

# P402 Quantelung von Energie

## P402.1 Versuchsziel

Durch Spektroskopie gelingt es, Informationen über den Atomaufbau zu erhalten. Es muss jedoch erklärt werden, weshalb Emissions- und Absorptionslinien auftreten. Diese Quantelung von Energie und der Zusammenhang zwischen Lichtfrequenz und Energie kann in einem fundamentalen Versuch – der Untersuchung des Photoeffektes – nachgewiesen werden.

Mit der Kenntnis dieses Zusammenhanges können die Spektralserien von Atomen durch diskrete Anregungsstufen der Atome erklärt werden. Beim Wasserstoffatom können die Energiestufen bei der Balmer-Serie beobachtet und ausgemessen werden.

Im Versuch wird die Energieabhängigkeit des Photoeffekts beobachtet und das Plancksche Wirkungsquantum bestimmt sowie die Austrittsarbeit abgeschätzt.

Ferner wird die Balmer-Serie des Wasserstoffs sowie des Deuteriums ausgemessen. Außerdem ist die Isotopieaufspaltung zu beobachten und abzuschätzen. Aus den Balmer-Linien wird dann ebenfalls das Plancksche Wirkungsquantum bestimmt und mit den Ergebnissen aus dem ersten Versuchsteil verglichen.

## P402.2 Notwendige Vorkenntnisse

### Teil I – Photoelektrische Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

- Photoeffekt
- Photozelle
  - Aufbau und Wirkung, Photostromverlauf, Austrittsarbeit, Kontaktpotential

### Teil II – Balmer-Serie

- Aufbau der Atomhülle
  - Bohrsches Atommodell, Balmer-Serie, Quantenmechanische Betrachtung der Balmer-Serie, Isotopieaufspaltung
- Spektroskopie
  - Natürliche Linienbreite und Linienverbreiterungen, Funktionsprinzip und Auflösungsvermögen eines Reflexionsgitters

## P402.3 Literatur

- Demtröder: „*Experimentalphysik, Bd. 3: Atome, Moleküle, Festkörper*“
- Meschede: „*Gerthsen Physik*“
- Bergmann, Schäfer: „*Lehrbuch der Experimentalphysik III, IV*“
- Alonso, Finn: „*Quantenphysik und Statistische Physik*“
- Haken, Wolf: „*Atom- und Quantenphysik*“
- Mayer-Kuckuk: „*Atomphysik*“
- Hecht: „*Optik*“
- Demtröder: „*Laserspektroskopie*“
- Jedes Lehrbuch der Atomphysik und der Quantenmechanik

## P402.4 Aufgaben

### Teil I – Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

- Bestimmung der Grenzspannung  $U_0$ , bei der keine Kathodenelektronen mehr die Anode erreichen, für fünf Wellenlängen
- Berechnung des Planckschen Wirkungsquantums  $h$  und Abschätzung der Austrittsarbeit  $W_A$
- Überprüfung des Einflusses der Intensität des einfallenden Lichts auf die Messung

### Teil II – Balmer-Serie

- Ausmessen der Gitterkonstanten mit Hilfe der Hg-Lampe
- Ausmessen des Wasserstoffspektrums samt Isotopieaufspaltung
  - mit einem Okular
  - mit einer CCD-Kamera

**! Hierzu bitte einen USB-Stick mitbringen !**

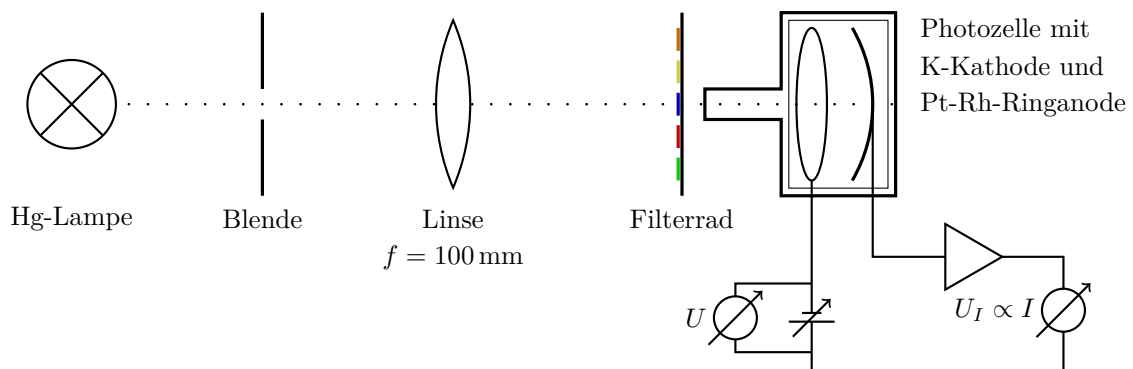
- Abschätzen des Auflösungsvermögens der Apparatur

## P402.5 Durchführung und Analyse

### P402.5.1 Teil I – Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

#### Aufbau

Eine Quecksilberdampflampe dient für diesen Versuch als Lichtquelle. Mittels einer verstellbaren Blende kann die Intensität des Lichtes variiert werden. Eine Linse ( $f = 100\text{ mm}$ ) erzeugt einen kleinen Lichtfleck auf der Kathode der Photozelle, die mit einer schwarzen Haube gegen Streulicht geschützt ist. Direkt vor der Photozelle befindet sich ein Filtrerrad, das fünf Interferenzfilter enthält, die diskrete Linien aus dem Spektrum der Hg-Dampflampe filtern. Zwischen Interferenzfiltrerrad und Photozelle ist ein Streulicht begrenzendes Rohr angebracht. Das auf die Kathode auftreffende Licht löst Photoelektronen aus, deren kinetische Energie gleich der Energie der Lichtquanten abzüglich der Austrittsarbeit aus dem Kathodenmaterial ist. Mittels einer variablen Spannungsquelle ( $0\text{--}12\text{ V}$ ) kann zwischen Kathode und Ringanode ein elektrisches Feld angelegt werden. Verschiedene Widerstände ( $100\ \Omega$ ,  $222\ \Omega$  und  $333\ \Omega$ ) können verwendet werden, um eine Spannungsteilerschaltung aufzubauen und somit die Ausgangsspannung des Netzgerätes an den Bedarf anzupassen. Die elektrische Spannung zwischen Kathode und Anode kann an einem Multimeter abgelesen werden. Ein Messverstärker misst den Anodenstrom und gibt eine zum Strom proportionale Spannung aus, die mittels eines weiteren Multimeters gemessen werden kann. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abb. P402.1 dargestellt.



**Abbildung P402.1:** Versuchsaufbau: Photoelektrische Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

#### Justierung

Zur Justierung die schwarze Schutzkappe von der Photozelle vorsichtig lösen, sodass gesehen werden kann, wo das Licht der Hg-Lampe auf die Photokathode trifft. Die optischen Bauteile so auf der optischen Bank positionieren, dass sich die Hg-Dampflampe und die Photozelle jeweils entgegengesetzt am äußeren Ende der optischen Bank befinden. Als nächstes Linse und Interferenzfiltrerrad einbauen. Im Filtrerrad das gelbe Interferenzfilter ( $\lambda = 578\text{ nm}$ ) in die Durchlassposition stellen. Als letztes die Irisblende direkt vor die Hg-Lampe stellen. Es ist beim Aufbau darauf zu achten, dass alle Bauteile die gleiche Höhe aufweisen.

Die Hg-Lampe einschalten und einige Minuten warten, bis die Lampe ihre volle Intensität erreicht hat. Die Reflexionen der Linse und des Interferenzfilters nutzen, um die einzelnen Bauteile senkrecht zur optischen Achse auf gleicher Höhe auszurichten.

Die Irisblende am Filterradd vollständig öffnen und die Irisblende an der Hg-Lampe so weit schließen, dass auf der Photokathode ein Lichtfleck mit einem Durchmesser von ca. 5–10 mm entsteht. Die Linse so lange verschieben, bis sich eine scharfe Abbildung dieses Lichtflecks ergibt. Insbesondere darauf achten, dass die Ringanode nicht beleuchtet wird.

Nun die schwarze Schutzkappe vorsichtig über die Photozelle stülpen bis die Öffnung in Höhe des Strahlenganges liegt. **ACHTUNG: Die Schutzkappe nicht bis zum Anschlag nach unten schieben!** Die Irisblenden so einstellen, dass die Öffnung der Schutzkappe nicht überstrahlt wird. Zuletzt das Streulicht begrenzende Rohr zwischen Schutzkappe und Interferenzfilterrad anbringen, ohne dabei die Justierung zu verändern.

## Durchführung

Beide schwarzen Kabel der Photozelle (Anodenanschluss) mit dem gleichen Ausgang des Netzgerätes verbinden. Dabei auf die korrekte Polung achten. Den Kathodenanschluss (weißes Kabel mit BNC-Stecker) mit dem entsprechenden Anschluss des Messverstärkers verbinden. Einen eventuell vorhandenen Offset des Ausgangssignals des Messverstärkers beseitigen. Weiterhin den zweiten Ausgang der regelbaren Spannung des Netzgerätes mit dem Masseanschluss des Messverstärkers verbinden. Die Digitalmultimeter so anschließen, dass Photostrom und Gegenspannung gemessen werden können.

- Zunächst das Interferenzfilter wählen, das das energiereichste Licht durchlässt, und die Gegenspannung so lange variieren, bis der Photostrom verschwindet. Es kann festgestellt werden, dass die benötigte Gegenspannung deutlich niedriger ist als die vom Netzgerät maximal bereitgestellte Spannung von 12 V.
- Aus den vorhandenen Widerständen eine sinnvolle Auswahl treffen und den Versuchsaufbau um eine Spannungsteilerschaltung erweitern, die einen sinnvollen Spannungsbereich für die Messungen liefert. Diesen Aufbau für die gesamte Messung beibehalten.
- Eine Wellenlänge mittels des Filterrads auswählen. Die größtmögliche Gegenspannung einstellen und die Größe des Anodenphotostroms  $I_0$  bestimmen, der aus Elektronen besteht, die aus der Anode gelöst wurden und zur Kathode gelangen. Die Gegenspannung variieren und grob die Grenzspannung  $U_0$  bestimmen, bei der der Photostrom Null wird. Im Folgenden die Kennlinie der Photozelle messen, indem die Gegenspannung von  $U = 0$  V bis zu einer Spannung variiert wird, bei der der Photostrom den Wert von  $I_0$  annimmt. Hierbei Messpunkte in geeignetem Abstand aufnehmen; dabei ist darauf zu achten, dass im quadratischen Bereich der Kennlinie genügend Messpunkte liegen.
- Diese Messung für alle Wellenlängen durchführen ( $I_0$ ,  $U_0$ , Kennlinie). Die Messungen für die Kennlinien müssen zweimal durchgeführt werden, da die Intensität der Hg-Lampe schwankt.

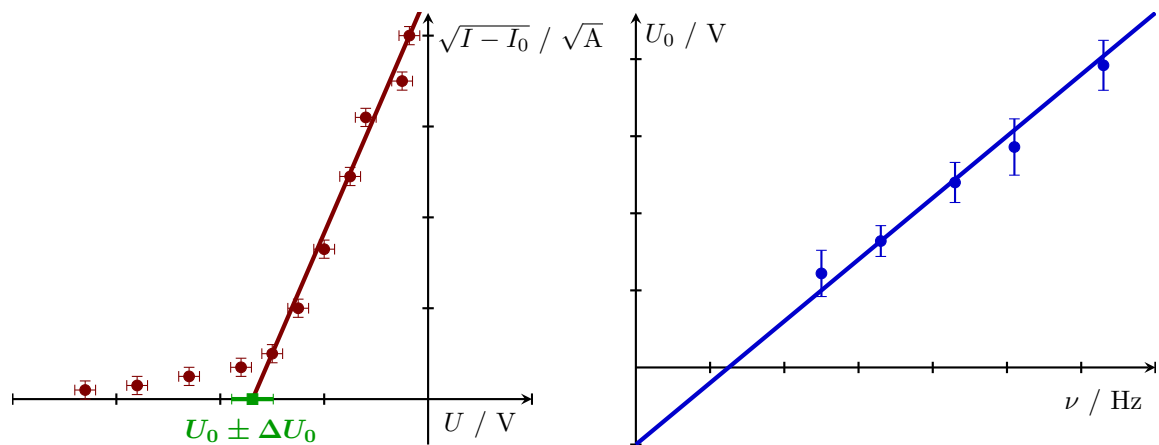
- Im Filtrerrad das Interferenzfilter mit der Durchlasswellenlänge  $\lambda = 365 \text{ nm}$  in den Strahlengang stellen und die erste Irisblende so verändern, dass der Photostrom bei  $U = 0 \text{ V}$  deutlich größer wird. Wenn eine Öffnung der Blende nicht zu einer Erhöhung des Photostroms führt, den Blendendurchmesser verringern, bis eine deutliche Abnahme des Photostroms um 30–50 % beobachtet werden kann. Die Kennlinie der Photozelle für diese Wellenlänge wie oben beschrieben bei dieser niedrigeren Intensität messen.

### Auswertung

Die Energiebilanz in der Photozelle kann mit Hilfe der Abbildung P402.5 bis P402.7 aufgestellt werden. Für diese gilt

$$h \nu = e U_0 + W_A, \quad (\text{P402.1})$$

wobei  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum,  $\nu$  die Frequenz des Lichts,  $e$  die Elektronenladung,  $U_0$  die Grenzspannung und  $W_A$  die Austrittsarbeit der Anode ist.



**Abbildung P402.2:** Auswertung des Versuchs

- Die Energiebilanz für Photoelektronen ist herzuleiten (siehe Abschnitt P402.6.1). Dabei ist auch zu erläutern, weshalb nur die Austrittsarbeit der Anode  $W_A$  bestimmt werden kann.
- Im Anlaufgebiet wächst der Photostrom  $I$  quadratisch mit der Gegenspannung  $U$ . Für jede Wellenlänge separat die Wurzel aus dem Anlaufstrom  $\sqrt{I - I_0}$  als Funktion von  $U$  grafisch auftragen. Den linearen Teil extrapolieren und so die Grenzspannung  $U_0$  samt Fehler bestimmen (Abbildung P402.2, linkes Teilbild).
- Die Grenzspannungen  $U_0$  mit ihren Fehlern in Abhängigkeit der Frequenzen auftragen und die Steigung der Geraden ermitteln. Aus der Steigung der Geraden und dem Achsenabschnitt kann dann das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  bestimmt und die Austrittsarbeit  $W_A$  abgeschätzt werden (Abbildung P402.2, rechtes Teilbild). Es ist eine sinnvolle Fehlerrechnung und -diskussion durchzuführen.
- Die Kennlinien für  $\lambda = 365 \text{ nm}$  bei unterschiedlichen Intensitäten vergleichen und die Ergebnisse diskutieren.

## P402.5.2 Teil II – Balmer-Serie

### Aufbau

#### ! Achtung !

Die Oberfläche des Gitters kann *nicht* gereinigt werden!

- auf keinen Fall berühren!
- Schutzkappe nur für den Versuch abnehmen!

Mit einem Reflexionsgitter soll die Balmer-Serie des Wasserstoffs samt Isotopieaufspaltung ausgemessen werden. Zur Übung der Justierung und zur Bestimmung der Gitterkonstanten dient eine Hg-Spektrallampe.

- Die Optikelemente nach Abb. P402.3 aufbauen und auf eine Höhe ausrichten. Die Ausrichtung ist mit der Balmer-Lampe durchzuführen, da deren Kapillare auf den Spalt abgebildet werden soll.



**Abbildung P402.3:** Versuchsaufbau mit Okular (links) und mit CCD-Kamera (rechts) (LD Handblätter Physik)

- a Balmer-Lampe, deuteriert
- b Linse,  $f = 50 \text{ mm}$
- c Verstellbarer Spalt, schräge Flanken zur Lichtquelle
- d Projektionsobjektiv,  $f = 150 \text{ mm}$
- e Holographisches Gitter

f Linse,  $f = 300 \text{ mm}$

g Okular mit Strichskala

h CCD-Kamera

### Justierung

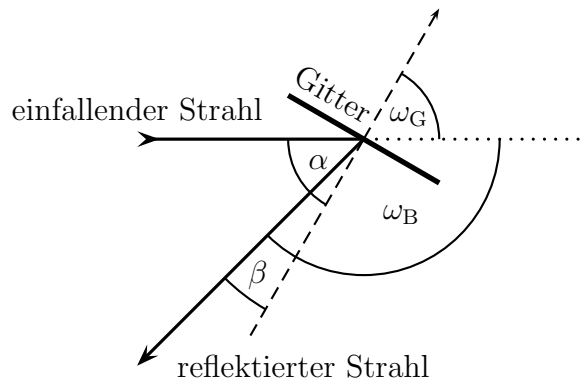
- Die Hg-Spektrallampe einsetzen.
- Mit Hilfe der Linse mit Brennweite  $f = 50 \text{ mm}$  die Lampe auf den Spalt abbilden.
- Das Projektionsobjektiv im Brennweitenabstand  $f = 150 \text{ mm}$  hinter dem Spalt positionieren.
- Die Säule des Drehgelenks so drehen, dass der Zeiger exakt auf  $0^\circ$  weist. Mit der Rändelschraube die Säule fixieren.
- Das Gitter senkrecht einsetzen, sodass das Licht auf den Spalt reflektiert wird. Nun das Projektionsobjektiv etwas verschieben, bis ein scharfes Bild des Spaltes neben dem Spalt zu beobachten ist (Autokollimation). So wird der Spalt ins Unendliche abgebildet.
- Mit Hilfe der Rändelschrauben des Gitters dieses so ausrichten, dass das Bild des Spaltes genau im Spalt selbst liegt.
- Den Winkel der optischen Bänke auf  $130^\circ \leq \omega_B < 170^\circ$  stellen.
- Das Okular am Ende der Schiene positionieren und so einstellen, dass die Skala gut ablesbar ist.
- Die Linse mit der Brennweite  $f = 300 \text{ mm}$  vor das Okular stellen (Fernrohr Aufbau).

### Bestimmung der Gitterkonstanten

Mittels einer Hg-Spektrallampe wird die Gitterkonstante bestimmt, da der vom Hersteller angegebene Wert nicht genau ist. Die Bestimmung dient auch zur Übung der Messmethode für die Aufnahme der Balmer-Serie, da die Intensität der Hg-Spektrallampe höher als die der Balmer-Lampe ist.

- Zunächst die Rändelschraube der Säule mit dem Gitter lösen und die Säule drehen, bis die erste sichtbare Linie zu beobachten ist. Zum Auffinden der Linie ist es hilfreich, den Spalt erst weiter zu öffnen und anschließend auf ca.  $0,1 \text{ mm}$  einzustellen.
- Die Werte der Wellenlängen der Hg-Linien können dem Anhang entnommen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dort nicht alle Spektrallinien aufgeführt sind.
- Die Linse der Brennweite  $f = 300 \text{ mm}$  verschieben, bis das Bild des Spaltes scharf ist.
- Den Winkel der optischen Bänke  $\omega_B$  und den Winkel des Gitters  $\omega_G$  ablesen.

- Jeder gemessenen Hg-Linie ist eine Wellenlänge mit Hilfe der Tabelle im Anhang zuzuordnen. Von den 13 angegebenen Linien sind mindestens zehn zu messen.



**Abbildung P402.4:** Winkel am Aufbau

## Untersuchung der Balmer-Linien

### Messung mit einem Okular

- Die Hg-Spektrallampe gegen die Balmerlampe tauschen.
  - Die Balmer-Lampe ist eine mit Wechselstrom betriebene Gasentladungsröhre, die mit Dampf aus deuteriertem und normalem Wasser (Verhältnis ca. 1 : 2) gefüllt ist.
- Mit Hilfe der Linse der Brennweite  $f = 50 \text{ mm}$  die Kapillare der Balmerlampe auf den Spalt abbilden. Darauf achten, dass die optische Achse im Mittelpunkt der Kapillare liegt.
- Die Justierung wie zuvor vornehmen.
- Wiederum die Rändelschraube der Säule mit dem Gitter lösen und die Säule drehen, bis die rote  $H_\alpha$ -Linie zu sehen ist.
- Die Linse vor dem Okular verschieben, bis ein scharfes Bild des Spaltes erkennbar ist.
- Den Winkel der optischen Bänke  $\omega_B$  und den Winkel des Gitters  $\omega_G$  ablesen.
- Den Abstand der Aufspaltung  $d$  auf der Skala des Okulars abschätzen.
  - Die Skala des Okulars hat eine Länge von 10 mm mit einer Teilung von 0,1 mm.
- Für die anderen Balmer-Linien wird nach dem selben Schema vorgegangen.

### Messung mit einer CCD-Kamera

- Anstelle des Okulars wird nun die CCD-Kamera eingesetzt, sodass die CCD-Zeile in Höhe der optischen Achse liegt.



- Die Kamera „VideoCom“ mit Spannung versorgen und mit dem Computer verbinden. Dort das Programm „VideoCom-Intensitäten“ starten.
  - Im Menü „Kalibrierung / Theorievergleich“ (F5), Register „Beugungswinkel“, die Brennweite  $f$  der abbildenden Sammellinse eingeben. Das Programm berechnet dann aus der Pixelkoordinate  $p$ , die von 0 bis 2047 läuft, den Winkel  $\beta$  über

$$\beta = \arctan \left( \frac{(1024 - p) \cdot 0,014 \text{ mm}}{f} \right).$$

- Die Belichtungszeit mit der zugehörigen Schaltfläche auf Stufe 8 stellen.
  - Die Messung mit der Taste F9 starten.
- Die Rändelschraube der Säule mit dem Gitter lösen und die Säule drehen, bis die roten Balmer-Linien auf die Mitte der Phototransistorzeile der Kamera, also bei  $0^\circ$ , abgebildet werden.
  - Es ist sinnvoll, den Spalt zum besseren Auffinden der Linien zunächst weiter zu öffnen und anschließend nur so weit zu öffnen, dass die Linien gerade zu sehen sind.
- Die Linse vor der Kamera verschieben, bis die Darstellung des Spaltes auf dem Monitor scharf ist. Es sollten zwei schmale Maxima unterschiedlicher Höhe zu beobachten sein.
- Mit Alt+Z den Ausschnitt vergrößern, sodass die Aufspaltung besser zu erkennen ist.
- Ist der gewünschte Ausschnitt ausgewählt, so kann zur Verbesserung der Auflösung mit der entsprechenden Schaltfläche ( $\Sigma_1$ ) eine Mittelwertbildung der Intensitäten gestartet werden. Unterscheiden sich zwei Maxima gut, kann die Messung mit F9 gestoppt werden.
- Mit einem Rechtsklick der Maus auf die Tabelle, diese mit „Tabelle kopieren“ kopieren und in einer Textdatei speichern. Den Winkel des Gitters notieren.
- Für die anderen Balmer-Linien wird wieder nach dem selben Schema vorgegangen.
  - Hierbei ist zu beachten, dass die Intensität der blauen Linie zu schwächer ausgeprägten Maxima führt.
  - Die Intensität der violetten Linie ist noch kleiner, sodass sie sich nur schwer beobachten lässt und somit die Aufspaltung nicht nachweisbar ist.

## Auswertung

### Bestimmung der Gitterkonstanten

- Mit Hilfe der Gittergleichung ist für jede Linie die Gitterkonstante auszurechnen. Abb. P402.4 erklärt die auftretenden Winkel. Der Winkel  $\alpha$  ist der Einfallswinkel,  $\beta$  der Ausfallswinkel.
- Die Gitterkonstante des vorliegenden Gitters wird durch ein geeignetes Regressionsverfahren aus den errechneten Werten gewonnen.

## Bestimmung der Balmerlinien

- Die Wellenlängen der Balmer-Linien sowie deren Isotopieaufspaltung  $\Delta\lambda$ , gewonnen aus der Winkelaufspaltung  $\Delta\beta$  der Linien, sind zu bestimmen.
  - Die Isotopieaufspaltung ist unter Verwendung von  $\frac{\partial\lambda}{\partial\beta}$  zu berechnen.
- An die Daten der mit „VideoCom“ gemessenen Intensitäten sind Gauß-Kurven anzupassen; es bietet sich eine Überlagerung zweier Gauß-Kurven an. Daraus wird der Peakschwerpunkt sowie die Halbwertsbreite bestimmt. Aus der somit gewonnenen Winkeldifferenz der aufgespaltenen Balmer-Linien, ist die Isotopieaufspaltung zu berechnen.
- Aus den gewonnenen Wellenlängen der Balmer-Linien ist die Rydberg-Konstante zu bestimmen und aus dieser das Plancksche Wirkungsquantum, welches mit dem gemessenen Wert aus Versuchsteil I zu vergleichen ist.
- Mögliche Fehlerquellen bei der Durchführung und der Auswertung sind zu diskutieren.

## Weitergehende Überlegungen

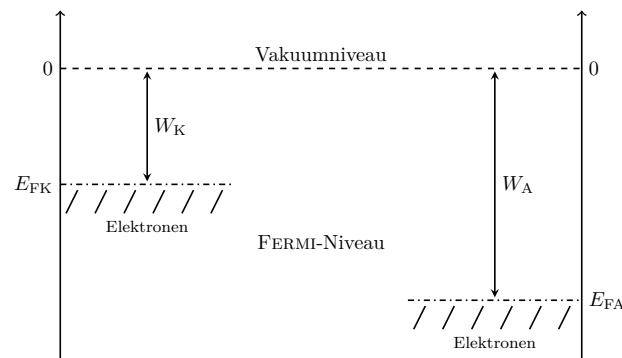
- Im Spektrum der Balmer-Lampe befinden sich, neben den vier im Sichtbaren liegenden Balmer-Linien, zusätzlich noch schwache Linien vom roten bis grünen Spektralbereich. Der Ursprung dieser, nicht zur Balmer-Serie gehörenden Linien ist zu diskutieren.
- Die Doppler-Verbreiterung der Linien ist abzuschätzen.
  - Die Temperatur der Balmer-Lampe beträgt ungefähr 1000 K.
- Die Doppler-Verbreiterung ist mit der natürlichen Linienbreite zu vergleichen.
- Die Breiten der mit der CCD-Kamera aufgenommenen Kurven sind mit der Doppler-Verbreiterung zu vergleichen und zu diskutieren.
- Das Auflösungsvermögen des Gitters ist abzuschätzen.
  - Die Abmessung des Gitters beträgt  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ .

## P402.6 Anhang

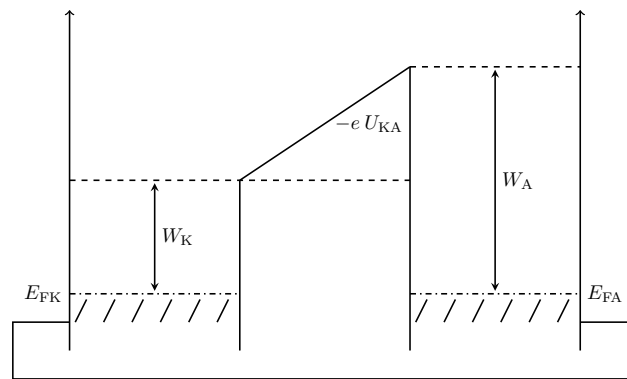
### P402.6.1 Bänderschemata der Elektroden

### P402.6.2 Spektrum der Hg-Spektrallampe

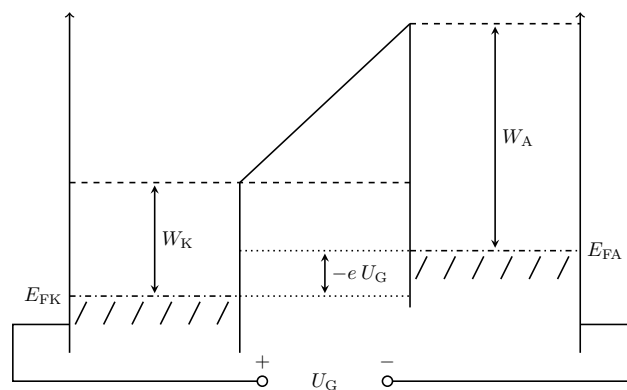
Die in Luft gemessenen Wellenlängen sind der Quelle „Wavelength and Transition Probabilities for Atoms and Atomic Ions“ von Joseph Reader und Charles H. Corliss entnommen.



**Abbildung P402.5:** Vereinfachtes gemeinsames Bänderschema von Kathode und Anode. Eingezeichnet sind die beiden Fermi-Niveaus von Kathode und Anode mit entsprechenden Energien  $E_{FK}$  und  $E_{FA}$ . Die Elektroden besitzen unterschiedliche Austrittsarbeiten  $W_K$  und  $W_A$ .



**Abbildung P402.6:** Kontaktpotential bei kurzgeschlossenen Elektroden. Es entsteht eine negative Potentialdifferenz  $U_{KA}$  zwischen Kathode und Anode, das Kontaktpotential.



**Abbildung P402.7:** Anlegen einer äußeren Spannung  $U_G$ . Der Potentialberg, den ein durch Licht aus der Kathode ausgelöstes Elektron in Richtung Anode überwinden muss, erhöht sich zusätzlich.

Farbe	$\lambda_{\text{Hg}}/\text{nm}$	rel. Int.
violett	404,656	1800
	407,783	150
	410,805	40
	433,922	250
	434,749	400
blau	435,833	4000
türkis	491,607	80
grün	546,074	1100
gelb	576,960	240
	579,066	280
rot	623,440	30
	671,643	160
	690,752	250

**Tabelle P402.1:** Wellenlängen der Hg-Spektrallampe