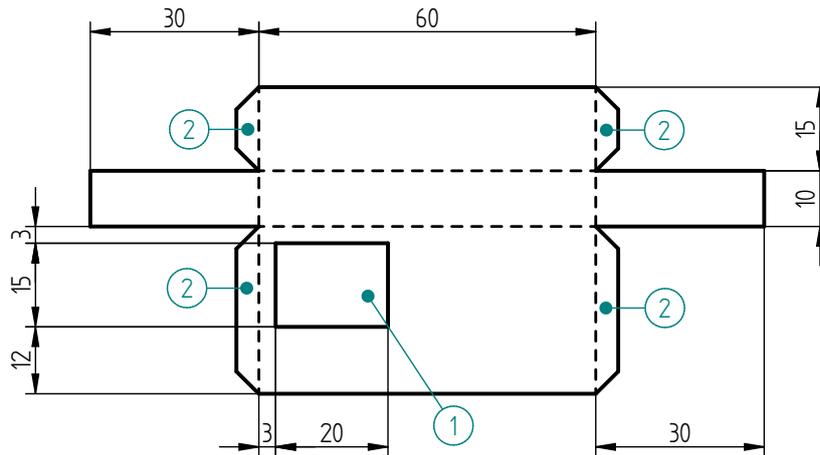
Damit das Handyspektrometer am Handy befestigt und richtig über der Kamera positioniert werden kann, wurden drei verschiedene Aufsetzeinheiten konstruiert:

- Eine Aufsetzeinheit für das Versuchshandy *iPhone4s* von *Apple*.
- Eine anpassbare Aufsetzeinheit für Smartphones mit einer Dicke zwischen 9 und 11 mm, deren Handykamera sich auf der oberen Hälfte der Rückseite befindet.
- Eine universelle Aufsetzeinheit.

Die Aufsetzeinheiten wurden so konstruiert, dass damit das Spektrometer schnell und einfach am Handy angebracht werden kann und sich die gesamte Einheit während dem Aufnehmen der Spektren nicht verschiebt. Außerdem sollen die Aufsetzeinheiten das Eindringen von Streulicht vermeiden, welches die Spektren verzerren würde. Die Aufsetzeinheiten werden aus dem gleichen Fotokarton gefertigt wie das Spektrometer-Gehäuse und jeweils auf die Vorderseite des Handyspektrometers geklebt.

Für das *iPhone4s* von *Apple* wurde eine passgenaue Aufsetzeinheit konstruiert, sodass auch bei mehrmaligem Abnehmen und wieder Aufsetzten der gesamten Einheit die relative Position zwischen Gitter und Sensor reproduzierbar bleibt. Das Netz dieser Aufsetzeinheit ist in Abbildung 3.6 mit Bemaßung dargestellt. Die Aufsetzeinheit besitzt eine Aussparung, sodass die Kameralinse freiliegt. Das Spektrometer wird so auf den Aufsatz geklebt, dass das Gitter mittig über der Kameralinse liegt und der Eintrittsspalt möglichst senkrecht auf die Sensorzeilen abgebildet wird, um ein Beugungsbild zu erhalten, bei dem die Spektrallinien

senkrecht bzw. parallel zum Bildrand verlaufen. Für eine einfachere Justierung des Spektrometers am Aufsatz, wurde an der Aufsetzeinheit eine größere Aussparung angebracht, als für das Gitter nötig. In Abbildung 3.7 ist das Versuchshandy inklusive Handyspektrometer und angebrachter Aufsetzeinheit aus der Seitenansicht abgebildet.



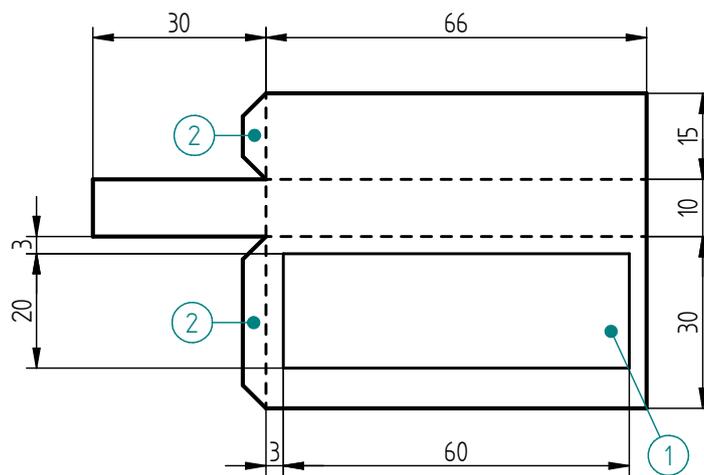
- (1) Aussparung für die Handykamera
- (2) Klebelaschen, Breite 4 mm

**Abbildung 3.6:** Netz der Aufsetzeinheit für das Versuchshandy iPhone4s von Apple mit Bemaßung in [mm].



**Abbildung 3.7:** Seitenansicht des Handyspektrometers mit befestigtem Aufsatz, angebracht am iPhone4s von Apple.

Der anpassbaren Aufsetzeinheit liegt die Aufsetzeinheit für das *iPhone* zugrunde. Allerdings wird hier eine Seite offen gelassen, damit die Aufsetzeinheit unabhängig von der Breite des Smartphones ist. In Abbildung 3.8 ist das Netz dieser Aufsetzeinheit mit Bemaßung dargestellt. Je nachdem, wo sich die Kamera befindet, muss innerhalb des Bereichs (1) noch eine Aussparung angebracht werden, so dass später das Gitter direkt vor der Kameralinse liegt. Die Aussparung sollte mindestens die Größe der Gitteröffnung besitzen, damit das Gitter freiliegt. Das Spektrometer wird wiederum so justiert, dass sich das Gitter mittig über der Kameralinse befindet und der Eintrittsspalt senkrecht auf die Sensorzeilen abgebildet wird. Beim Aufnehmen der Spektren sollte die Aufsetzeinheit zusätzlich mit einem Stück Isolierband auf der Rückseite des Smartphones befestigt werden, damit diese sich nicht verschiebt und kein Streulicht eindringt.

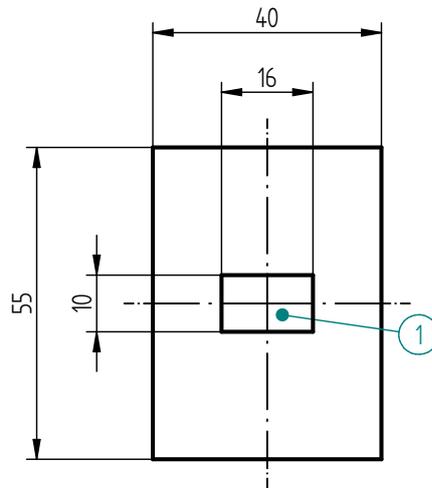


- (1) In diesem Bereich wird die Aussparung für die Handykamera angebracht.  
 (2) Klebelaschen, Breite 4 mm

**Abbildung 3.8:** Netz der anpassbaren Aufsetzeinheit für Smartphones mit einer Dicke zwischen 9 und 11 mm mit Bemaßung in [mm].

Für Smartphones, welche keine geeignete Dicke für die anpassbare Einheit besitzen, wurde ein allgemeiner Aufsatz konstruiert. Das Netz ist in Abbildung 3.9 mit Bemaßung dargestellt. Dieser Aufsatz besteht lediglich aus einem Rechteck aus Fotokarton, mit einer mittigen Aussparung in der Größe der Gitteröffnung des Spektrometers. Dieser wird auf die Vorderseite des Handyspektrometers geklebt, sodass das Gitter freiliegt. Da der Aufsatz eine größere Fläche als die Vorderseite des Spektrometers besitzt, entsteht ein überstehender Rand. Mit einem Isolierband kann das Spektrometer dadurch am Handy befestigt werden. Dabei muss

wieder auf die richtige Ausrichtung des Gitters bzgl. der Kameralinse und des Sensors geachtet werden. Dieser Aufsatz ist für nahezu jedes Smartphone geeignet, allerdings ist kein schnelles Abnehmen und Aufsetzen der Einheit möglich. Desweiteren ist es schwierig, das Spektrometer nach dem Abnehmen wieder an derselben Position anzubringen, weshalb die relative Position zwischen Gitter und Sensor nicht reproduzierbar ist.



(1) Aussparung für die Handykamera

**Abbildung 3.9:** Netz der universellen Aufsetzeinheit mit Bemaßung in [mm] für ein Smartphone mit beliebigen Abmessungen.



## 4 Charakterisierung des Handyspektrometers

### 4.1 Aufnahme von Emissionsspektren

Für die Aufnahme von Emissionsspektren wird das Handyspektrometer am Smartphone befestigt und dieses im Kameramodus ohne Blitzautomatik betrieben. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Spektren mit folgenden Kameraeinstellungen aufgenommen: ISO-Filmempfindlichkeit 800, Mehrfeld-Messmodus und normales Belichtungsprogramm.

Der Eintrittsspalt wird zur Lichtquelle hin ausgerichtet.

Da auf den Sensor der Handykamera der Eintrittsspalt abgebildet wird, erhält man als Beugungsbild verschieden farbige und zueinander parallele Linien, wobei die verschiedenen Farben unterschiedlichen Wellenlängen entsprechen. Die Orientierung der Linien ist abhängig von der Justierung des Spektrometers beim Anbringen an die Aufsetzeinheit bzw. beim Befestigen am Smartphone (siehe Kapitel 3.3). Im Idealfall sind die Linien senkrecht bzw. parallel zum Bildrand ausgerichtet.

Je nach Intensität der Lichtquelle, muss der Abstand zwischen Eintrittsspalt und Lampe vergrößert oder verringert werden, damit das Spektrum nicht über- oder unterbelichtet wird. Bei einer Überbelichtung werden die einzelnen Linien im Beugungsbild nicht mehr scharf abgebildet und bei einer zu geringen Intensität können die einzelnen Spektrallinien von der Handykamera nicht mehr aufgelöst werden.

## 4.2 Auswertung der Bilder mittels

### Grauwertprofilanalyse

Mithilfe des frei zugänglichen Grafikprogramms *ImageJ* [1] wird für die aufgenommenen Emissionsspektren jeweils ein Grauwertprofil erstellt. Ein Grauwertprofil beschreibt die Grauwerte der einzelnen Bildpunkte entlang einer Linie, die beliebig durch das zu untersuchende Bild gelegt werden kann. Der Grauwert bzw. die Graustufenintensität  $GW$  gibt die scheinbare Helligkeit eines einzelnen Bildpunktes wieder, unabhängig von der Farbe. Je heller ein Bild bzw. Bildpunkt erscheint, desto größer ist der entsprechende Grauwert. Der Bestimmung des Grauwerts wird die additive Farbmischung zugrunde gelegt. Bei der additiven Farbmischung setzt sich ein Farbwert aus den Farben **R**ot, **G**rün und **B**lau zusammen. Der  $RGB$ -Farbwert wird in der Form  $(R, G, B)$  angegeben, wobei  $R$ ,  $G$  und  $B$  Werte zwischen 0 und 255 annehmen können. Reines Rot hat z.B. den Farbwert  $(255, 0, 0)$ , reines Grün  $(0, 255, 0)$  und reines Blau  $(0, 0, 255)$ . Die Graustufenintensität  $GW$  wird innerhalb des Programms *ImageJ* wie folgt berechnet:

$$GW = \frac{1}{3} \cdot R + \frac{1}{3} \cdot G + \frac{1}{3} \cdot B. \quad (4.1)$$

In Tabelle 4.1 sind die  $RGB$ -Farbwerte und Grauwerte für reines Blau, Cyan, Grün, Gelb und Rot angegeben. Für Blau, Grün und Rot erhält man jeweils einen Grauwert von 85 und für Cyan und Gelb einen Grauwert von 170. Infolgedessen weist das Grauwertprofil eines kontinuierlichen Emissionsspektrums Intensitätsschwankungen auf.

**Tabelle 4.1:**  $RGB$ -Farbwerte und Grauwerte für verschiedene Farben.

Farbe	$RGB$ -Farbwert	Grauwert
Blau	$(0, 0, 255)$	85
Cyan	$(0, 255, 255)$	170
Grün	$(0, 255, 0)$	85
Gelb	$(255, 255, 0)$	170
Rot	$(255, 0, 0)$	85

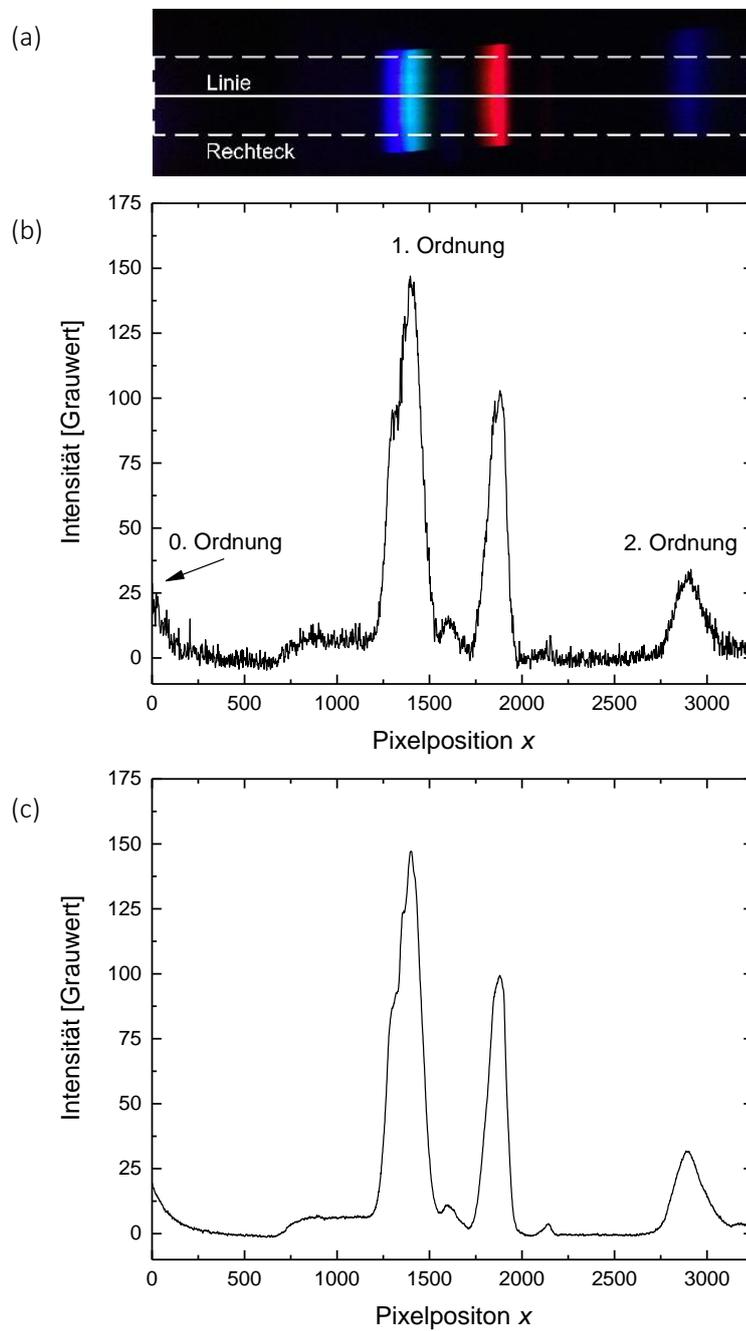
Wie bereits erwähnt, wird das Grauwertprofil entlang einer Linie, die durch das Bild verläuft, erstellt. Es ist aber auch möglich, über einen rechteckigen Bereich das Grauwertprofil zu erstellen. Dabei wird auf der  $y$ -Achse die durchschnittliche Grauwertintensität des ausgewählten Bereichs aufgetragen und somit das

Bildrauschen verringert. Für das Beugungsbild einer violetten LED wurde das Grauwertprofil einmal entlang einer Linie und ein zweites Mal mittels Rechteck erstellt. Das Beugungsbild und die entsprechenden Grauwertprofile sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Das Rauschen beim Grauwertprofil, welches über ein Rechteck erstellt wurde, ist deutlich geringer. Für die Auswertung der Emissionsspektren sollten deshalb die Grauwerte stets über ein Rechteck ermittelt werden.

Im Spektrum der violetten LED lassen sich neben der 1. Ordnung, auch die 2. Ordnung und noch schwach die 0. Ordnung beobachten.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte zum Erstellen eines Grauwertprofils mit dem Grafikprogramm *ImageJ* genauer erläutert:

Über die Menüpunkte *File* und *Open* wird das auszuwertende Bild geöffnet. Das Spektrum muss so ausgerichtet sein, dass die Spektrallinien parallel zur *y*-Achse verlaufen. Ist das Bild um  $90^\circ$  gedreht, kann dieses über die Menüpunkte *Image*, *Transform* und *Rotate 90 Degrees Right* oder *Rotate 90 Degrees Left* gedreht werden. Mithilfe des *Rechteck*-Buttons wird mittig im Spektrum ein rechteckiger Bereich ausgewählt. Die Länge des Rechtecks muss sich vom äußersten linken Bildrand bis zum äußersten rechten Bildrand erstrecken, damit die einzelnen Profile denselben Start- und Endwert besitzen, um diese miteinander vergleichen zu können. Die Breite des ausgewählten Bereichs wird so angepasst, dass sich die obere und untere Rechteckkante etwas innerhalb des Spektrums befinden. Verlaufen die Spektrallinien nicht exakt parallel bzw. senkrecht zu den Rechteckkanten, muss der ausgewählte Bereich dementsprechend gedreht werden, da ansonsten über mehrere Pixelpositionen gemittelt wird. Hierbei ist es wichtig, nur den ausgewählten Bereich zu drehen, damit die relativen Abstände der Spektrallinien zum Bildrand erhalten bleiben. Über die Menüpunkte *Image*, *Transform* und *Rotate* kann der ausgewählte Bereich um den entsprechenden Winkel gedreht werden. Das Grauwertprofil wird über die Menüpunkte *Analyze* und *Plot Profile* erstellt. Auf der *x*-Achse wird die Pixelposition aufgetragen und auf der *y*-Achse die entsprechenden Grauwerte. Mithilfe der *Live*-Funktion passt sich das Grauwertprofil zeitgleich der Änderung des Auswahlbereichs an. Die Daten des Grauwertprofils werden über den Menüpunkt *List* ausgegeben.



**Abbildung 4.1:** Varianten zur Erstellung eines Grauwertprofils am Beispiel einer violetten LED: (a) Beugungsbild, (b) Grauwertprofilerstellung mittels Linie, (c) Grauwertprofilerstellung mittels Rechteck.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Daten aus *ImageJ* mit dem Datenanalyse- und Grafikprogramm *OriginPro* [16] ausgewertet und damit die Intensitätsspektren in Abhängigkeit von der Wellenlänge erstellt. In Schulen wird hauptsächlich mit dem Tabellenkalkulationsprogramm *Microsoft Excel* [17] gearbeitet, welches für die Auswertung der Daten aus *ImageJ* ebenso geeignet ist.

Bei dem für diese Arbeit verwendeten Handyspektrometer mit einem Eintrittsspalt der Breite 0,10 mm, mussten die Spektren beim Erstellen der Grauwertprofile um jeweils  $1,9^\circ$  gedreht werden.

Für das Erstellen des Grauwertprofils eines Emissionsspektrums wird jedes Mal von Neuem ein rechteckiger Bereich aus dem Spektrum ausgewählt, d.h. die Größe und Position des ausgewählten Bereichs variiert von Spektrum zu Spektrum. Um dabei entstehende Fehler zu ermitteln, wurde für ein Beugungsbild das Grauwertprofil dreimal erstellt. Da die Länge des Rechtecks immer gleich ist, ergeben sich für die Pixelpositionen keine Abweichungen. Die Grauwertintensitäten und das Rauschen verändern sich allerdings mit der Breite und Position des Rechtecks. Die Abweichungen sind jedoch gering, sodass diese vernachlässigt werden können.

## 4.3 Wellenlängenkalibrierung und Intensitätskalibrierung

### Wellenlängenkalibrierung

Bei der Wellenlängenkalibrierung werden den Pixelpositionen Wellenlängen zugeordnet. Für die Wellenlängenkalibrierung des Handyspektrometers wird die lineare Dispersion als konstant angenommen. Nach Gleichung (2.8) kann diese Annahme getroffen werden, wenn  $\cos(\alpha_m) \approx 1$  gilt. Für den sichtbaren Bereich erhält man nach Gleichung (2.2) in der 1. Ordnung für das Handyspektrometer bei einem Eintrittswinkel von  $\alpha_e = -33^\circ$  Beugungswinkel zwischen  $-9^\circ$  und  $12^\circ$ . Daraus ergibt sich ein maximaler theoretischer Fehler von 2 %, wobei der theoretische Fehler die Abweichung von  $\cos(\alpha_m)$  von 1 angibt. Für die 2. Ordnung erhält man Beugungswinkel zwischen  $14^\circ$  und  $73^\circ$ , d.h. der theoretische Fehler liegt hier zwischen 3 % und 71 %. Da das Handyspektrometer auf die 1. Ordnung ausgelegt ist und somit vom Spektrum 2. Ordnung evtl. nur die niedrigen Wellenlängen zu sehen sind, kann näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen Wellen-

länge und Pixelposition angenommen werden. Mithilfe zweier bekannter Linien im Emissionsspektrum kann somit die reziproke lineare Dispersion berechnet und jeder Pixelposition eine Wellenlänge zugeordnet werden.

Damit eine Wellenlängenkalibrierung durchgeführt werden kann, muss das Spektrum eines Linienstrahlers, z.B. einer Quecksilberdampf Lampe, aufgenommen werden. Die einzelnen Peaks können im Emissionsspektrum des Linienstrahlers eindeutig den entsprechenden Wellenlängen zugeordnet werden. Die Physiksammlung vieler Schulen verfügt allerdings nicht immer über einen Linienstrahler. In diesem Falle kann zur Wellenlängenkalibrierung auch eine weiße Kompaktleuchtstofflampe herangezogen werden, da in ihrem Emissionsspektrum zwei Quecksilberlinien eindeutig identifiziert werden können. Die im Rahmen dieser Arbeit konstruierten Handyspektrometer mit einer Eintrittsspaltbreite von 0,10 mm bzw. 0,20 mm wurden deshalb anhand einer weißen Kompaktleuchtstofflampe kalibriert.

Im Folgenden wird exemplarisch die reziproke lineare Dispersion für das Handyspektrometer mit einer Eintrittsspaltbreite von 0,20 mm berechnet:

In Abbildung 4.2 ist ein Ausschnitt aus dem Beugungsbild einer weißen Kompaktleuchtstofflampe und das dazugehörige Grauwertprofil dargestellt. Auf der  $x$ -Achse ist die Pixelposition  $x$  aufgetragen und auf der  $y$ -Achse die Grauwertintensität. Rot eingezeichnet sind die Positionen der bekannten blauen und grünen Quecksilberlinien. Die blaue Quecksilberlinie mit  $\lambda = 435,84$  nm befindet sich im Grauwertprofil bei der Pixelposition  $x = 1259$  Pixel und die grüne Quecksilberlinie mit  $\lambda = 546,07$  nm bei  $x = 1605$  Pixel. Die Literaturwerte für die Spektrallinien von Quecksilber wurden aus [18] entnommen.

Die Dispersion wird als konstant angenommen, d.h. für die reziproke lineare Dispersion gilt nach Gleichung (2.7):

$$D_L^{-1} = \frac{d\lambda}{dx} = \text{const.}$$

Durch Integration erhält man für die Wellenlänge in Abhängigkeit der Pixelposition die Gleichung:

$$\lambda = a \cdot x + b, \quad \text{wobei } a, b \in \mathbb{R} \text{ Kalibrierkonstanten.} \quad (4.2)$$

Daraus folgt für die beiden Quecksilberlinien:

$$(I) \ 435,84 \text{ nm} = a \cdot 1259 \text{ Pixel} + b \quad \text{und} \quad (II) \ 546,07 \text{ nm} = a \cdot 1605 \text{ Pixel} + b.$$

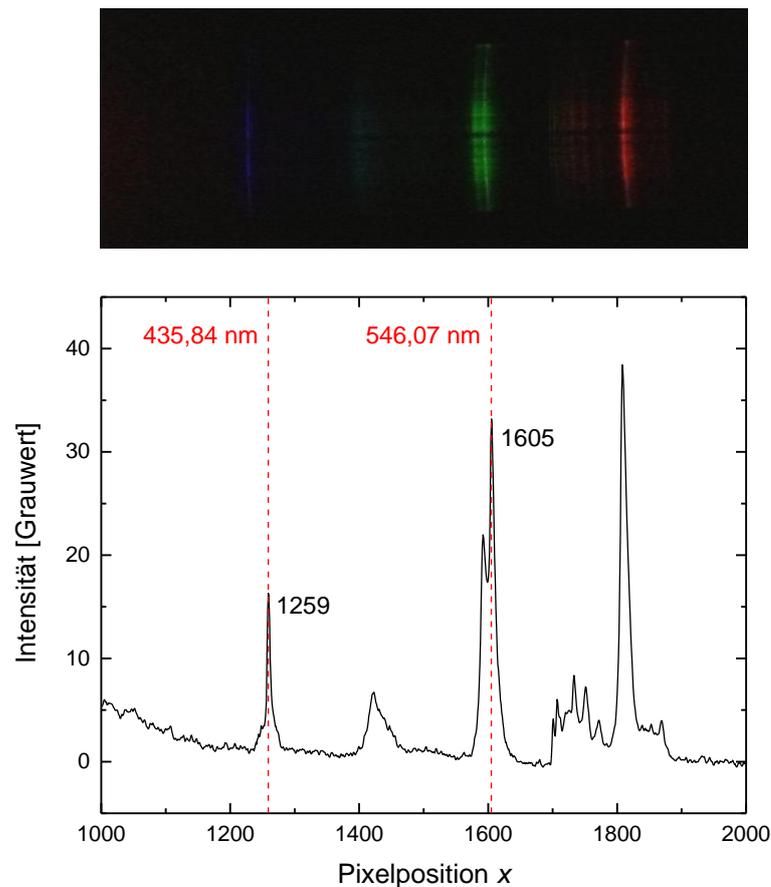
Lösen des Gleichungssystems liefert:

$$a = 0,3186 \frac{\text{nm}}{\text{Pixel}} \quad \text{und} \quad b = 34,74 \text{ nm}.$$

Setzt man  $a$  und  $b$  nun in Gleichung (4.2) ein, so erhält man

$$\lambda = 0,3186 \frac{\text{nm}}{\text{Pixel}} \cdot x + 34,74 \text{ nm}. \quad (4.3)$$

Mithilfe von Gleichung (4.3) kann somit jeder Pixelposition im Emissionsspektrum eine Wellenlänge zugeordnet werden.



**Abbildung 4.2:** Wellenlängenkalibrierung: Ausschnitt aus dem Beugungsbild und dazugehöriges Grauwertprofil einer weißen Kompaktleuchtstofflampe. Im Grauwertprofil sind die Literaturwerte für die blaue und grüne Quecksilberlinie rot eingezeichnet.

Die reziproke lineare Dispersion wird konstant als  $0,3186 \text{ nm/Pixel}$  angenommen, wodurch ein Kalibrierungsfehler entsteht, welcher zu einer Wellenlängenverschiebung führt. Der Kalibrierungsfehler kann ermittelt werden, wenn sich im Spektrum eine weitere Spektrallinie eindeutig identifizieren lässt. Aus dem Vergleich der Peakposition im Emissionsspektrum mit dem entsprechenden Literaturwert kann somit auf den Kalibrierungsfehler geschlossen werden.

Da im Spektrum der weißen Kompaktleuchtstofflampe keine weitere Quecksilberlinie eindeutig identifizierbar ist, kann der Kalibrierungsfehler nicht berechnet werden. Deshalb wird das Spektrometer zusätzlich noch an einer Quecksilberdampfampe kalibriert. Auch hierfür wird die blaue und grüne Quecksilberlinie herangezogen. Aus dem Emissionsspektrum erhält man für die beiden gelben Hg-Linien Wellenlängen von  $576,7 \text{ nm}$  und  $579,9 \text{ nm}$ . Die Literaturwerte liegen bei  $576,96 \text{ nm}$  und  $579,07 \text{ nm}$  [18], d.h. der Kalibrierungsfehler liegt unter  $1 \text{ nm}$ .

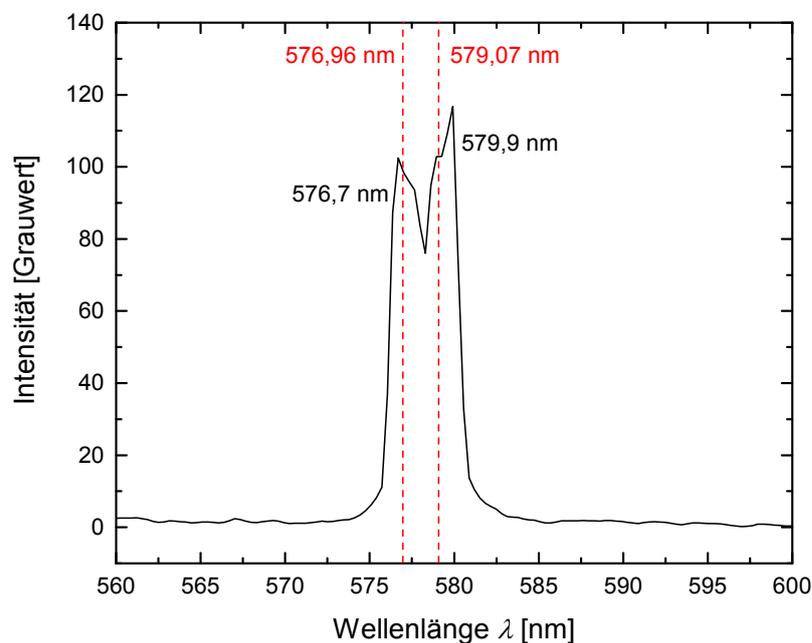
Die Schrittweite, d.h. der Abstand zwischen zwei Pixeln, beträgt nach Gleichung (4.3)  $0,3 \text{ nm}$ . Die Auswertungsgenauigkeit liegt damit bei  $\pm 0,3 \text{ nm}$ . Für die  $576,96 \text{ nm}$ -Linie ergibt sich somit eine Abweichung von 1 Pixel und für die  $579,07 \text{ nm}$ -Linie eine Abweichung von 3 Pixeln von der erwarteten Peakposition. In Abbildung 4.3 sind die beiden gelben Hg-Linien aus dem Spektrum der Hg-Lampe vergrößert dargestellt. Rot eingezeichnet sind die Erwartungswerte für die Peakpositionen.

Für das Spektrum der Hg-Lampe, kalibriert an der weißen Kompaktleuchtstofflampe, ergibt sich für die blaue Linie eine Abweichung von  $1,6 \text{ nm}$  und für die grüne Linie eine Abweichung von  $0,6 \text{ nm}$ . Der Fehler beim Spektrum der weißen Kompaktleuchtstofflampe, kalibriert an der Hg-Lampe, kann hingegen im Rahmen der Auswertungsgenauigkeit vernachlässigt werden. Daraus folgt, dass bei der Kalibrierung anhand der weißen Kompaktleuchtstofflampe ein etwas größerer Fehler entsteht als bei der Kalibrierung anhand der Hg-Lampe. Der Gesamtfehler liegt somit bei ca.  $\pm 2 \text{ nm}$ . Für spektroskopische Untersuchungen im Rahmen des Physikunterrichts wird die Messgenauigkeit als ausreichend betrachtet.

Zur Bestimmung des Fehlers, der beim Abnehmen und erneuten Anbringen des Handyspektrometers am Smartphone ohne neue Wellenlängenkalibrierung entsteht, wurde dies dreimal durchgeführt und jeweils das Spektrum einer weißen Kompaktleuchtstofflampe aufgenommen. Dabei ergaben sich für die beiden bekannten Quecksilberlinien Abweichungen zwischen  $0,5 \text{ nm}$  und  $1,1 \text{ nm}$ . Der Fehler liegt im Rahmen der Messgenauigkeit von  $\pm 2 \text{ nm}$ , weshalb beim neuen Anbringen

des Spektrometers am Smartphone keine erneute Kalibrierung erforderlich ist.

In einem Linienprofil entspricht der Verlauf einer Spektrallinie einer Gauß-Kurve (siehe Kapitel 2.3). Mithilfe eines Gaußfit kann somit die Zentralwellenlänge bestimmt werden. Diese Vorgehensweise ist an Schulen nicht umsetzbar, weshalb im Rahmen dieser Arbeit die Zentralwellenlängen aus dem jeweiligen Peakmaximum ermittelt wurden. Dabei entsteht ein kleiner Fehler, der bei einer Messgenauigkeit von  $\pm 2$  nm jedoch vernachlässigt werden kann.

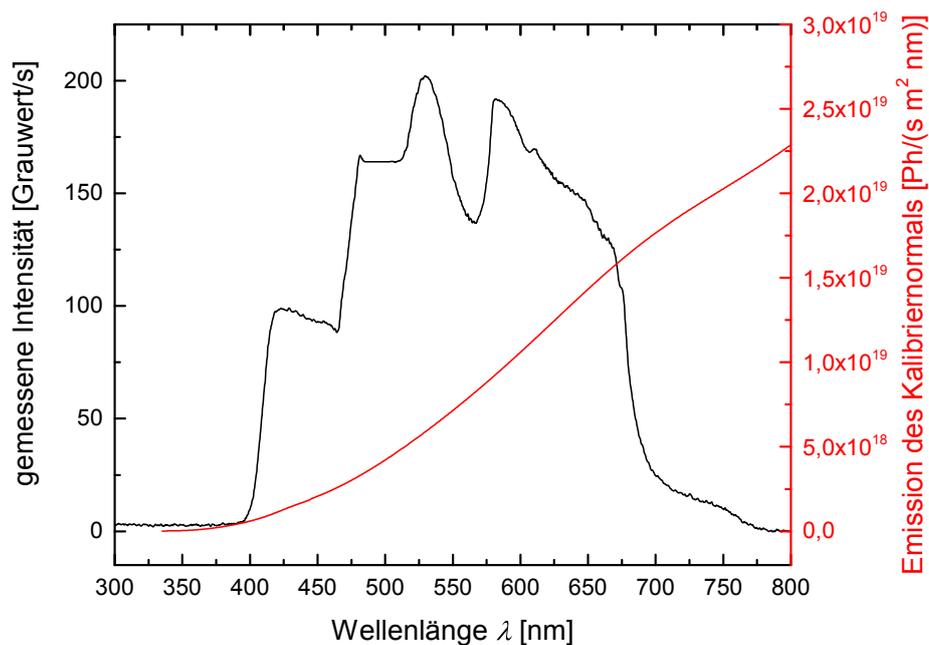


**Abbildung 4.3:** Ausschnitt aus dem Emissionsspektrum einer Quecksilberdampfampe. Rot eingezeichnet sind die Literaturwerte für die beiden gelben Quecksilberlinien.

## Bestimmung der Sensitivität der Handykamera

Aufgrund von Wärme entstehen im Halbleiter des Sensors der Handykamera freie Ladungsträger, sodass auch ohne Lichteinfall ein permanentes Signal erzeugt wird, welches sich zum tatsächlich zu messenden Signal addiert [4]. Dieser sogenannte Dunkelstrom lässt sich beim Handyspektrometer nicht mittels einer Aufnahme eines Dunkelspektrums ermitteln, da sich die Sensitivität der Handykamera automatisch erhöht, wenn zu wenig Licht einfällt. Deshalb musste der Dunkelstrom für jedes Emissionsspektrum separat in einem dunklen Bereich des Spektrums festgestellt werden. Bei den vorherigen und den nachfolgenden Emissionsspektren wurde der Dunkelstrom bereits jeweils abgezogen.

Um die Sensitivität der Handykamera zu ermitteln, wurde das Spektrum einer Lichtquelle mit bekannter Intensität (Kalibriernormal [11]), in diesem Falle einer Ulbrichtkugel [9], mit dem Handyspektrometer aufgenommen und eine Intensitätskalibrierung durchgeführt. Für das Kalibriernormal ist die Intensität bekannt, d.h. die Anzahl der Photonen, die pro Sekunde und Wellenlänge von dessen Oberfläche emittiert werden. Der Kalibrierfaktor  $K(\lambda)$  der Wellenlänge  $\lambda$  berechnet sich als Quotient aus der bekannten Emission des Kalibriernormals [Photonen/(s·m<sup>2</sup>·nm)] und der gemessenen Intensität [Grauwert/s], welche auf eine Belichtungszeit von einer Sekunde normiert wird. Beim Versuchshandy beträgt die Belichtungszeit beim Aufnehmen von Emissionsspektren 1/15s. Das normierte Spektrum der Ulbrichtkugel und die bekannte Emission des Kalibriernormals sind in Abbildung 4.4 dargestellt.

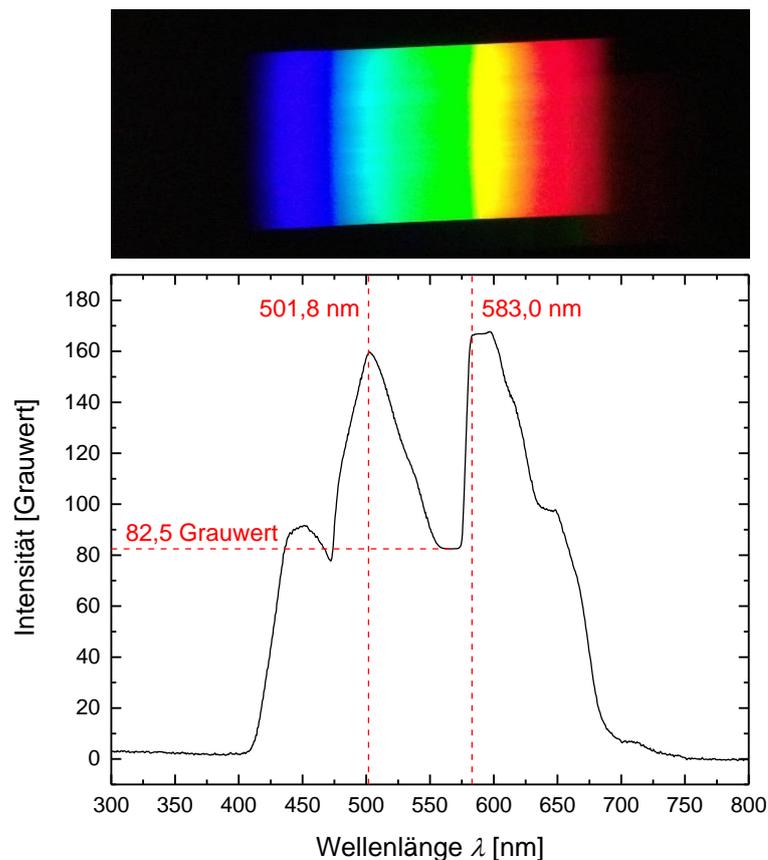


**Abbildung 4.4:** Vergleich der mit dem Handyspektrometer gemessenen Intensität der Ulbrichtkugel mit dem Kalibriernormal (rot).

Das Emissionsspektrum der Ulbrichtkugel weist scharfe Kanten und Intensitätseinbrüche auf. Diese resultieren aus der Art und Weise, wie das Grauwertprofil innerhalb des Grafikprogramms *ImageJ* erstellt wird (siehe Kapitel 4.2).

Exemplarisch werden diese Intensitätsschwankungen am Emissionsspektrum einer weißen LED genauer erläutert. Ein Ausschnitt aus dem Beugungsbild und das dazugehörige Spektrum sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Im Wellenlängenbereich

zwischen 501,8 nm und 583,0 nm kommt es zu einem Intensitätseinbruch, da Grün einen geringeren Grauwert besitzt als Cyan und Gelb (siehe Kapitel 4.2). Der Grauwert im Bereich zwischen 560,4 nm und 572,8 nm beträgt 82,5, d.h. hier liegt nahezu reines Grün vor. Die scharfe Kante bei ca. 578 nm spiegelt daher den sprunghaften Übergang von Grün nach Gelb wieder und ist nicht mit der tatsächlichen Emissionscharakteristik der Lichtquelle verknüpft.



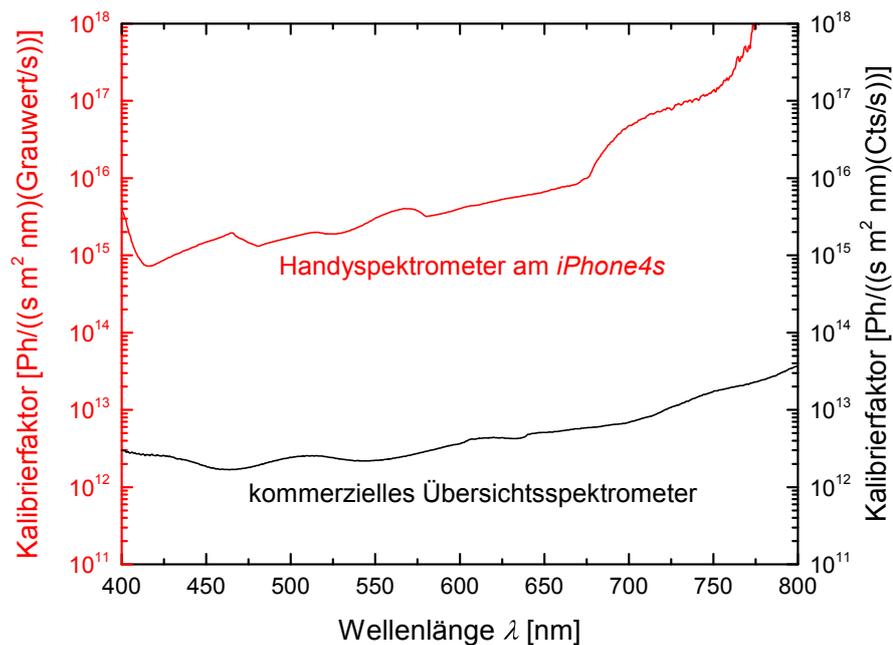
**Abbildung 4.5:** Ausschnitt aus dem Beugungsbild und dazugehöriges Emissionsspektrum einer weißen LED.

In Abbildung 4.6 ist der Kalibrierfaktor für das Handyspektrometer dargestellt. Um nun eine Aussage über die Sensitivität der Handykamera treffen zu können, wird der Kalibrierfaktor des Handyspektrometers mit dem bekannten Kalibrierfaktor eines kommerziellen Übersichtsspektrometers der Firma *Plasus* ( $FWHM = 1,2\text{--}1,5\text{ nm}$ ), welches eine sehr hohe Sensitivität besitzt, verglichen. Der Kalibrierfaktor des kommerziellen Übersichtsspektrometers ist ebenfalls in Abbildung 4.6 dargestellt. Je niedriger der Kalibrierfaktor ist, desto höher ist die Sensitivität des Spektrometers. Der Kalibrierfaktor für das Handyspektrometer ist um den Faktor  $10^3$  größer

als der des kommerziellen Übersichtsspektrometers, d.h. die Sensitivität des Handyspektrometers ist um diesen Faktor geringer. Für den vorgesehenen Einsatz des Handyspektrometers im Physikunterricht ist diese Sensitivität jedoch ausreichend: Die aufgenommenen Emissionsspektren weisen ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis auf und werden auch bei einer Eintrittsspaltbreite des Handyspektrometers von nur 0,10 nm noch gut vom Sensor erfasst.

Der Kalibrierfaktor des Handyspektrometers weist im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 600 nm Sprünge auf, welche die Intensitätseinbrüche des Emissionsspektrums aufgrund der Grauwertberechnung widerspiegeln. Die Intensitätseinbrüche sind somit im Kalibrierfaktor beinhaltet.

An Schulen ist eine Intensitätskalibrierung nicht ohne Weiteres durchführbar, weshalb im Unterricht auf die Ursache der Intensitätsschwankungen bei kontinuierlichen Emissionsspektren hingewiesen werden muss.



**Abbildung 4.6:** Vergleich des Kalibrierfaktors des Handyspektrometers mit 0,20 mm Eintrittspalt am iPhone4s (rot) mit dem eines kommerziellen Übersichtsspektrometers der Firma Plasus.

## 4.4 Betrachtung der Messgenauigkeit anhand von Spektren verschiedener Lichtquellen

Alle im Rahmen dieser Arbeit mit einem Handyspektrometer aufgenommenen Beugungsbilder mit den zugehörigen Emissionsspektren sind in Anhang B aufgeführt. Im Folgenden werden einzelne Emissionsspektren genauer analysiert. Falls nicht anders angegeben, wurden diese jeweils mit einem Handyspektrometer mit einem Eintrittsspalt der Breite 0,20 mm aufgenommen.

### Apparateprofil

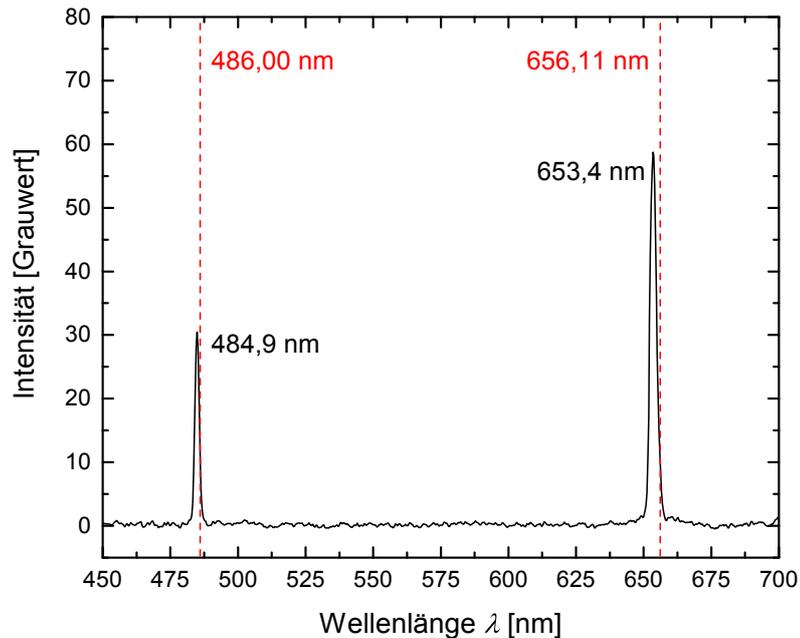
Eine Aussage über das Auflösungsvermögen des Handyspektrometers lässt sich anhand des Emissionsspektrums einer Niederdruckgasentladungslampe machen: Bei Niederdruckgasentladungslampen dominiert im Linienprofil das Apparateprofil, welches dem Verlauf einer Gauß-Kurve entspricht (siehe Kapitel 2.3). Die Halbwertsbreite der Spektrallinien liefert somit ein Maß für das Auflösungsvermögen des Spektrometers.

Als Niederdruckgasentladungslampe wird hierfür eine Deuterium-Niederdrucklampe [19] verwendet. Die beiden charakteristischen Emissionslinien von Deuterium entstehen beim elektronischen Übergang von der Hauptquantenzahl  $n = 3$  nach  $n = 2$  ( $\alpha$ -Linie bei 656,11 nm [20]) und von  $n = 4$  nach  $n = 2$  ( $\beta$ -Linie bei 486,00 nm [20]).

In Abbildung 4.7 ist das Spektrum der Deuterium-Niederdrucklampe dargestellt. Die spektrale Position der  $\alpha$ -Linie weicht im Spektrum um ca. 2,7 nm und die der  $\beta$ -Linie um ca. 1,1 nm vom jeweiligen Literaturwert ab. Die größere Abweichung bei der  $\alpha$ -Linie lässt sich auf die Wellenlängenkalibrierung zurückführen: Bei der Wellenlängenkalibrierung wurde die Dispersion als konstant angenommen (siehe Kapitel 4.3). Aufgrund dieser Näherung ergibt sich für die  $\alpha$ -Linie ein theoretischer Fehler von 0,6 % (3,9 nm) und für die  $\beta$ -Linie ein entsprechend kleinerer Fehler von 0,2 % (1,0 nm). Die Messgenauigkeit beträgt  $\pm 2$  nm, d.h. die Abweichungen liegen innerhalb des erwarteten Bereichs.

Zur Bestimmung der Halbwertsbreite werden beide Spektrallinien jeweils mit einer Gauß-Kurve angepasst. In Abbildung 4.8 sind die  $\alpha$ - und die  $\beta$ -Linie mit gefitteter Gauß-Kurve einzeln dargestellt. Beide Spektrallinien stimmen sehr gut mit dem Verlauf der gefitteten Gauß-Kurven überein und besitzen eine Halbwertsbreite von

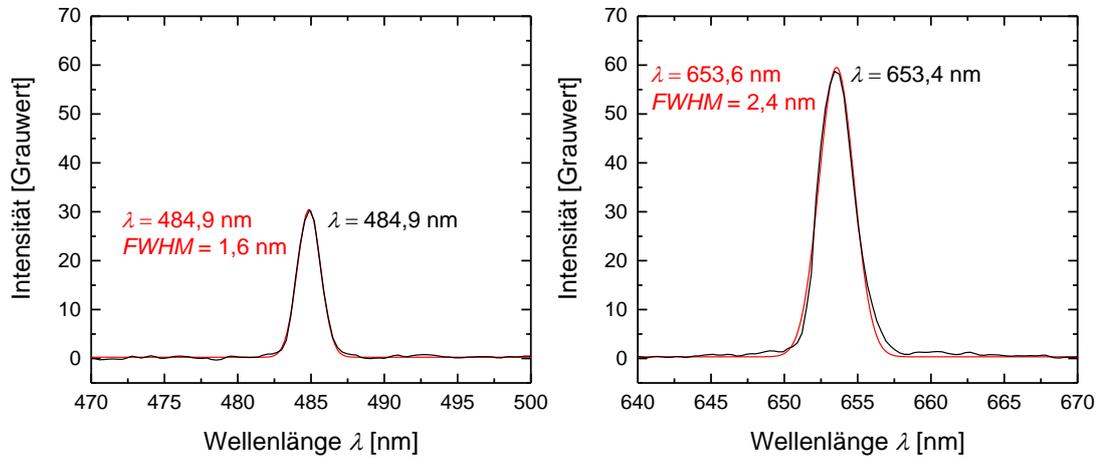
2,4 nm ( $\alpha$ -Linie) bzw. 1,6 nm ( $\beta$ -Linie). Die Halbwertsbreiten liegen damit im Bereich von kommerziellen Übersichtsspektrometern und sind daher weit ausreichend.



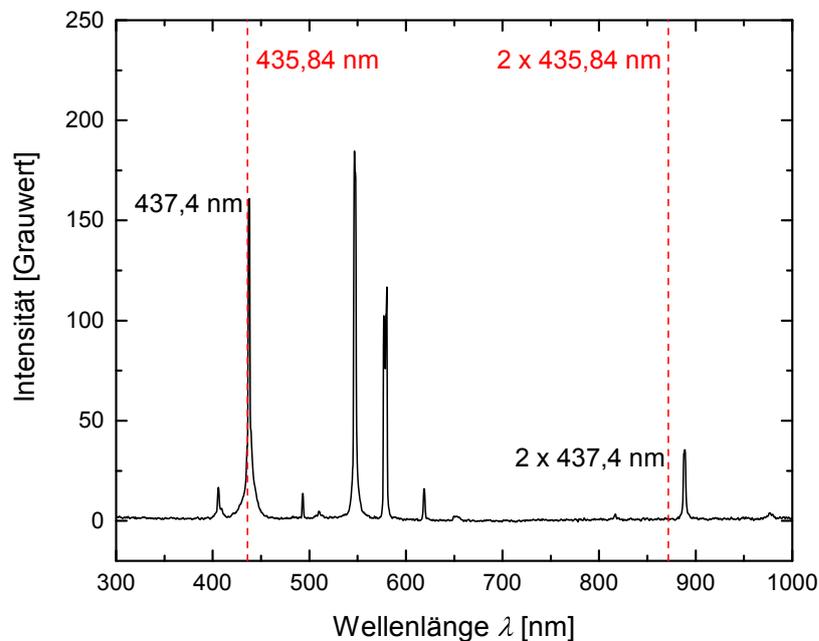
**Abbildung 4.7:** Emissionsspektrum einer Deuterium-Lampe. Rot eingezeichnet sind die Literaturwerte für die  $\alpha$ - und  $\beta$ -Linie von Deuterium.

## Betrachtung der 2. Ordnung

In einigen Spektren lässt sich die 2. Ordnung beobachten, wie z.B. im Emissionsspektrum der Hg-Lampe, welches in Abbildung 4.9 dargestellt ist. Bei der Hg-Lampe wird die 435,84 nm-Linie in 2. Ordnung noch vom Sensor erfasst, allerdings befindet sich diese im Spektrum ca. 18 nm zu weit rechts. Aufgrund der Annahme einer konstanten Dispersion bei der Wellenlängenkalibrierung ist eine starke Verschiebung in 2. Ordnung jedoch zu erwarten (siehe Kapitel 4.3). Hinsichtlich der starken Wellenlängenverschiebung und der geringeren Intensität in 2. Ordnung eignet sich beim Handyspektrometer nur die 1. Ordnung für spektrale Untersuchungen.



**Abbildung 4.8:** Links ist die  $\beta$ - und rechts die  $\alpha$ -Linie von Deuterium aus dem Emissionsspektrum einer Deuterium-Niederdrucklampe vergrößert dargestellt. Beide Spektrallinien wurden jeweils mit einer Gaußkurve (rot) angepasst und daraus die Halbwertsbreite FWHM und die Peakposition bestimmt.



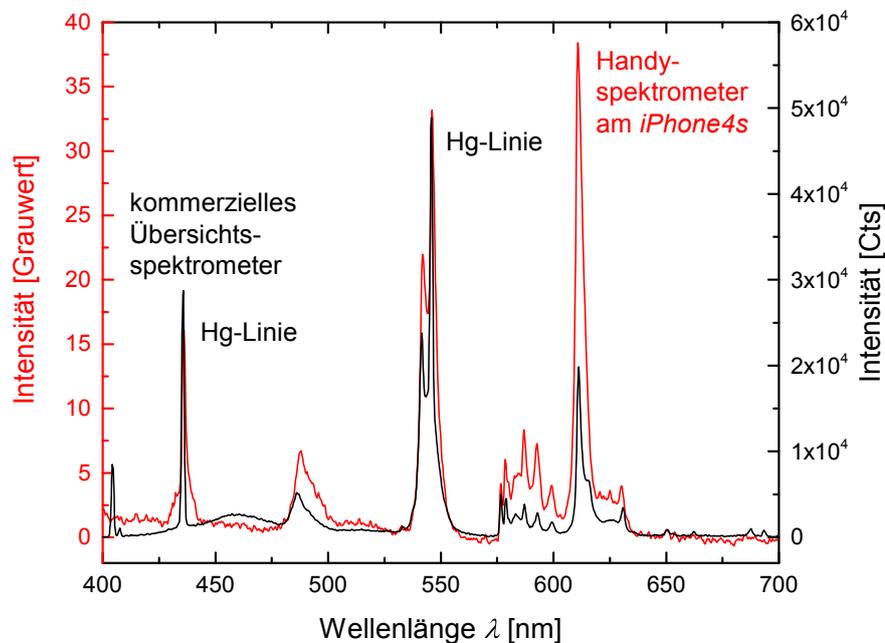
**Abbildung 4.9:** Emissionsspektrum einer Quecksilberdampf Lampe. Rot eingezeichnet sind die Erwartungswerte der 435,84 nm-Linie in 1. und 2. Ordnung.

## Vergleich mit einem kommerziellen Übersichtsspektrometer

Bisher wurden zur Fehlerbetrachtung einzelne bekannte Spektrallinien herangezogen und mit den entsprechenden Literaturwerten verglichen. Um einen Überblick über die Genauigkeit eines über den gesamten sichtbaren Spektralbereich verteilten Spektrums zu erhalten, wird im Folgenden das Spektrum einer weißen Kompaktleuchtstofflampe mit der Aufnahme eines kommerziellen Übersichtsspektrometers der Firma *Plasus* verglichen. Das kommerzielle Übersichtsspektrometer besitzt einen Eintrittsspalt der Breite  $25\ \mu\text{m}$ , ein Beugungsgitter mit einer Gitterkonstanten von  $0,3\ \mu\text{m}$  und eine Halbwertsbreite von  $1,2\text{--}1,5\ \text{nm}$ .

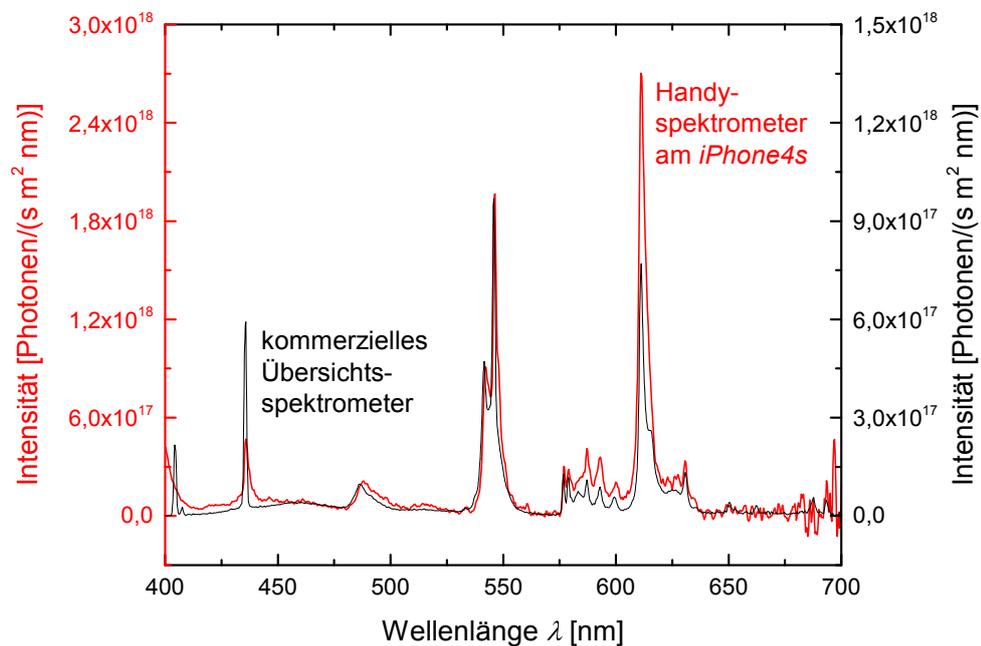
In Abbildung 4.10 ist das Emissionsspektrum der weißen Kompaktleuchtstofflampe dargestellt. Im Rahmen der Messgenauigkeit von  $\pm 2\ \text{nm}$  stimmt das Emissionsspektrum des Handyspektrometers bezüglich der Wellenlänge gut mit dem des kommerziellen Übersichtsspektrometers überein.

Das Emissionsspektrum der weißen Kompaktleuchtstofflampe enthält zwei Hg-Linien ( $435,84\ \text{nm}$  und  $546,07\ \text{nm}$ ), bei den restlichen Spektrallinien handelt es sich um Leuchtstoffe.



**Abbildung 4.10:** Emissionsspektrum einer weißen Kompaktleuchtstofflampe: Vergleich zwischen Handyspektrometer und kommerziellem Übersichtsspektrometer.

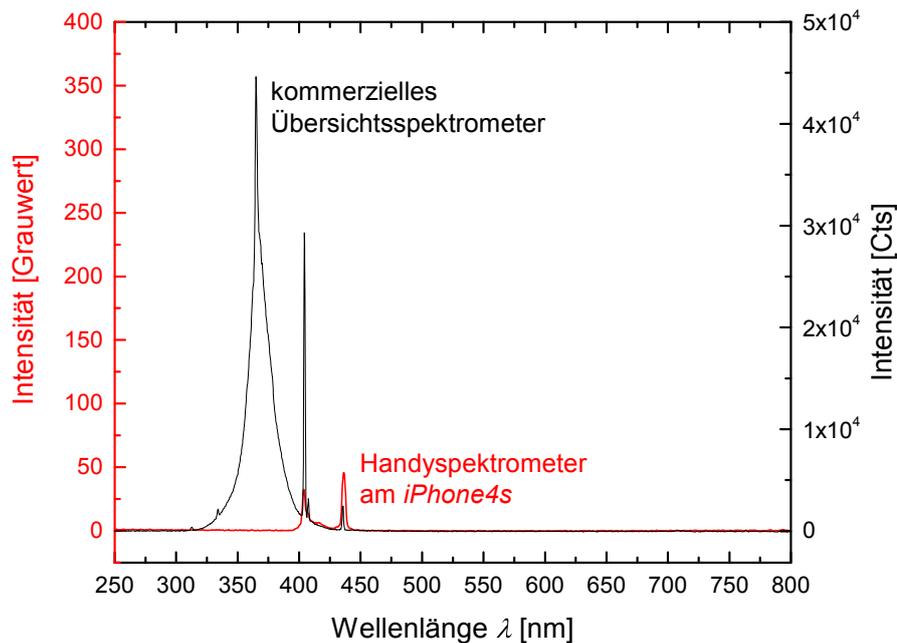
Um auch eine Aussage über die Messgenauigkeit des Handyspektrometers bzgl. der Intensität treffen zu können, wird das Spektrum der weißen Kompaktleuchtstofflampe anhand der Ulbrichtkugel kalibriert und mit dem kalibrierten Spektrum des kommerziellen Übersichtsspektrometers verglichen. Die kalibrierten Spektren sind in Abbildung 4.11 dargestellt. Die Intensität ist beim Spektrum des Handyspektrometers im blauen Spektralbereich kleiner und im roten Spektralbereich größer als die beim Spektrum des kommerziellen Übersichtsspektrometers, die Größenordnungen stimmen jedoch überein. Die Unterschiede bzgl. der exakten absoluten Emission lassen sich v.a. auf die Homogenität des Leuchtstoffs zurückführen: Kompaktleuchtstofflampen weisen nicht überall die gleiche spektrale Verteilung auf, weshalb es zu Intensitätsunterschieden kommt, wenn beide Spektrometer nicht auf die gleiche Stelle der Lampe ausgerichtet wurden. Desweiteren wird das aufgenommene Emissionsspektrum des Handyspektrometers vom Abstand und Winkel zur Lichtquelle beeinflusst, wohingegen das kommerzielle Übersichtsspektrometer mit einer Optik betrieben wird, welche diesen Einfluss nicht zeigt.



**Abbildung 4.11:** Intensitätskalibrierung: Vergleich des mit einem Handyspektrometer aufgenommenen Emissionsspektrums einer weißen Kompaktleuchtstofflampe mit dem eines kommerziellen Übersichtsspektrometers.

Desweiteren wird das Emissionsspektrum einer UV-Lampe mit der Aufnahme des kommerziellen Übersichtsspektrometers verglichen, um die Sensitivität der beiden Spektrometer im ultravioletten Bereich gegenüber zu stellen. Die Emis-

onsspektren sind in Abbildung 4.12 dargestellt. Die intensive Spektralbande der UV-Lampe bei ca. 364,8 nm wird vom kommerziellen Übersichtsspektrometer noch erfasst, vom Handyspektrometer jedoch nicht mehr. Die Optik des kommerziellen Übersichtsspektrometers besteht aus Quarz, welches bis ca. 170 nm durchlässig ist [21]. Das Objektiv der Handykamera hingegen besteht aus Glas, welches im UV-Bereich undurchlässig ist.



**Abbildung 4.12:** Emissionsspektrum einer UV-Lampe: Vergleich zwischen Handyspektrometer und kommerziellem Übersichtsspektrometer.

## Vergleich verschiedener Eintrittsspaltbreiten

Für ein Handyspektrometer mit einem Eintrittsspalt der Breite 0,10 mm erhält man für die  $\alpha$ - und die  $\beta$ -Linie von Deuterium Halbwertsbreiten von 1,9 nm ( $\alpha$ -Linie) und 1,5 nm ( $\beta$ -Linie). Erwartungsgemäß sind die Halbwertsbreiten kleiner als bei einer Eintrittsspaltbreite von 0,20 mm, jedoch nicht um den Faktor 2, da sich das Apparateprofil aus der Rechteckverteilung des Eintrittsspalts und der Fraunhofer-Beugung am Gitter zusammensetzt (siehe Kapitel 2.1).

Je kleiner die Spaltbreite, desto höher ist das Auflösungsvermögen des Spektrometers, aber desto geringer ist die Beugungsintensität. Im Vergleich zum Spektrum mit dem größeren Eintrittsspalt beträgt beim 0,10 mm-Spalt die Intensität der  $\alpha$ -Linie nur noch ca. ein Drittel und die Intensität der  $\beta$ -Linie nur noch ca. zwei Fünftel.

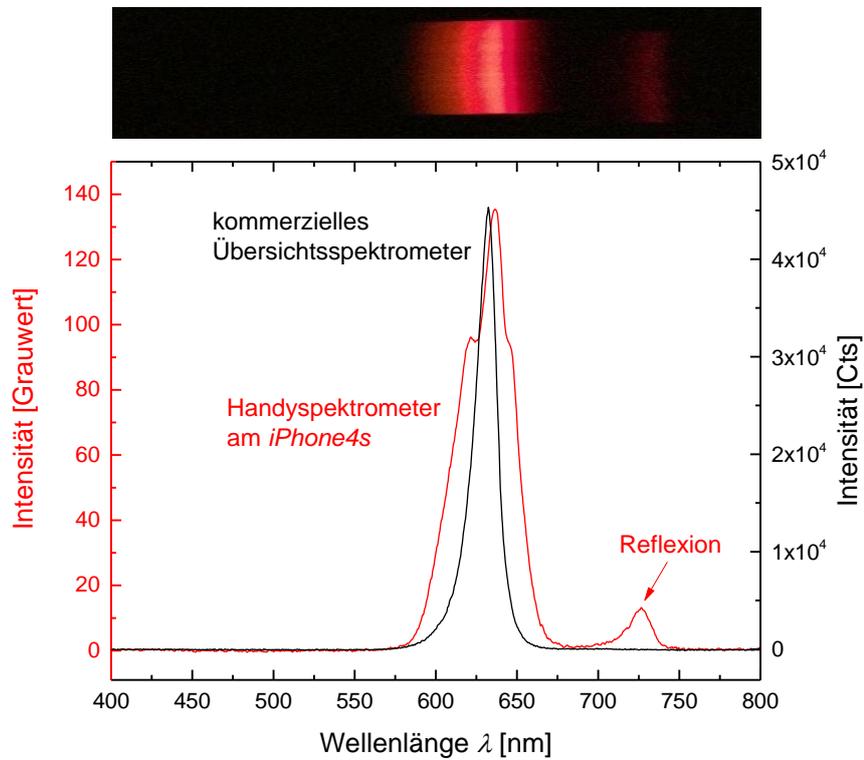
## Reflexionen

In manchen Beugungsbildern treten zusätzliche Linien auf, welche nicht aus der Emissionscharakteristik der Lichtquelle resultieren. Eine mögliche Ursache hierfür könnten Reflexionen an der Gehäuseinnenseite des Handyspektrometers sein, da für das Gehäuse kein schwarzer, sondern ein dunkelblauer Fotokarton verwendet wird.

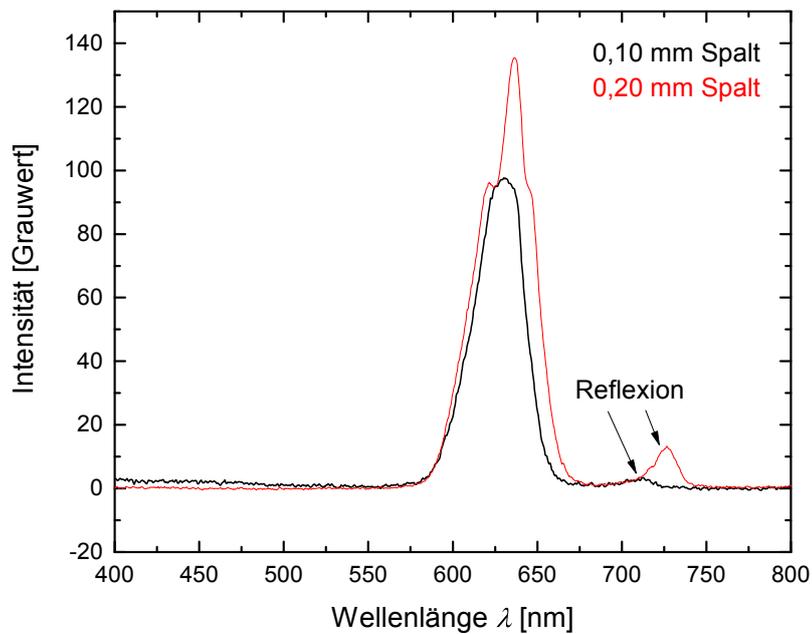
In Abbildung 4.13 ist das Beugungsbild einer roten LED, welches mit einem Handyspektrometer mit einer Eintrittsspaltbreite von 0,20 mm aufgenommen wurde, und das dazugehörige Emissionsspektrum dargestellt. Zusätzlich ist die Aufnahme eines kommerziellen Übersichtsspektrometers der Firma *Plasus* abgebildet. Das Spektrum des Handyspektrometers weist bei ca. 726 nm einen kleinen Peak auf, welcher im Emissionsspektrum des kommerziellen Übersichtsspektrometers nicht auftritt. Der Peak resultiert somit nicht aus der Emissionscharakteristik der roten LED. Es handelt sich um eine Reflexion. Bereits im Beugungsbild lässt sich feststellen, ob es sich bei einer Spektrallinie bzw. -bande um eine Reflexion handelt: Spektralbanden, welche durch Reflexionen an der Gehäuseinnenseite entstehen, sind gegenüber den tatsächlichen Spektralbanden nach unten bzw. nach oben verschoben und weisen zudem eine geringere Intensität als diese auf. Dies lässt sich auch im Beugungsbild der roten LED beobachten. Die auftretenden Reflexionen verursachen außerdem eine Verbreiterung der Spektralbanden.

Um zu untersuchen, inwiefern die Reflexionen von der Eintrittsspaltbreite abhängen, wird das Emissionsspektrum der roten LED (0,20 mm-Eintrittsspalt) mit der Aufnahme eines Handyspektrometers mit einer Eintrittsspaltbreite von 0,10 mm verglichen. Die Spektren sind in Abbildung 4.14 dargestellt und weisen bei ca. 712 nm (0,10 mm-Spalt) bzw. 726 nm (0,20 mm-Spalt) einen kleinen Peak auf. Bei der kleineren Spaltbreite wird die Reflexion nur noch schwach registriert. Desweiteren ist die Halbwertsbreite der Spektralbande geringer als bei der größeren Eintrittsspaltbreite.

Die Reflexionen beeinflussen die Emissionsspektren, jedoch aufgrund ihrer geringen Intensität meist nur geringfügig. Mit kleineren Spaltbreiten können die Reflexionen zudem weiter reduziert werden.



**Abbildung 4.13:** Ausschnitt aus dem Beugungsbild und dazugehöriges Emissionsspektrum einer roten LED, aufgenommen mit einem Handyspektrometer (rot). Zusätzlich ist das Emissionsspektrum eines kommerziellen Übersichtsspektrometers dargestellt.



**Abbildung 4.14:** Emissionsspektren einer roten LED: Vergleich zwischen der Aufnahme eines Handyspektrometers mit einer Eintrittsspaltbreite von 0,10 mm und der Aufnahme eines Handyspektrometers mit einer Eintrittsspaltbreite von 0,20 mm.

## 5 Unterrichtseinsatz

Die Materialkosten für Beugungsgitter und Fotokarton betragen pro Bausatz ungefähr 40 Cent. Aufgrund des kostengünstigen Materialeinsatzes ist das Handyspektrometer somit sowohl für Lehrer als auch für Schüler zum Selbstbau geeignet.

Bereits in der 9. Klasse am Gymnasium kann das Handyspektrometer im Physikunterricht eingesetzt werden. In dieser Jahrgangsstufe beschäftigen sich die Jugendlichen im Themenbereich „Atome“ mit den diskreten Energieniveaus der Atome und dem Emissions- und Absorptionsverhalten verschiedener Stoffe (Einordnung im Lehrplan: Ph 9.2 [22]). Dabei sollen die Schülerinnen und Schüler einen Einblick in die technischen und medizinischen Anwendungen der optischen Spektroskopie bekommen. Mithilfe des Handyspektrometers können die Jugendlichen dabei selbständig Emissionsspektren verschiedener Lichtquellen aufnehmen und qualitativ auswerten.

In der 10. Klasse beschäftigen sich die Schülerinnen und Schüler zum ersten Mal mit dem Wellen- und Teilchencharakter von Licht (Ph 10.3 [22]). Dabei wird qualitativ auf Interferenz und Beugung eingegangen. In dieser Jahrgangsstufe kann das Handyspektrometer im Unterricht eingesetzt werden, um Interferenz und Beugung zu veranschaulichen und gleichzeitig eine wichtige technische Anwendung aufzuzeigen.

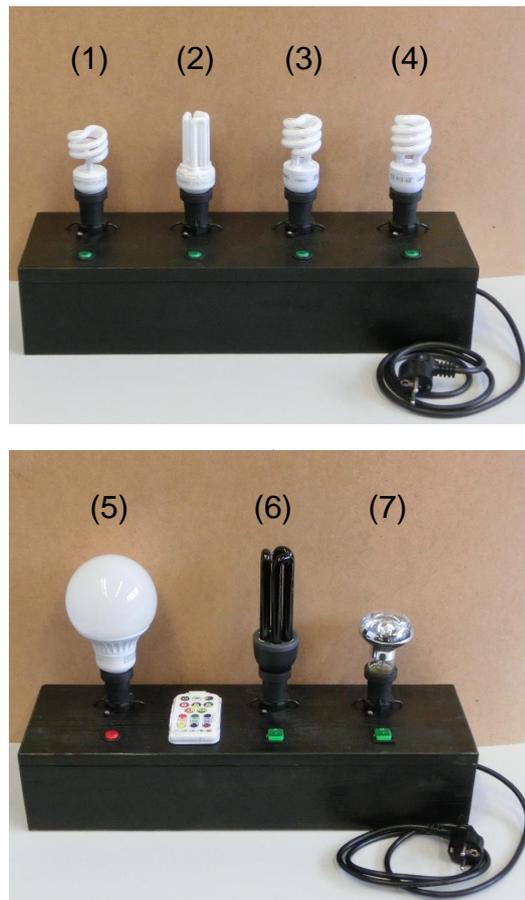
Am besten eignet sich der Einsatz des Handyspektrometers in der 12. Klasse zum Themenbereich „Ein Atommodell der Quantenphysik“ (Ph 12.2 [22]). Die Jugendlichen lernen in dieser Jahrgangsstufe u.a. die Beschreibung des Elektrons im eindimensionalen Potentialtopf, das quantenphysikalische Modell des Wasserstoffatoms, sowie Mehrelektronensysteme und experimentelle Befunde und Anwendungen zum quantenphysikalischen Atommodell kennen. Im Lehrplan ist zum Abschluss dieses Themenabschnittes ein Beispiel einer wissenschaftlichen und technischen Anwendung vorgesehen. Hierfür kann das Handyspektrometer herangezogen werden, um den Jugendlichen einen Einblick in die Emissionsspektroskopie zu vermitteln. Die Jugendlichen sind in dieser Jahrgangsstufe nicht nur

in der Lage, die Funktionsweise von Spektrometern und verschiedenen Lichtquellen zu verstehen, sondern können Emissionsspektren auch quantitativ auswerten. Bei der Auswertung der selbst aufgenommenen Spektren lernen die Jugendlichen darüber hinaus, wie Grauwertprofile und Emissionsspektren am Computer grafisch erstellt und ausgewertet werden. Dabei werden nicht nur ihre physikalischen und mathematischen Kenntnisse vertieft, sondern auch ihr Wissen im Umgang mit Grafik- und Kalkulationsprogrammen erweitert. Desweiteren erhalten sie einen Einblick in wissenschaftliches Arbeiten.

Für den Einsatz des Handyspektrometers im Physikunterricht oder zur Vorführung des Handyspektrometers im Rahmen eines Schulprojekts bietet es sich an, einen Lampensatz mit den wichtigsten Lichtquellen des Alltags zusammenzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde solch ein Lampensatz für eine Lehrerfortbildung am *Max-Planck-Institut für Plasmaphysik* in Garching zusammengestellt. Dazu wurden zwei schwarz lackierte Holzkästen angefertigt, an denen E27-Lampenfassungen mit den folgenden Lampen angebracht sind:

- Eine weiße, blaue, grüne und rote Kompaktleuchtstofflampe,
- eine UV-Lampe,
- eine Halogenlampe und
- eine LED-Farbwechsellampe.

Fotos der Lampenkästen mit Kennzeichnung der Lampenarten sind in Abbildung 5.1 dargestellt.



**Abbildung 5.1:** Lampenkästen mit den folgenden Lampen: (1) weiße Kompaktleuchtstofflampe, (2) blaue Kompaktleuchtstofflampe, (3) grüne Kompaktleuchtstofflampe, (4) rote Kompaktleuchtstofflampe, (5) LED-Farbwechsellampe, (6) UV-Lampe, (7) Halogenlampe.



## 6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, ein Handyspektrometer für den Unterrichtseinsatz zu entwickeln. Dabei handelt es sich um ein Selbstbauspektrometer, bei dem eine Handykamera als Detektor verwendet wird. Mithilfe eines solchen Handyspektrometers soll das Emissionsverhalten verschiedener Lichtquellen des Alltags qualitativ und quantitativ untersucht werden können. Das Handyspektrometer soll aus einfachen Mitteln und mit wenig Aufwand zusammengebaut werden können, den gesamten sichtbaren Spektralbereich (ca. 400 nm bis 750 nm) erfassen und ein Apparateprofil mit einer Halbwertsbreite von ca. 2 nm besitzen.

Aus diesen Gründen wird das Spektrometer in Form eines Polychromators aufgebaut, d.h. mit einem feststehenden dispersiven Element. Um das Gewicht des Spektrometers gering zu halten und die Befestigung am Smartphone zu erleichtern, wird als Material für das Gehäuse ein Fotokarton mit  $300 \text{ g/m}^2$  gewählt, welcher zudem die gewünschte Stabilität liefert. Aus dem Fotokarton wird ein quaderförmiges Gehäuse gefaltet, welches eine Größe von  $30 \times 30 \times 120 \text{ mm}^3$  besitzt.

Als Kompromiss zwischen großer Dispersion bzw. hohem spektralen Auflösungsvermögen und von der Handykamera erfassbarem Spektralbereich, wird eine Beugungsfolie mit einer Gitterkonstanten von  $1 \mu\text{m}$  als dispersives Element verwendet. Diese wird auf die Innenseite einer Aussparung am Gehäuse geklebt und dabei so ausgerichtet, dass die Gitterlinien senkrecht zu den Sensorzeilen verlaufen. Die Gehäusesseite, an der das Gitter befestigt ist, wird direkt vor die Handykamera positioniert, sodass das Gitter parallel zum Objektiv ausgerichtet ist. Um möglichst große Beugungsintensitäten und einen möglichst großen nutzbaren Spektralbereich zu erhalten, wird zur Beobachtung das Spektrum 1. Ordnung herangezogen. Damit die 1. Ordnung des sichtbaren Bereichs mittig auf den Sensor trifft, wird das Gehäuse um  $33^\circ$  gegenüber dem Gitter geneigt.

Auf eine Kollimator-Linse, welche dafür sorgt, dass auf das Gitter paralleles Licht trifft, wird aufgrund des gewünschten einfachen Aufbaus des Spektrometers verzichtet. Stattdessen wird der Eintrittsspalt in einem genügend großen Abstand zum Gitter angebracht. Der Abstand wird auf 110 mm festgelegt, sodass einerseits

die Parallelität und andererseits ein geringes Gewicht, eine einfache Justierung sowie eine hohe Intensität gewährleistet wird.

Der Eintrittsspalt sollte selbständig ausgewählt werden können, um mehr Flexibilität zu ermöglichen, und einfach zu konstruieren sowie anzubringen sein. Deshalb wird der Eintrittsspalt aus zwei Rechtecken gebaut, welche auf eine Aussparung auf der gegenüberliegenden Seite zum Gitter angebracht werden. Der Spalt wird parallel zu den Gitterlinien ausgerichtet. Um einen möglichst parallelen Spalt mit einer gewissen Breite zu erhalten, wird beim Anbringen zwischen den beiden Rechtecken ein ebenes Material mit der gewünschten Dicke gespannt (z.B. ein Stück Papier). Als Kompromiss zwischen hoher Auflösung und hoher Signalstärke sollten die Spaltbreiten im Bereich von 0,10 mm bis 0,30 mm liegen.

Um das Spektrometer am Smartphone zu befestigen und Streulicht zu vermeiden, wurden drei verschiedenen Aufsetzeinheiten konstruiert: Eine passgenaue Aufsetzeinheit für das Versuchshandy *iPhone4s* von *Apple*, eine anpassbare Aufsetzeinheit für Smartphones mit einer Dicke zwischen 9 und 11 mm und eine universelle Aufsetzeinheit.

Die Wellenlängenkalibrierung des Systems kann anhand der Quecksilberlinien im Spektrum einer weißen Kompaktleuchtstofflampe erfolgen. Hierfür wird die Dispersion über den sichtbaren Wellenlängenbereich als konstant angenommen, wodurch allerdings v.a. bei höheren Wellenlängen Abweichungen zwischen der tatsächlichen und der gemessenen Wellenlänge auftreten. Zur Bestimmung des Kalibrierfehlers wird das Handyspektrometer zusätzlich an einer Quecksilberdampfampe kalibriert. Aus dem Vergleich der beiden Kalibrierungen ergibt sich für die Kalibrierung anhand der weißen Kompaktleuchtstofflampe ein Gesamtfehler von  $\pm 2$  nm. Für höhere Wellenlängen ergeben sich allerdings größere Abweichung von bis zu 3 nm. Für den vorgesehenen Einsatz des Handyspektrometers im Physikunterricht wird diese Messgenauigkeit als ausreichend betrachtet.

Beim Abnehmen und wieder Anbringen des Handyspektrometers am Smartphone ergeben sich Wellenlängenverschiebungen, die im Rahmen der Messgenauigkeit jedoch vernachlässigt werden können und somit keine erneute Kalibrierung erfordern.

Zur Bestimmung der Sensitivität der Handykamera wird eine Intensitätskalibrierung anhand einer Ulbrichtkugel durchgeführt und daraus der Kalibrierfaktor berechnet. Aus dem Vergleich des Kalibrierfaktors mit dem eines kommerziellen Übersichtsspektrometers der Firma *Plasus* (Halbwertsbreiten von 1,2–1,5 nm) er-

gibt sich für das Handyspektrometer eine um den Faktor  $10^3$  geringere Sensitivität. Für spektroskopische Untersuchungen im Physikunterricht ist diese Sensitivität jedoch ausreichend: Die im Rahmen dieser Arbeit aufgenommenen Spektren weisen ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis auf und werden auch bei einer Eintrittsspaltbreite des Handyspektrometers von nur 0,10 mm noch gut vom Sensor detektiert.

Die mit dem Handyspektrometer aufgenommenen Beugungsbilder werden mittels Grauwertprofilanalyse mithilfe des Grafikprogramms *ImageJ* [1] ausgewertet. Aufgrund der Art und Weise, wie die Grauwerte innerhalb des Programms berechnet werden, weisen kontinuierliche Emissionsspektren Intensitätsschwankungen auf, welche weder mit der Emissionscharakteristik der Lichtquelle noch mit der Sensitivität des Systems verknüpft sind. Im Kalibrierfaktor sind diese Intensitätsschwankungen allerdings beinhaltet. An Schulen ist jedoch eine Intensitätskalibrierung nicht ohne Weiteres durchführbar, weshalb im Unterricht auf die Ursache der Intensitätsschwankungen bei kontinuierlichen Spektren hingewiesen werden muss.

Zur Untersuchung des Apparateprofils wird das Emissionsspektrum einer Deuterium-Niederdrucklampe aufgenommen. Für das Handyspektrometer mit einer Eintrittsspaltbreite von 0,20 mm ergibt sich für die  $\alpha$ -Linie (656,1 nm) eine Halbwertsbreite von 2,4 nm und für die  $\beta$ -Linie (486,0 nm) eine Halbwertsbreite von 1,6 nm. Die Halbwertsbreiten liegen damit im Bereich von kommerziellen Übersichtsspektrometern und sind daher weit ausreichend.

In einzelnen Spektren kann neben der 1. Beugungsordnung auch die 2. Ordnung beobachtet werden. Aufgrund der verwendeten Näherung bei der Wellenlängenkalibrierung ergeben sich für die Peakpositionen allerdings große Abweichungen bis zu 18 nm, sodass zusammen mit der geringeren Intensität die 2. Ordnung beim Handyspektrometer nicht für spektrale Untersuchungen herangezogen werden sollte.

Um einen Überblick über die Genauigkeit eines über den gesamten sichtbaren Bereich verteilten Emissionsspektrums zu erhalten, wird das Spektrum einer weißen Kompaktleuchtstofflampe mit der Aufnahme eines kommerziellen Übersichtsspektrometers der Firma *Plasus* verglichen. Bezüglich der Wellenlänge stimmen die Emissionsspektren im Rahmen der Messgenauigkeit des Handyspektrometers von  $\pm 2$  nm gut überein. Zusätzlich wird bei beiden Spektren eine Intensitätskalibrierung durchgeführt, um die Spektren auch bzgl. der Intensität miteinander vergleichen zu können. Hinsichtlich der Größenordnung der Intensitäten stimmen

die Spektren überein. Es ergeben sich jedoch Unterschiede in den Spektren bzgl. der exakten absoluten Emission, die sich hauptsächlich darauf zurückführen lassen, dass beide Spektrometer nicht auf dieselbe Stelle der Lichtquelle gerichtet waren. Desweiteren wird das Spektrum des Handyspektrometers vom Abstand und Winkel zur Lichtquelle beeinflusst, wohingegen das kommerzielle Übersichtsspektrometer mit einer Optik betrieben wird, welche diesen Einfluss nicht zeigt. Im Rahmen der Wellenlängengenauigkeit und der Größenordnung der Intensitäten stimmen die Spektren somit gut überein.

Desweiteren wird das Emissionsspektrum einer UV-Lampe mit der Aufnahme eines kommerziellen Übersichtsspektrometers verglichen, um daraus Informationen über die Sensitivität der Handykamera im ultravioletten Bereich zu erhalten. Die intensive Spektralbande der UV-Lampe bei 364,8 nm wird im Gegensatz zum Übersichtsspektrometer von der Handykamera nicht mehr erfasst: Das Objektiv der Handykamera besteht aus Glas, welches im UV-Bereich nicht mehr durchlässig ist. Die Optik des kommerziellen Übersichtsspektrometers besteht hingegen aus Quarz, welches bis ca. 170 nm durchlässig ist.

Um zu überprüfen, inwiefern die Eintrittsspaltbreite die Emissionsspektren beeinflusst, werden die Aufnahmen eines Handyspektrometers mit einer Eintrittsspaltbreite von 0,10 mm mit denen eines Handyspektrometers mit einer Eintrittsspaltbreite von 0,20 mm verglichen. Beim Emissionsspektrum einer Deuterium-Niederdrucklampe ergeben sich für die kleinere Spaltbreite erwartungsgemäß geringere Intensitäten und Halbwertsbreiten. Das Auflösungsvermögen kann hierdurch auf eine Halbwertsbreite von 1,9 nm ( $\alpha$ -Linie) bzw. 1,5 nm ( $\beta$ -Linie) verbessert werden.

In manchen Beugungsbildern treten zudem zusätzliche Linien auf, die nicht aus der Emissionscharakteristik der Lichtquelle resultieren. Eine mögliche Ursache hierfür könnten Reflexionen an der Gehäuseinnenseite sein, da für das Gehäuse kein schwarzer, sondern ein dunkelblauer Fotokarton verwendet wird. Die Reflexionen führen außerdem zu einer Verbreiterung der Spektrallinien bzw. -banden. Aufgrund der geringen Intensität beeinflussen die Reflexionen die Qualität des Spektrums jedoch meist nur geringfügig und können zudem mit geringeren Spaltbreiten weiter reduziert werden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass sich aus einfachen Mitteln und mit wenig Aufwand ein Handyspektrometer bauen lässt, mit dem Emissionsspektren über den

gesamten sichtbaren Spektralbereich mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 2$  nm und einem Apparateprofil mit einer Halbwertsbreite von ca. 2 nm aufgenommen werden können. Desweiteren weisen die Spektren ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis auf.

Am Gymnasium kann das Handyspektrometer in der 9. und 10. Jahrgangsstufe im Physikunterricht eingesetzt werden, um Emissionsspektren verschiedener Lichtquellen qualitativ zu untersuchen. Am besten eignet sich der Einsatz des Handyspektrometers in der 12. Klasse: In dieser Jahrgangsstufe sind die Schülerinnen und Schüler in der Lage, die Emissionsspektren auch quantitativ mithilfe der Grafikprogramme *ImageJ* [1] und *Microsoft Excel* [17] auszuwerten.

Aufgrund des kostengünstigen Materialeinsatzes von ca. 40 Cent pro Bausatz ist das Handyspektrometer sowohl für Lehrer als auch für Schüler zum Selbstbau geeignet.

Für den Einsatz des Handyspektrometers im Physikunterricht oder zur Vorführung im Rahmen eines Schulprojekts bietet es sich an, einen Lampensatz mit den wichtigsten Lichtquellen des Alltags zusammenzustellen.

Als Ausblick wäre es interessant, eine App für Smartphones zu programmieren, mithilfe derer aus den aufgenommenen Beugungsbildern bereits am Smartphone die Emissionsspektren mit wenig Aufwand erstellt, kalibriert und ausgewertet werden könnten.



# Anhang

## A Kartonbausatz und Bauanleitung

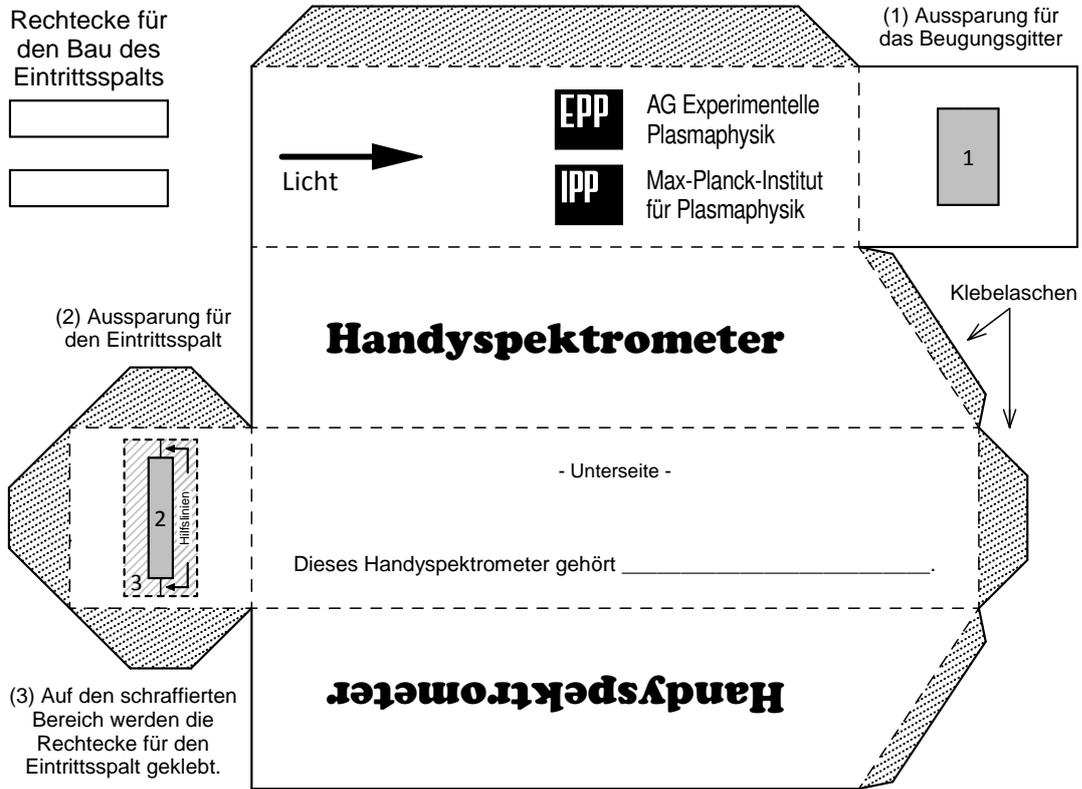
Der Kartonbausatz für das Handyspektrometer ist in Abbildung A.1 dargestellt (nicht maßstabsgetreu). Ein maßstabsgetreuer Kartonbausatz liegt am Ende der Arbeit bei.

### Benötigte Materialien

- Dunkler Fotokarton mit  $300 \text{ g/m}^2$ , DIN A4
- Beugungsfolie mit  $1000 \text{ Linien/mm}$ , Größe ca.  $20 \times 25 \text{ mm}^2$   
(HINWEIS: Solch eine Beugungsfolie kann beispielsweise beim Versandhandel *AstroMedia* erworben werden [15].)
- Schere
- Cutter-Messer
- Stumpfes Messer zum Nuten
- Stahllineal
- Holzbrett als Unterlage
- Alleskleber
- Leicht ablösbares schwarzes Isolierband

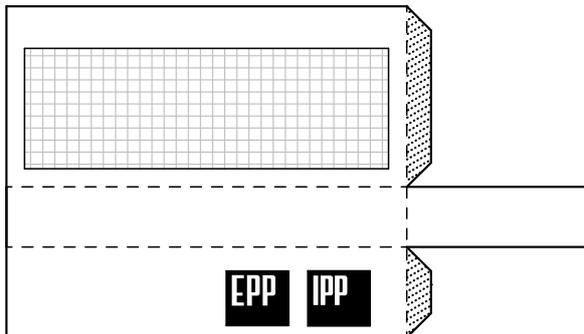
### Bau des Handyspektrometers

1. Das Gehäuse mithilfe einer Schere und die Aussparungen 1 und 2 mithilfe eines Cutter-Messers ausschneiden.  
(TIPP: Zur Führung des Cutter-Messers ein Stahllineal verwenden.)
2. Die gestrichelten Linien mit einem stumpfen Messer nuten und nach hinten falzen.



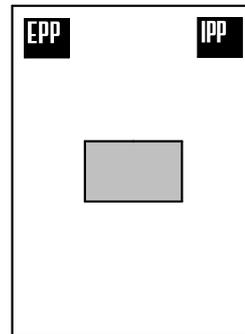
**Aufsetzeinheit 1:**

Für Smartphones mit einer Dicke zwischen 9 und 11 mm, deren Handykamera sich auf der oberen Hälfte der Rückseite befindet.



**Aufsetzeinheit 2:**

Für Smartphones, die nicht über die geeignete Dicke für die Aufsetzeinheit 1 verfügen.



**Abbildung A.1:** Kartonbausatz für das Handyspektrometer (nicht maßstabsgetreu).

## 3. Bau des Eintrittsspalts:

- Rechtecke ausschneiden. Darauf achten, dass die Längsseiten eine möglichst **gerade und saubere Schnittkante** besitzen.

(TIPP: Cutter-Messer und Stahllineal verwenden.)

- Die Rechtecke werden auf den schraffierten Bereich 3 geklebt (siehe Abbildung A.1): Ein Rechteck wird dabei so angebracht, dass eine Längsseite an den Hilfslinien anliegt. Das zweite Rechteck wird daneben auf die andere Seite des schraffierten Bereichs geklebt, sodass zwischen beiden Rechtecken ein schmaler **paralleler** Spalt entsteht. Dazu wird ein ebenes Material mit bekannter Dicke zwischen beide Rechtecke gespannt: Ein Blatt Papier mit  $80 \text{ g/m}^2$  besitzt z.B. eine Dicke von ca.  $0,10 \text{ mm}$  und ein Blatt Papier mit  $180 \text{ g/m}^2$  eine Dicke von ca.  $0,20 \text{ mm}$ .

Die **Spaltbreite** sollte im Bereich **von  $0,10 \text{ mm}$  bis  $0,30 \text{ mm}$**  liegen.

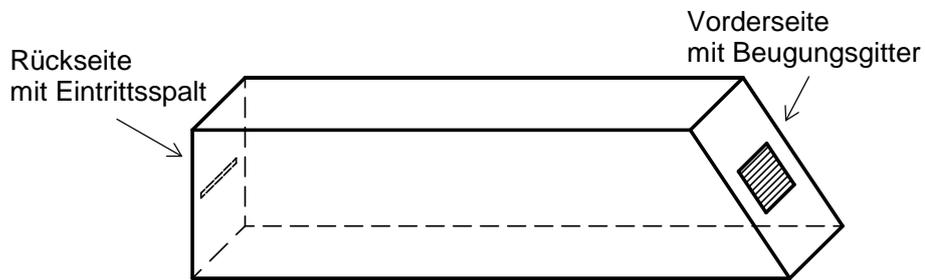
## 4. Das Gehäuse zusammenkleben, wobei es auf der Seite, an der das Gitter angebracht wird, noch offen gelassen wird. In Abbildung A.2 ist ein Schema des fertig zusammengebauten Handyspektrometers dargestellt. Prüfen, ob an den Ecken bzw. Kanten Licht eindringt und ggf. nachbessern oder mit einem schwarzen Isolierband abdunkeln.

## 5. Das Gitter auf die Innenseite der dafür vorgesehenen Aussparung 1 kleben.

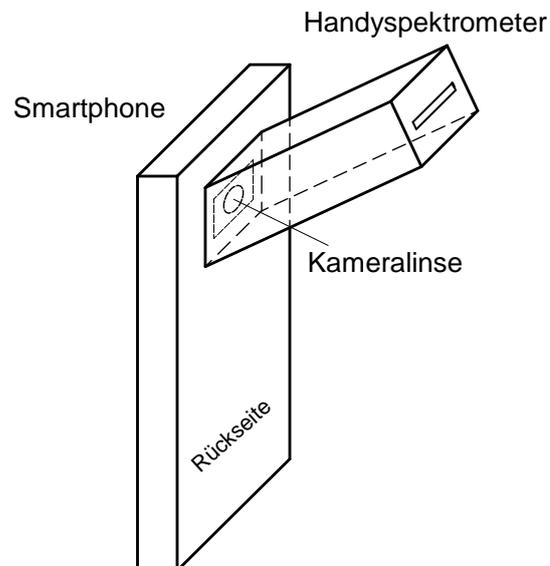
(VORSICHT: Gitter nur am Rand berühren und darauf achten, dass der Klebstoff das Gitter nicht verschmiert!)

Das Gitter so ausrichten, dass die Gitterlinien parallel zum Eintrittsspalt verlaufen. Zum Prüfen das Gehäuse provisorisch schließen, das Spektrometer vor die Handykamera positionieren und auf eine Lichtquelle richten. In Abbildung A.3 ist ein Schema zur Positionierung des Handyspektrometers am Smartphone dargestellt. Als Beugungsbild müssen einzelne verschieden farbige und zueinander parallele Linien entstehen, welche auf gleicher Höhe über den Sensor verlaufen. Andernfalls durch Drehen das Gitter nachjustieren. In Abbildung A.4 ist eine Skizze des Beugungsbildes mit richtiger Justierung des Gitters zum Eintrittsspalt und eine Skizze mit falscher Justierung dargestellt.

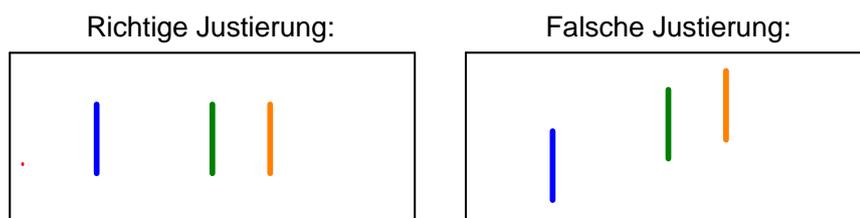
## 6. Das Gehäuse schließen.



**Abbildung A.2:** Schema des fertig zusammengebauten Handyspektrometers.



**Abbildung A.3:** Schema zur Positionierung des Handyspektrometers am Smartphone.



**Abbildung A.4:** Beugungsbilder mit richtiger bzw. falscher Justierung des Beugungsgitters zum Eintrittsspalt.

### **Bau der Aufsetzeinheit 1**

1. Aufsetzeinheit ausschneiden (siehe Abbildung A.1) und innerhalb des schraffierten Bereichs eine Aussparung für die Handykamera ausschneiden. Die Aussparung sollte mindestens eine Größe von  $10 \times 16 \text{ mm}^2$  haben.
2. Die gestrichelten Linien mithilfe eines stumpfen Messers nutzen, nach hinten falzen und die Aufsetzeinheit zusammenkleben.
3. Das Handyspektrometer an der Aufsetzeinheit befestigen. Dabei darauf achten, dass das Gitter frei liegt und direkt vor der Handykamera zu liegen kommt. Das Gitter sollte ungefähr mittig über der Kamera positioniert werden. Das Handyspektrometer muss so justiert werden, dass die Spektrallinien parallel zum Bildrand verlaufen.
4. Beim Aufnehmen der Emissionsspektren die Aufsetzeinheit zusätzlich mit einem Isolierband am Smartphone befestigen, damit die gesamte Einheit nicht verrutschen kann und kein Streulicht eindringt.

### **Bau der Aufsetzeinheit 2**

1. Aufsetzeinheit ausschneiden (siehe Abbildung A.1) sowie die grau hinterlegte Aussparung.
2. Aufsetzeinheit auf das Handyspektrometer kleben, sodass das Gitter freiliegt.
3. Mithilfe eines Isolierbands die gesamte Einheit am Smartphone befestigen. Das Gitter dabei so ausrichten, dass es ungefähr mittig und direkt vor der Handykamera liegt und die Spektrallinien parallel zum Bildrand verlaufen.

## B Weitere Emissionsspektren

Im Folgenden werde alle im Rahmen dieser Arbeit mit dem Handyspektrometer (Eintrittsspaltbreite 0,20 mm) untersuchten Lichtquellen aufgeführt. In den Abbildungen ist jeweils ein Foto der Lichtquelle, dessen Beugungsbild und das zugehörige Emissionsspektrum dargestellt.

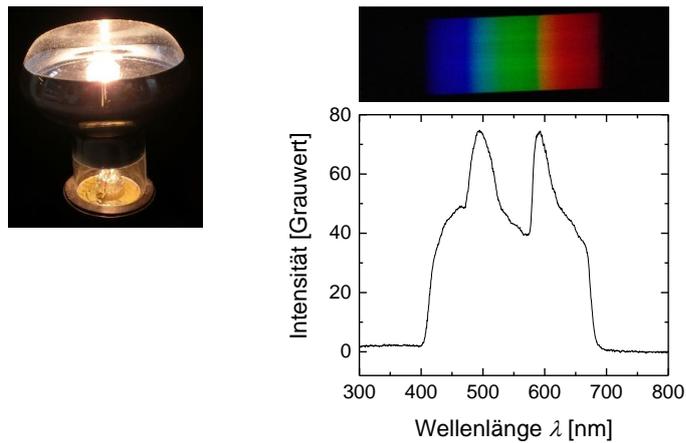


Abbildung B.1: *Halogenlampe.*

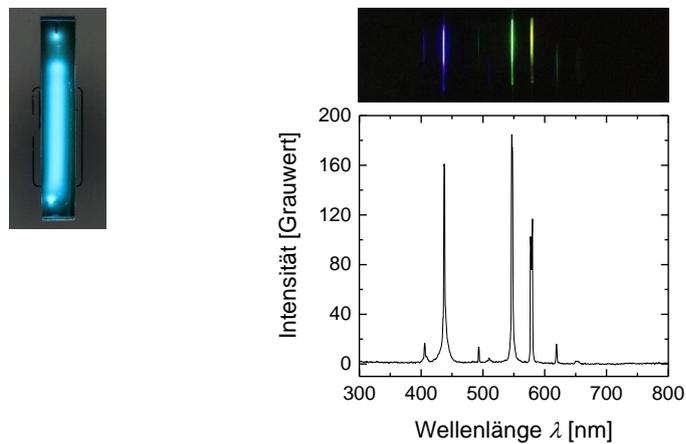


Abbildung B.2: *Quecksilberdampf Lampe.*

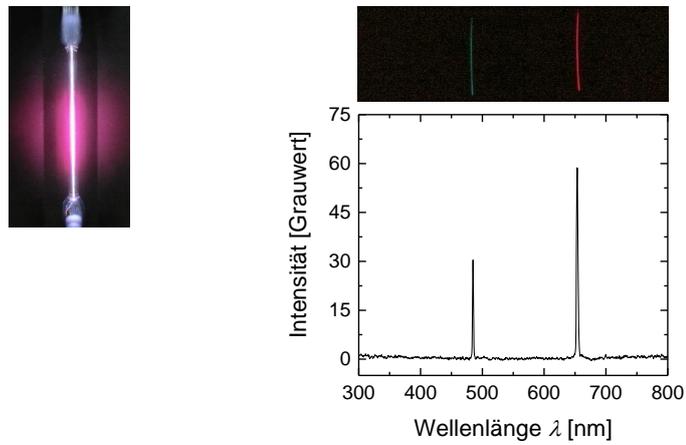


Abbildung B.3: Deuterium-Lampe.

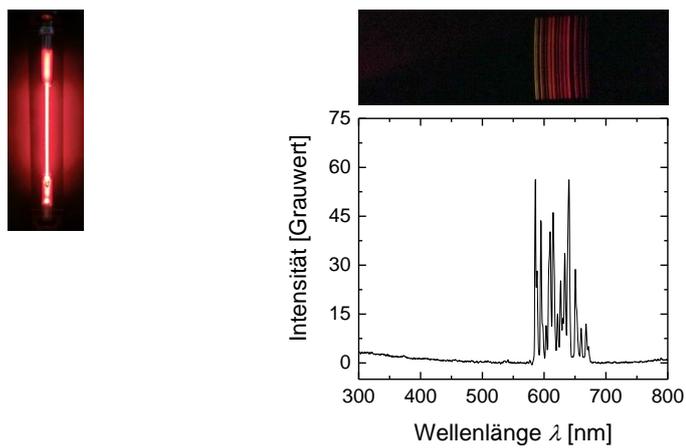


Abbildung B.4: Neon-Lampe.

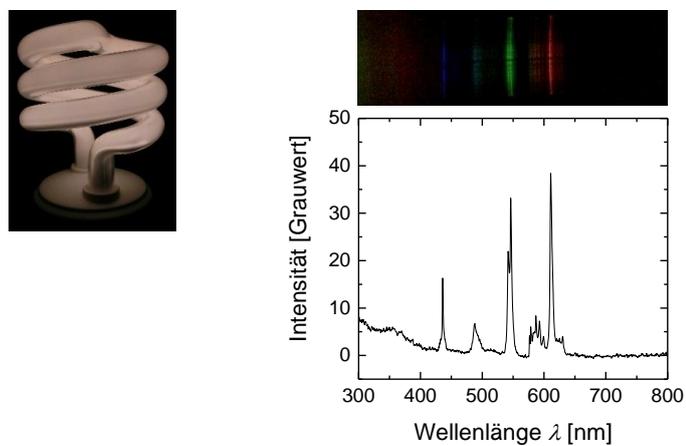
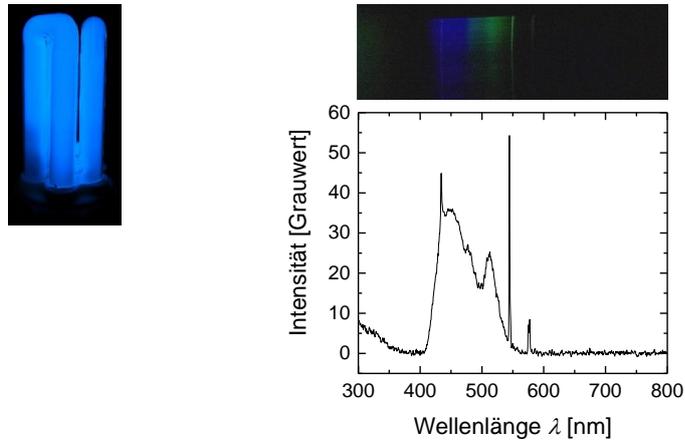
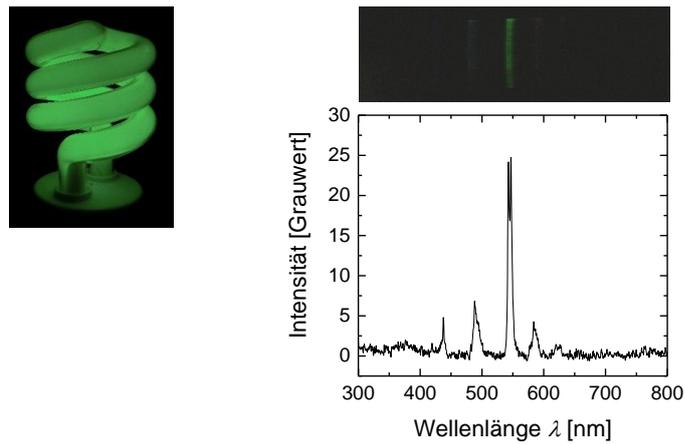


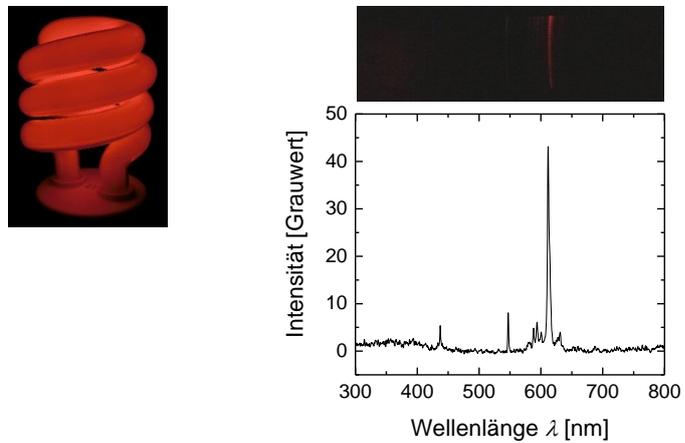
Abbildung B.5: Weiße Kompaktleuchtstofflampe. Die erhöhte Intensität im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 400 nm wird durch die 0. Ordnung verursacht.



**Abbildung B.6:** Blaue Kompaktleuchtstofflampe. Die erhöhte Intensität im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 400 nm wird durch die 0. Ordnung verursacht.



**Abbildung B.7:** Grüne Kompaktleuchtstofflampe.



**Abbildung B.8:** Rote Kompaktleuchtstofflampe.

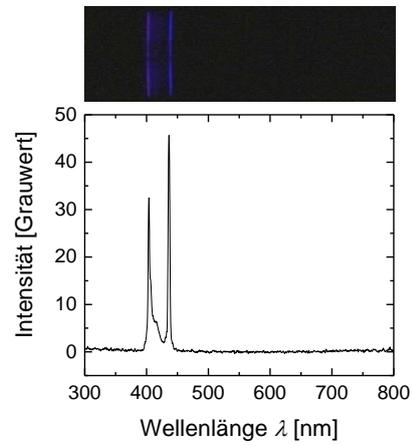


Abbildung B.9: UV-Lampe.

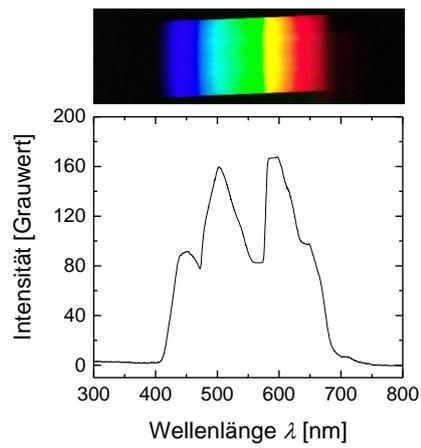


Abbildung B.10: Weiße LED.

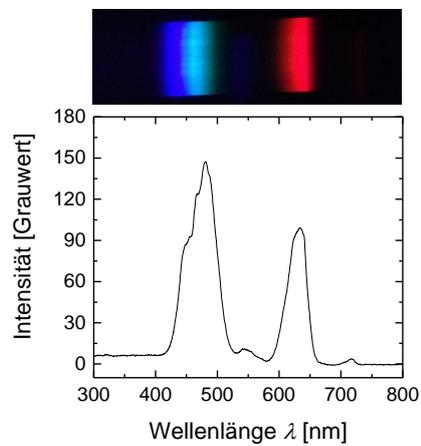


Abbildung B.11: Violette LED.

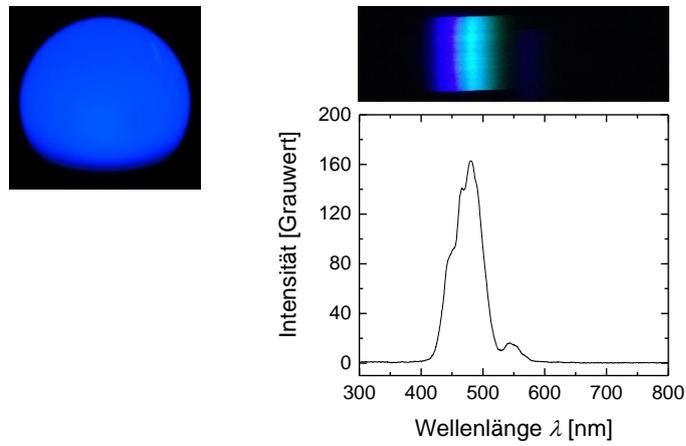


Abbildung B.12: *Blaue LED.*

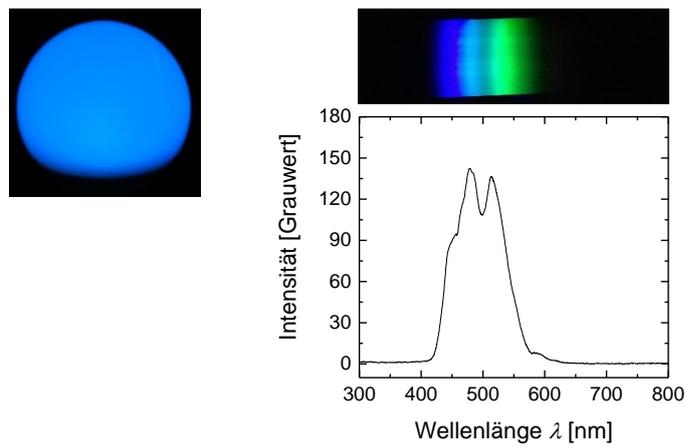


Abbildung B.13: *Blaugrüne LED.*

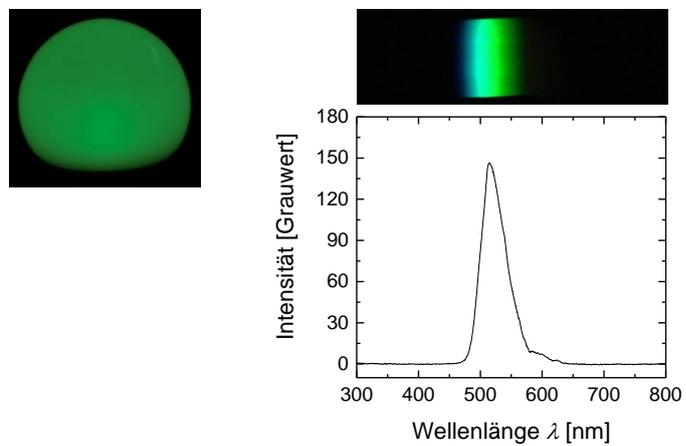


Abbildung B.14: *Grüne LED.*

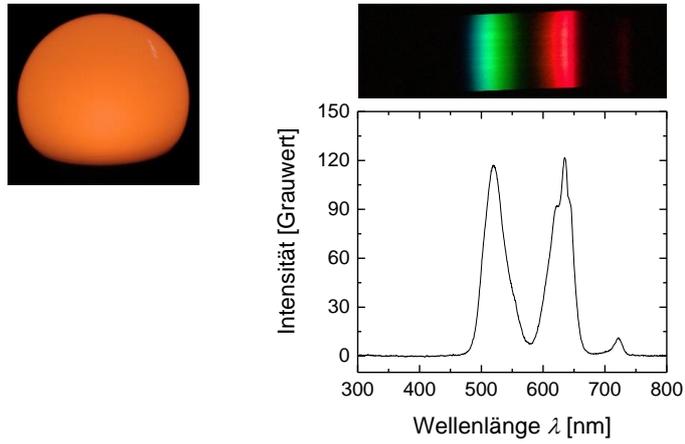


Abbildung B.15: Gelbe LED.

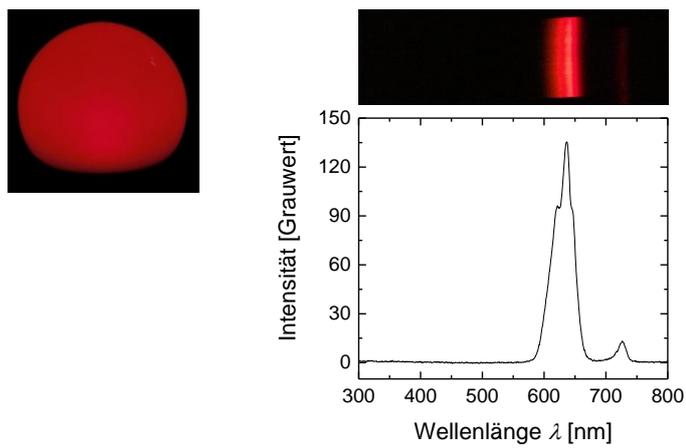


Abbildung B.16: Rote LED.



# Literaturverzeichnis

- [1] Wayne Rasband: *ImageJ 1.49j*. <http://imagej.nih.gov/ij/index.html>, November 2014.
- [2] Frank L. Pedrotti, Leno S. Pedrotti, Werner Bausch und Hartmut Schmidt: *Optik: Eine Einführung*. Prentice Hall Verlag GmbH, Haar bei München, 1. Auflage, 1996.
- [3] Albrecht Unsöld: *Physik der Sternatmosphären*. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1968.
- [4] Helmut Naumann, Gottfried Schröder und Martin Löffler-Mang: *Handbuch Bauelemente der Optik*. Carl Hanser Verlag, München Wien, 7. Auflage, 2014.
- [5] Ocean Optics Inc. [www.oceanoptics.com](http://www.oceanoptics.com).
- [6] Avantes Inc. [www.avantes.com](http://www.avantes.com).
- [7] AstroMedia: *Das Handspektroskop*. [www.astromedia.de/Bastelspass-der-Wissen-schaftt/Das-Handspektroskop::132.html](http://www.astromedia.de/Bastelspass-der-Wissen-schaftt/Das-Handspektroskop::132.html), Januar 2015.
- [8] Alan Schwabacher: *The Science of Stuff*. [www.uwm.edu/~awschwab/specweb.htm](http://www.uwm.edu/~awschwab/specweb.htm), Januar 2015.
- [9] Werner Schmidt: *Optische Spektroskopie - Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Techniker*. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1. Auflage, 1994.
- [10] Ekbert Hering, Rolf Martin und Martin Stoher: *Physik für Ingenieure*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 11. Auflage, 2012.
- [11] Kurt Behringer: *Einführung in die Plasmaspektroskopie*. Universität Augsburg, WS 2000/2001.

- 
- [12] Lew A. Artsimowitsch und Roald S. Sagdejew: *Plasmaphysik für Physiker*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1983.
- [13] Wolfgang Demtröder: *Experimentalphysik 3 - Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 4. Auflage, 2010.
- [14] Frank Thuselet: *Physik der Halbleiterbauelemente*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2011.
- [15] AstroMedia: *Das Durchlicht-Beugungsgitter*. [www.astromedia.eu/Material-fuer-Selbermacher/OPTI-Media-Filterfolien/Das-Durchlicht-Beugungsgitter::236.html](http://www.astromedia.eu/Material-fuer-Selbermacher/OPTI-Media-Filterfolien/Das-Durchlicht-Beugungsgitter::236.html), Januar 2015.
- [16] OriginLab Corporation: *OriginPro 2015G*. <http://www.originlab.de/>.
- [17] Microsoft Corporation: *Microsoft Office Excel*. [www.microsoft.com](http://www.microsoft.com).
- [18] Wilhelm Walcher: *Praktikum der Physik*. B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 9. Auflage, 2006.
- [19] Electro-Technic Products: *Model SP200V Spectrum Tube, Deuterium (SKU: 21702)*. [www.electrotechnicproducts.com](http://www.electrotechnicproducts.com).
- [20] NIST: *National Institute of Standards and Technology - Atomic Spectra Database Lines Data*. <http://physics.nist.gov/cgi-bin/ASD/lines1.pl>, Februar 2015.
- [21] Horst Scholze: *Glas - Natur, Struktur und Eigenschaften*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 3. Auflage, 1988.
- [22] ISB: *Staatsinsitut für Schulqualität und Bildungsforschung München - Lehrplan Gymnasium Physik*. <http://www.isb.bayern.de/gymnasium/lehrplan/gymnasium/fachprofil-ebene-2/physik/326/>, Januar 2015.

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben. Mein Dank gilt dabei insbesondere:

- **Frau apl. Prof. Dr.-Ing. Ursel Fantz** für die Aufnahme in der AG Experimentelle Plasmaphysik, das interessante Thema, die hervorragende Betreuung und Unterstützung während der gesamten Arbeit sowie für den wertvollen Einblick in die Arbeit am Lehrstuhl.
- **Herrn Dr. Roland Friedl** für die hervorragende Betreuung und Zusammenarbeit während der gesamten Arbeit, die Unterstützung und ständige Hilfsbereitschaft und besonders für das sorgfältige Korrekturlesen der Arbeit.
- Den **Herren Dipl.-Phys. Uwe Kurutz, Dr. Stefan Briefi, M.Sc. David Rauner, Daniel Schmid** und **Frau M.Sc. Sofia Cristofaro** für die gute Zusammenarbeit, das freundschaftliche Arbeitsklima, die Unterstützung und die Hilfsbereitschaft während der gesamten Arbeit.
- Der **feinmechanischen Werkstatt** und der **Elektronikwerkstatt** des Physik-Instituts für die Unterstützung bei der Anfertigung der Lampenkästen.
- **Meinem Vater** für die Unterstützung und die wertvollen Tipps bei der Anfertigung der Lampenkästen sowie für das Korrekturlesen der Arbeit.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden für ihr Verständnis und ihre Unterstützung während meines Studiums bedanken.



## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und alle wörtlich und sinngemäß übernommenen Textstellen als solche kenntlich gemacht habe. Dies gilt auch für die in der Arbeit enthaltenen Zeichnungen, Skizzen und graphischen Darstellungen.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift