

## PRAKTIKUM 4

ATOME, MOLEKÜLE, KONDENSIERTE MATERIE

# Versuch 401: Elektronische Übergänge in Atomen

Gruppe A202

PARTH GADHAVI NOEMI RUPPERT ARIEH THILL

Versuchsdurchführung: 12. / 13. Mai 2025

# Inhaltsverzeichnis

# 1 Einleitung

Ein zentraler Versuch zur Bestätigung des Zusammenhangs zwischen der Quantelung von Energien und Emissions -und Absorptionslinien ist die Untersuchung des Photoeffekts. Die Spektroskopie ermöglicht die Untersuchung des Atomaufbaus, insbesondere durch die Analyse von Spektrallinien, welche einen Ausdruck der Quantelung von Energie sind und in direktem Zusammenhang mit Lichtfrequenzen stehen.

Im ersten Versuchsteil beobachtet man die Energieabhängigkeit des Photoeffekts und es werden das Planksche Wirkungsquantum, sowie die Austrittsarbeit abgeschätzt.

Im zweiten Versuchsteil wird durch Ausmessung der Balmer-Linien das Planksche Wirkungsquantum erneut bestimmt und mit dem Ergebnis aus dem ersten Versuchsteil verglichen.

## 2 Der Photoeffekt

### 2.1 Aufbau

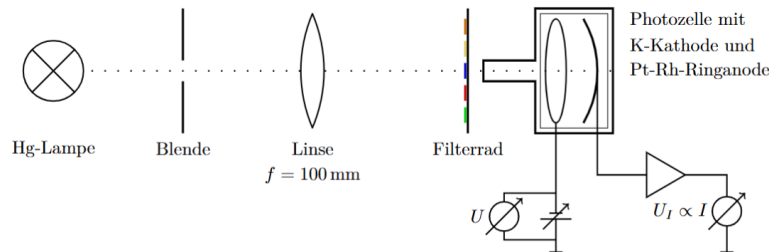


Abbildung 2.1: Aufbau für die Messung des Photoeffektes [1]

Links ist die Hg-Lampe zu sehen, in der Mitte Optik-Elemente zum Fokussieren und Filtern des Lichtes und rechts ist die Photozelle mit Gegenspannung und Strommessung. Die Quecksilber-Spektrallampe und die Photozelle werden gemäß Abbildung ?? gegenüberliegend auf dem Reiter angeordnet. Eine Irisblende vor der Lampe ermöglicht die Regulierung der Lichtintensität. Eine Linse mit einer Brennweite von  $f=100\text{ mm}$  wird in diesem Abstand vor die Blende positioniert, sodass sie das Licht parallel auf den nachfolgenden Interferenzfilter mit fünf Filtern sowie eine zusätzliche Blende lenkt.

### 2.2 Durchführung

Eine Abschirmvorrichtung mit einem röhrenförmigen Element verhindert Streulicht. Ein Lichtfleck wird gezielt auf die Kathode projiziert, ohne ,dass die Anode beleuchtet wird.

Wenn Photonen aus der Hg-Lampe auf die Photokathode treffen, interagieren sie mit den Elektronen in dieser und überträgt dabei seine gesamte Energie  $E = h\nu$  auf eines der Elektronen. Falls die übertragene Energie größer als die Austrittsarbeit  $W_A$  ist, dann kann sich das Elektron aus der Kathode lösen und zur Ringanode gelangen. Dadurch entsteht ein Stromfluss: der Photostrom  $I_{ph}$ . Durch den Einsatz der Gegenfeldmethode wird die maximale kinetische Energie, die die Elektronen beim verlassen der Kathode besitzen, bestimmt.

Bei dieser Methode wird eine Gegenspannung  $U_G$  zwischen Kathode und Anode angelegt, wodurch die Kathode im Vergleich zur Anode ein positives Potential erhält. Das dadurch erzeugte elektrische Feld verlangsamt die emittierten Elektronen auf ihrem Weg zur Anode, wodurch der Photostrom reduziert wird. Sobald die Grenzspannung  $U_0$  erreicht ist, kommt der Photostrom vollständig zum Erliegen. Dies bedeutet, dass selbst die energiereichsten Elektronen die Anode nicht mehr erreichen können. In diesem Fall gilt die Beziehung:  $E_{kin,max} = eU_0$ .

Man lässt das Gegenfeld mit Hilfe einer variablen Spannungsquelle, welche sich zwischen der Kathode und der Anode befindet, ansteigen. Man erweitert die Schaltung mit Hilfe eines Spannungsteilers (Abbildung ??) aus einem  $330\Omega$  und  $100\Omega$  Widerstandes um den Messbereich zu skalieren und genauere Messungen durchzuführen.

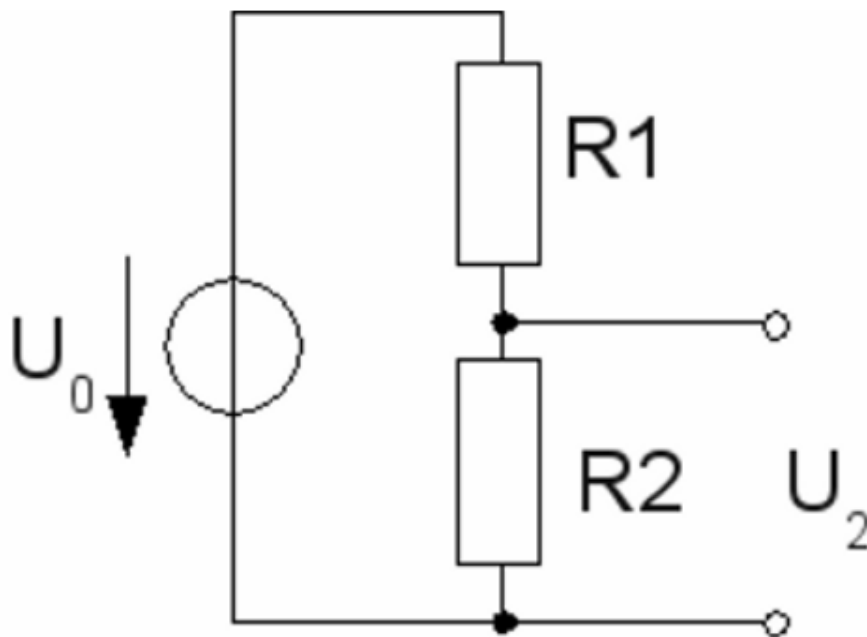


Abbildung 2.2: Spannungsteiler

Der Anodenstrom wird über einen Messverstärker erfasst, während eine zum Strom proportionale Spannung mit einem Digitalmultimeter (DMM) gemessen wird. Die Gegenspannung stammt aus einem 12V-Gleichspannungsnetzteil, wobei der negative Pol mit der Anode verbunden ist, um die Elektronen abzubremesen. Diese Spannung wird mit einem weiteren DMM gemessen.

### 2.2.1 Energiebilanz der Photoelektronen

Laut der Abbildung der Fermienergie ?? gilt für die Energiebilanz:

$$E = h\nu = W_K + eU_{KA} + eU_{G,0} = W_K + W_A - W_K + eU_{G,0} = W_A + eU_{G,0} \quad (2.1)$$

Aus der Frequenz des Lichtes können schließlich die Austrittsarbeit der Anode  $W_A$  und das Planck'sche Wirkungsquantum  $h$  bestimmt werden:

$$eU_{G,0} = h\nu - W_A \quad (2.2)$$

## 2.3 Abschätzung des Plankschen Wirkungsquantums und der Austrittsarbeit

### 2.3.1 Bestimmung der Grenzspannung $U_0$

### 2.3.2 Bestimmung des Plankschen Wirkungsquantums $h$

$\lambda$ [nm]	$\nu$ [Hz]	$\overline{U_0}$ [mV]	$\Delta\overline{U_0}$ [mV]
365,00 nm	$8,21 \times 10^{14}$	2124,19	45,39
405,00 nm	$7,40 \times 10^{14}$	1605,23	47,04
463,00 nm	$6,47 \times 10^{14}$	1341,51	57,42
546,00 nm	$5,49 \times 10^{14}$	638,22	59,13
578,00 nm	$5,19 \times 10^{14}$	458,70	24,80

Tabelle 2.1: Gemittelte Abbremsspannungen  $\overline{U_0}$  und deren Unsicherheiten gegen die jeweiligen Frequenzen.

Parameter	Wert
Steigung $m$ [mV Hz <sup>-1</sup> ]	$5,457 \times 10^{-12} \pm 2,953 \times 10^{-13}$
Achsenabschnitt $b$ [mV]	$-2,360 \times 10^3 \pm 1,842 \times 10^2$
$\chi^2$	11,56
Freiheitsgrade (dof)	3
$\chi^2/\text{dof}$	3,85

Tabelle 2.2: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits von  $\overline{U_0}$  gegen  $\nu$ .

$$h = (8,743 \pm 0,473) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

### 2.3.3 Bestimmung der Austrittsarbeit $W_A$

$$W_A = (3,781 \pm 0,295) \times 10^{-19} \text{ J } ((2,360 \pm 0,184) \text{ eV})$$

### 2.3.4 Vergleich der Lambda-Kennlinie für unterschiedliche Intensitäten

# 3 Die Balmer-Serie

## 3.1 Grundlagen

### 3.1.1 Bohrsche Atommodell

Im Bohrschen Atommodell bewegen sich die Elektronen auf bestimmten Kreisbahnen. Diese Kreisbahnen sind ein ganzzahliges Vielfaches der De Broglie Wellenlänge. Wegen dem Kräftegleichgewichts zwischen Coulombkraft und Zentripetalkraft ergeben sich für die Radien der Kreisbahnen der Elektronen:

$$r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi \mu Z e^2} = \frac{n^2}{Z} a_0 \quad (3.1)$$

Wobei  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum,  $\mu$  die reduzierte Masse des Elektrons,  $Z$  die Ladungsmenge,  $e$  die Elementarladung,  $n \in \mathbf{N}$ ,  $a_0$  der Bohrsche Radius ist.

### 3.1.2 Balmer-Serie

Elektronen können ihre Bahn wechseln, indem sie Energie in Form elektromagnetischer Wellen mit der Frequenz  $\nu$  absorbieren oder emittieren, wobei ihre Energie durch  $E = h\nu$  bestimmt wird. Die Lichtfrequenz während der Anregung oder Abregung eines Elektrons von einem Energieniveau zu einem Niveau folgt dem Zusammenhang:

$$\nu = R_\infty c Z^2 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (3.2)$$

Dadurch wird die Energiedifferenz zwischen den beiden Zuständen mit Quantenzahlen  $n$  und  $m$  gegeben. Wobei  $R_\infty$  der Rydberg-Konstante entspricht.

Für ein Wasserstoffatom gilt  $Z = 1$  und mit  $n = 2$  und  $m > 2$  und man erhält die Balmer-Serie an Frequenzen die beobachtet werden und welche im sichtbaren Bereich sind.

### 3.1.3 Quantenmechanische Betrachtung der Balmer-Serie

### 3.1.4 Isotopieaufspaltung

Ein Isotop von Wasserstoff ist Deuterium: sein Kern besteht aus einem Proton und einem extra Neutron. Bei der Rydberg-Konstante muss dies berücksichtigt werden. Daraus folgt eine Verschiebung der Energie des emittierten Lichtstrahls. Bei diesen Kernen weist sich der relative Massenunterschied besonders groß auf, wodurch die Verschiebung besonders deutlich sichtbar ist.

### 3.1.5 Natürliche Linienbreite und Linienverbreiterungen

### 3.1.6 Reflexionsgitter

Funktionsweise

Auflösevermögen

## **3.2 Aufbau**

## **3.3 Durchführung**

## **3.4 Bestimmung der Gitterkonstanten**

## **3.5 Bestimmung der Balmerlinien**

### **3.5.1 Bestimmung der Isotopieaufspaltung**

Ermittlung des Peakschwerpunktes

Ermittlung der Halbwertsbreite

### **3.5.2 Bestimmung der Rydberg-Konstante und des Plankschen Wirkungsquantum**

Rydberg-Konstante

Planksche Wirkungsquantum

## **3.6 Weitergehende Überlegungen**

### **3.6.1 Möglicher Ursprung der anderen auftretenden Spektrallinien**

### **3.6.2 Doppler-Verbreitung**

### **3.6.3 Auflösevermögen des Gitters**



## 4 Fazit

## 5 Formeln: To be deleted at the end

### Spannungsteiler

$$U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{\text{ges}} \quad (5.1)$$

mit  $U$  als Spannung am Widerstand  $R_2$ ,  $R_1$  und  $R_2$  als Widerstände und  $U_{\text{ges}}$  als Gesamtspannung.

### Energieerhaltung

$$h f = E_{\text{kin}} + W_A, \quad E_{\text{kin}} = e U_G \quad (5.2)$$

mit  $h$  dem Planckschen Wirkungsquantum,  $f$  der Photonfrequenz,  $e$  der Elementarladung,  $U_G$  der Gegenspannung und  $W_A$  der Austrittsarbeit.

### Fehlerfortpflanzung I

$$\Delta(\sqrt{I - I_0}) = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{2\sqrt{I - I_0}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_0}{2\sqrt{I - I_0}}\right)^2}. \quad (5.3)$$

### Beugungsgitter

$$g(\sin \theta_m + \sin \beta) = m \lambda \quad \Rightarrow \quad g = \frac{m \lambda}{\sin \theta_m + \sin \beta} \quad (5.4)$$

$$\Delta g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \beta} \Delta \beta\right)^2}. \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \theta_m} = \frac{m \lambda \cos \theta_m}{(\sin \theta_m + \sin \beta)^2}, \quad \frac{\partial g}{\partial \beta} = \frac{m \lambda \cos \beta}{(\sin \theta_m + \sin \beta)^2}. \quad (5.6)$$

### Mittelwert der Gitterkonstante

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^N (g_i / \Delta g_i)}{\sum_{i=1}^N (1 / \Delta g_i)}, \quad \Delta \bar{g} = \sqrt{\frac{N}{\sum_{i=1}^N 1 / (\Delta g_i)^2}}. \quad (5.7)$$

### Isotopenverhältnis

$$\lambda = g (\sin \theta_m + \sin \beta), \quad \frac{\partial \lambda}{\partial \beta} = g \cos \beta, \quad \Delta \beta \approx \frac{d}{f}. \quad (5.8)$$

### Fehlerfortpflanzung II

$$\Delta \lambda = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{g} \Delta g\right)^2 + \left(g \cos \alpha \Delta \alpha\right)^2 + \left(g \cos \beta \Delta \beta\right)^2}. \quad (5.9)$$

$$\Delta(\Delta \lambda) = \sqrt{\left(\frac{d \cos \beta}{f} \Delta g\right)^2 + \left(\frac{-d \sin \beta}{f g} \Delta \beta\right)^2 + \left(\frac{g \cos \beta}{f} \Delta d\right)^2}. \quad (5.10)$$

**Balmer-Formel**

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (5.11)$$

$$R_H = \frac{1/\lambda}{\left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)}, \quad \Delta R_H = \frac{\Delta \lambda}{\lambda^2 \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)}. \quad (5.12)$$

**Plancksches Wirkungsquantum**

$$h = \left( \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 c R_H} \right)^{1/3}, \quad \Delta h = \frac{1}{3} \left( \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 c} \right)^{1/3} R_H^{-4/3} \Delta R_H. \quad (5.13)$$

$$U_0 = -\frac{b}{m} \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial U_0}{\partial b} = -\frac{1}{m}, \quad \frac{\partial U_0}{\partial m} = \frac{b}{m^2}. \quad (5.15)$$

$$\text{Var}(U_0) = \left( \frac{\partial U_0}{\partial b} \right)^2 \sigma_b^2 + \left( \frac{\partial U_0}{\partial m} \right)^2 \sigma_m^2 + 2 \frac{\partial U_0}{\partial b} \frac{\partial U_0}{\partial m} \text{Cov}(b, m). \quad (5.16)$$

$$\sigma_{U_0} = \sqrt{\left( \frac{\sigma_b}{m} \right)^2 + \left( \frac{b \sigma_m}{m^2} \right)^2 - 2 \frac{b}{m^3} \text{Cov}(m, b)}. \quad (5.17)$$

$$y = m U + b$$

# Literatur

- [1] *Physikalisches Praktikum Teil IV:*  
*Atome, Moleküle, Festkörper.* 15. Apr. 2025. Uni Bonn.

# Abbildungsverzeichnis

# Tabellenverzeichnis

# A Anhang

## A.1 Abbildungen

Photoeffekt

## A.2 Tabellen

Photoeffekt

$\lambda = 365 \text{ nm}$				$\lambda = 405 \text{ nm}$			
Messung 1		Messung 2		Messung 1		Messung 2	
$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$
0,5	2380,0	0,5	2382,0	0,5	900,0	0,5	914,0
30,5	2070,0	35,6	2065,0	41,5	722,0	36,0	740,0
84,2	1630,0	84,6	1624,0	49,4	680,0	53,9	665,0
121,0	1325,0	120,5	1334,0	105,4	450,0	102,0	464,0
152,9	1071,0	156,3	1061,0	149,6	293,8	152,9	286,9,0
160,7	1025,0	170,3	951,0	167,7	245,0	165,6	250,5
182,4	883,0	180,8	892,0	174,5	226,9	178,2	215,6
190,7	823,0	194,8	795,0	201,7	161,2	200,3	164,8
217,9	655,0	219,4	653,0	213,7	139,5	217,5	230,0
270,0	396,0	271,1	392,0	247,4	86,1	254,1	78,8
287,0	333,3	287,4	325,0	267,7	63,5	273,2	58,2
355,7	152,7	359,2	148,8	289,6	45,8	293,0	24,8
396,3	79,9	397,2	95,6	301,9	38,8	304,7	36,5
452,0	32,9	455,0	29,2	352,9	14,8	345,3	17,6
472,0	14,1	477,0	11,7	378,1	5,1	384,8	3,2
517,0	1,1	516,0	1,4	410,0	1,1	405,0	1,1

Tabelle A.1: Messwerte der Photospannung  $U_{ph}$  bei Gegenspannung  $U_G$  für  $\lambda = 365 \text{ nm}$  und  $\lambda = 405 \text{ nm}$ , wobei  $\Delta U_{ph} = 0.1 \cdot U_{ph} + 10 \text{ mV}$ ,  $\Delta U_G = 10 \text{ mV}$

$\lambda = 463 \text{ nm}$			
Messung 1		Messung 2	
$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$
0,5	1107,0	0,5	1130,0
31,1	901,0	34,3	866,0
87,5	537,0	91,9	522,0
133,2	313,1	135,0	307,4
152,1	236,9	152,1	242,8
192,5	126,6	190,6	130,0
227,5	68,5	227,0	68,8
291,0	18,8	287,4	21,1
334,9	1,9	329,2	2,8
345,9	0,6	349,4	0,0

Tabelle A.2: Messwerte der Photospannung  $U_{ph}$  bei Gegenspannung  $U_G$  für  $\lambda = 463 \text{ nm}$ , mit  $\Delta U_{ph} = 0.1 \cdot U_{ph} + 10 \text{ mV}$  und  $\Delta U_G = 10 \text{ mV}$ .

$\lambda = 546 \text{ nm}$				$\lambda = 578 \text{ nm}$			
Messung 1		Messung 2		Messung 1		Messung 2	
$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$
0,5	5700,0	0,5	5390,0	0,5	644,0	0,5	565,0
32,7	2155,0	29,0	2444,0	10,7	406,0	10,2	406,0
12,4	3900,0	9,1	4230,0	21,6	287,5	23,6	276,8
52,9	1165,0	51,0	1206,0	31,1	217,2	29,6	225,1
69,9	677,0	61,7	874,0	39,6	169,3	39,6	169,6
60,4	949,0	71,8	645,0	54,9	117,2	50,5	122,7
103,2	212,9	101,0	242,1	62,1	82,6	60,8	84,4
130,7	77,7	128,7	82,2	73,3	55,7	69,6	63,7
150,8	13,8	150,8	18,3	82,2	39,6	83,2	37,6
162,4	6,2	158,7	0,1	119,8	0,0	116,6	2,4

Tabelle A.3: Messwerte der Photospannung  $U_{ph}$  bei Gegenspannung  $U_G$  für  $\lambda = 546 \text{ nm}$  und  $\lambda = 578 \text{ nm}$ , wobei  $\Delta U_{ph} = 0.1 \cdot U_{ph} + 10 \text{ mV}$  und  $\Delta U_G = 10 \text{ mV}$ .



$\lambda = 365 \text{ nm}$			
Messung max		Messung 50%	
$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$
0,4	9200,0	0,5	4040,0
100,2	5760,0	106,6	2417,0
200,8	2939,0	203,3	1296,0
259,3	1806,0	235,6	974,0
299,3	1172,0	255,8	806,0
330,4	823,0	279,8	630,0
364,5	549,0	303,6	491,0
402,0	337,6	350,8	282,4
453,0	111,6	404,0	147,8
504,0	12,2	450,0	58,8
1020,0	1,5	510,0	10,0

Tabelle A.4: Messwerte der Photospannung  $U_{ph}$  bei Gegenspannung  $U_G$  für  $\lambda = 365 \text{ nm}$  (Maximalwerte und 50%-Punkt), wobei  $\Delta U_{ph} = 0.1 \cdot U_{ph} + 10 \text{ mV}$  und  $\Delta U_G = 10 \text{ mV}$ .

$U [\text{mV}]$	$\Delta U [\text{mV}]$	$I [\text{pA}]$	$\Delta I [\text{pA}]$	$\sqrt{I - I_0} [\sqrt{\text{pA}}]$	$\Delta\sqrt{I - I_0} [\sqrt{\text{pA}}]$
2.15	43.00	2380.00	248.00	48.77	2.54
131.15	43.00	2070.00	217.00	45.49	2.39
362.06	43.00	1630.00	173.00	40.36	2.14
520.30	43.00	1325.00	142.50	36.39	1.96
657.47	43.00	1071.00	117.10	32.71	1.79
691.01	43.00	1025.00	112.50	32.00	1.76
784.32	43.00	883.00	98.30	29.70	1.66
820.01	43.00	823.00	92.30	28.67	1.61
936.97	43.00	655.00	75.50	25.57	1.48
1161.00	43.00	396.00	49.60	19.87	1.25
1234.10	43.00	333.30	43.33	18.23	1.19
1529.51	43.00	152.70	25.27	12.31	1.03
1704.09	43.00	79.90	17.99	8.88	1.01
1943.60	43.00	32.90	13.29	5.64	1.18
2029.60	43.00	14.10	11.41	3.61	1.58
2223.10	43.00	1.10	10.11	0.00	0.00

Tabelle A.5: Gemessenen Werte für die erste Messung bei  $\lambda = 365 \text{ nm}$ . Die Sättigungsspannung liegt bei  $U_G = 517,00 \text{ mV}$ , daraus folgt  $I_0 = (1,10 \pm 10,11) \text{ pA}$ .

Parameter	Wert
Steigung $m$ [ $\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$ ]	$-2,22 \times 10^{-2} \pm 5,58 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt $b$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$4,70 \times 10^1 \pm 7,48 \times 10^{-1}$
$\chi^2$	8,28
Freiheitsgrade (dof)	13
$\chi^2/\text{dof}$	0,637
Abbremsspannung $U_0$ [mV]	$2117,12 \pm 62,98$

Tabelle A.6: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die erste Messung bei  $\lambda = 365$  nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

$U$ [mV]	$\Delta U$ [mV]	$I$ [pA]	$\Delta I$ [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]
2.15	43.00	2382.00	248.20	48.79	2.54
153.08	43.00	2065.00	216.50	45.43	2.38
363.78	43.00	1624.00	172.40	40.28	2.14
518.15	43.00	1334.00	143.40	36.50	1.96
672.09	43.00	1061.00	116.10	32.55	1.78
732.29	43.00	951.00	105.10	30.82	1.71
777.44	43.00	892.00	99.20	29.84	1.66
837.64	43.00	795.00	89.50	28.17	1.59
943.42	43.00	653.00	75.30	25.53	1.47
1165.73	43.00	392.00	49.20	19.76	1.24
1235.82	43.00	325.00	42.50	17.99	1.18
1544.56	43.00	148.80	24.88	12.14	1.02
1707.96	43.00	95.60	19.56	9.71	1.01
1956.50	43.00	29.20	12.92	5.27	1.23
2051.10	43.00	11.70	11.17	3.21	1.74
2218.80	43.00	1.40	10.14	0.00	0.00

Tabelle A.7: Gemessenen Werte für die zweite Messung bei  $\lambda = 365$  nm. Die Sättigungsspannung liegt bei  $U_G = 516,00$  mV, daraus folgt  $I_0 = (1,40 \pm 10,14)$  pA.

Parameter	Wert
Steigung $m$ [ $\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$ ]	$-2,20 \times 10^{-2} \pm 5,73 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt $b$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$4,69 \times 10^1 \pm 7,63 \times 10^{-1}$
$\chi^2$	8,45
Freiheitsgrade (dof)	13
$\chi^2/\text{dof}$	0,650
Abbremsspannung $U_0$ [mV]	$2131,82 \pm 65,47$

Tabelle A.8: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die zweite Messung bei  $\lambda = 365$  nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

$U$ [mV]	$\Delta U$ [mV]	$I$ [pA]	$\Delta I$ [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]
2.15	43.00	4040.00	414.00	63.48	3.26
458.38	43.00	2417.00	251.70	49.06	2.57
874.19	43.00	1296.00	139.60	35.86	1.95
1013.08	43.00	974.00	107.40	31.05	1.73
1099.94	43.00	806.00	90.60	28.21	1.61
1203.14	43.00	630.00	73.00	24.90	1.47
1305.48	43.00	491.00	59.10	21.93	1.35
1508.44	43.00	282.40	38.24	16.50	1.16
1737.20	43.00	147.80	24.78	11.74	1.06
1935.00	43.00	58.80	15.88	6.99	1.14
2193.00	43.00	10.00	11.00	0.00	0.00

Tabelle A.9: Gemessenen Werte für die Messung bei 50 % Intensität und  $\lambda = 365$  nm. Die Sättigungsspannung liegt bei  $U_G = 510,00$  mV, daraus folgt  $I_0 = (10,00 \pm 11,00)$  pA.

Parameter	Wert
Steigung $m$ [ $\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$ ]	$-2,79 \times 10^{-2} \pm 9,92 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt $b$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$5,96 \times 10^1 \pm 1,45$
$\chi^2$	6,55
Freiheitsgrade (dof)	8
$\chi^2/\text{dof}$	0,819
Abbremsspannung $U_0$ [mV]	$2136,20 \pm 92,03$

Tabelle A.10: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die Messung bei  $\lambda = 365$  nm mit 50% Intensität. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

$U$ [mV]	$\Delta U$ [mV]	$I$ [pA]	$\Delta I$ [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]
1.72	43.00	9200.00	930.00	95.91	4.85
430.86	43.00	5760.00	586.00	75.88	3.86
863.44	43.00	2939.00	303.90	54.20	2.80
1114.99	43.00	1806.00	190.60	42.48	2.24
1286.99	43.00	1172.00	127.20	34.21	1.86
1420.72	43.00	823.00	92.30	28.66	1.61
1567.35	43.00	549.00	64.90	23.40	1.39
1728.60	43.00	337.60	43.76	18.33	1.19
1947.90	43.00	111.60	21.16	10.49	1.01
2167.20	43.00	12.20	11.22	3.27	1.72
4386.00	43.00	1.50	10.15	0.00	0.00

Tabelle A.11: Gemessenen Werte für die Messung bei maximaler Intensität und  $\lambda = 365$  nm. Die Sättigungsspannung liegt bei  $U_G = 1020,00$  mV, daraus folgt  $I_0 = (1,50 \pm 10,15)$  pA.

Parameter	Wert
Steigung $m$ [ $\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$ ]	$-4,00 \times 10^{-2} \pm 1,57 \times 10^{-3}$
Achsenabschnitt $b$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$8,76 \times 10^1 \pm 2,64$
$\chi^2$	11,74
Freiheitsgrade (dof)	8
$\chi^2/\text{dof}$	1,467
Abbremsspannung $U_0$ [mV]	$2190,00 \pm 108,37$

Tabelle A.12: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die Messung bei  $\lambda = 365 \text{ nm}$  mit maximaler Intensität. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

$U$ [mV]	$\Delta U$ [mV]	$I$ [pA]	$\Delta I$ [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]
2.15	43.00	900.00	100.00	29.98	1.67
178.45	43.00	722.00	82.20	26.85	1.53
212.42	43.00	680.00	78.00	26.06	1.50
453.22	43.00	450.00	55.00	21.19	1.30
643.28	43.00	293.80	39.38	17.11	1.15
721.11	43.00	245.00	34.50	15.62	1.10
750.35	43.00	226.90	32.69	15.03	1.09
867.31	43.00	161.20	26.12	12.65	1.03
918.91	43.00	139.50	23.95	11.76	1.02
1063.82	43.00	86.10	18.61	9.22	1.01
1151.11	43.00	63.50	16.35	7.90	1.03
1245.28	43.00	45.80	14.58	6.69	1.09
1298.17	43.00	38.80	13.88	6.14	1.13
1517.47	43.00	14.80	11.48	3.70	1.55
1625.83	43.00	5.10	10.51	2.00	2.63
1763.00	43.00	1.10	10.11	0.00	0.00

Tabelle A.13: Gemessenen Werte für die erste Messung bei  $\lambda = 405 \text{ nm}$ . Die Sättigungsspannung liegt bei  $U_G = 410,00 \text{ mV}$ , daraus folgt  $I_0 = (1,10 \pm 10,11) \text{ pA}$ .

Parameter	Wert
Steigung $m$ [ $\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$ ]	$-1,81 \times 10^{-2} \pm 5,50 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt $b$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$2,90 \times 10^1 \pm 5,21 \times 10^{-1}$
$\chi^2$	5,80
Freiheitsgrade (dof)	13
$\chi^2/\text{dof}$	0,446
Abbremsspannung $U_0$ [mV]	$1602,21 \pm 56,56$

Tabelle A.14: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die erste Messung bei  $\lambda = 405 \text{ nm}$ . Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

$U$ [mV]	$\Delta U$ [mV]	$I$ [pA]	$\Delta I$ [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]
2.15	43.00	914.00	101.40	30.21	1.68
154.80	43.00	740.00	84.00	27.18	1.55
231.77	43.00	665.00	76.50	25.77	1.48
438.60	43.00	464.00	56.40	21.52	1.31
657.47	43.00	286.90	38.69	16.91	1.14
712.08	43.00	250.50	35.05	15.79	1.11
766.26	43.00	215.60	31.56	14.65	1.08
861.29	43.00	164.80	26.48	12.79	1.03
935.25	43.00	230.00	33.00	15.13	1.09
1092.63	43.00	78.80	17.88	8.81	1.01
1174.76	43.00	58.20	15.82	7.56	1.05
1259.90	43.00	24.80	12.48	4.87	1.28
1310.21	43.00	36.50	13.65	5.95	1.15
1484.79	43.00	17.60	11.76	4.06	1.45
1654.64	43.00	3.20	10.32	1.45	3.56
1741.50	43.00	1.10	10.11	0.00	0.00

Tabelle A.15: Gemessenen Werte für die zweite Messung bei  $\lambda = 405$  nm. Die Sättigungsspannung liegt bei  $U_G = 405,00$  mV, daraus folgt  $I_0 = (1,10 \pm 10,11)$  pA.

Parameter	Wert
Steigung $m$ [ $\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$ ]	$-1,83 \times 10^{-2} \pm 8,30 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt $b$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$2,95 \times 10^1 \pm 7,84 \times 10^{-1}$
$\chi^2$	12,92
Freiheitsgrade (dof)	13
$\chi^2/\text{dof}$	0,994
Abbremsspannung $U_0$ [mV]	$1612,02 \pm 84,74$

Tabelle A.16: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die zweite Messung bei  $\lambda = 405$  nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

$U$ [mV]	$\Delta U$ [mV]	$I$ [pA]	$\Delta I$ [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]
2.15	43.00	1107.00	120.70	33.26	1.81
133.73	43.00	901.00	100.10	30.01	1.67
376.25	43.00	537.00	63.70	23.16	1.38
572.76	43.00	313.10	41.31	17.68	1.17
654.03	43.00	236.90	33.69	15.37	1.10
827.75	43.00	126.60	22.66	11.22	1.01
978.25	43.00	68.50	16.85	8.24	1.02
1251.30	43.00	18.80	11.88	4.27	1.39
1440.07	43.00	1.90	10.19	1.14	4.47
1487.37	43.00	0.60	10.06	0.00	0.00

Tabelle A.17: Gemessenen Werte für die erste Messung bei  $\lambda = 463$  nm. Die Sättigungsspannung liegt bei  $U_G = 1487,37$  mV, daraus folgt  $I_0 = (0,60 \pm 10,06)$  pA.

Parameter	Wert
Steigung $m$ [ $\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$ ]	$-2,38 \times 10^{-2} \pm 1,22 \times 10^{-3}$
Achsenabschnitt $b$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$3,18 \times 10^1 \pm 9,47 \times 10^{-1}$
$\chi^2$	6,31
Freiheitsgrade (dof)	7
$\chi^2/\text{dof}$	0,901
Abbremsspannung $U_0$ [mV]	$1336,13 \pm 79,21$

Tabelle A.18: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die erste Messung bei  $\lambda = 463$  nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

$U$ [mV]	$\Delta U$ [mV]	$I$ [pA]	$\Delta I$ [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]
2.15	43.00	1130.00	123.00	33.62	1.83
147.49	43.00	866.00	96.60	29.43	1.64
395.17	43.00	522.00	62.20	22.85	1.36
580.50	43.00	307.40	40.74	17.53	1.16
654.03	43.00	242.80	34.28	15.58	1.10
819.58	43.00	130.00	23.00	11.40	1.01
976.10	43.00	68.80	16.88	8.29	1.02
1235.82	43.00	21.10	12.11	4.59	1.32
1415.56	43.00	2.80	10.28	1.67	3.08
1502.42	43.00	0.01	10.00	0.00	0.00

Tabelle A.19: Gemessenen Werte für die zweite Messung bei  $\lambda = 463$  nm. Die Sättigungsspannung liegt bei  $U_G = 1502,42$  mV, daraus folgt  $I_0 = (0,01 \pm 10,00)$  pA.

Parameter	Wert
Steigung $m$ [ $\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$ ]	$-2,36 \times 10^{-2} \pm 1,26 \times 10^{-3}$
Achsenabschnitt $b$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$3,18 \times 10^1 \pm 9,94 \times 10^{-1}$
$\chi^2$	6,97
Freiheitsgrade (dof)	7
$\chi^2/\text{dof}$	0,995
Abbremsspannung $U_0$ [mV]	$1347,46 \pm 83,36$

Tabelle A.20: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die zweite Messung bei  $\lambda = 463$  nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

$U$ [mV]	$\Delta U$ [mV]	$I$ [pA]	$\Delta I$ [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]
2.15	43.00	57.00	5.80	7.55	0.38
140.61	43.00	21.55	2.25	4.64	0.24
53.32	43.00	39.00	4.00	6.24	0.32
227.47	43.00	11.65	1.26	3.40	0.19
300.57	43.00	6.77	0.78	2.59	0.15
259.72	43.00	9.49	1.05	3.07	0.17
443.76	43.00	2.13	0.31	1.44	0.11
562.01	43.00	0.78	0.18	0.85	0.11
648.44	43.00	0.14	0.11	0.28	0.21
698.32	43.00	0.06	0.11	0.00	0.00

Tabelle A.21: Gemessenen Werte für die erste Messung bei  $\lambda = 546$  nm. Die Sättigungsspannung liegt bei  $U_G = 698,32$  mV, daraus folgt  $I_0 = (0,06 \pm 0,11)$  pA.

Parameter	Wert
Steigung $m$ [ $\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$ ]	$-9,06 \times 10^{-3} \pm 9,59 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt $b$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$5,71 \pm 4,14 \times 10^{-1}$
$\chi^2$	60,11
Freiheitsgrade (dof)	7
$\chi^2/\text{dof}$	8,587
Abbremsspannung $U_0$ [mV]	$630,24 \pm 80,86$

Tabelle A.22: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die erste Messung bei  $\lambda = 546$  nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

$U$ [mV]	$\Delta U$ [mV]	$I$ [pA]	$\Delta I$ [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]
2.15	43.00	53.90	5.49	7.34	0.37
124.70	43.00	24.44	2.54	4.94	0.26
39.13	43.00	42.30	4.33	6.50	0.33
219.30	43.00	12.06	1.31	3.47	0.19
265.31	43.00	8.74	0.97	2.96	0.16
308.74	43.00	6.45	0.74	2.54	0.15
434.30	43.00	2.42	0.34	1.56	0.11
553.41	43.00	0.82	0.18	0.91	0.10
648.44	43.00	0.18	0.12	0.43	0.14
682.41	43.00	0.00	0.10	0.00	0.00

Tabelle A.23: Gemessenen Werte für die zweite Messung bei  $\lambda = 546$  nm. Die Sättigungsspannung liegt bei  $U_G = 682,41$  mV, daraus folgt  $I_0 = (0,00 \pm 0,10)$  pA.

Parameter	Wert
Steigung $m$ [ $\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$ ]	$-8,65 \times 10^{-3} \pm 9,51 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt $b$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$5,60 \pm 4,28 \times 10^{-1}$
$\chi^2$	69,41
Freiheitsgrade (dof)	7
$\chi^2/\text{dof}$	9,915
Abbremsspannung $U_0$ [mV]	$647,40 \pm 86,69$

Tabelle A.24: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die zweite Messung bei  $\lambda = 546$  nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

$U$ [mV]	$\Delta U$ [mV]	$I$ [pA]	$\Delta I$ [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]
2.15	43.00	6.44	0.74	2.54	0.15
46.01	43.00	4.06	0.51	2.01	0.13
92.88	43.00	2.88	0.39	1.70	0.11
133.73	43.00	2.17	0.32	1.47	0.11
170.28	43.00	1.69	0.27	1.30	0.10
236.07	43.00	1.17	0.22	1.08	0.10
267.03	43.00	0.83	0.18	0.91	0.10
315.19	43.00	0.56	0.16	0.75	0.10
353.46	43.00	0.40	0.14	0.63	0.11
515.14	43.00	0.00	0.10	0.00	0.00

Tabelle A.25: Gemessenen Werte für die erste Messung bei  $\lambda = 578$  nm. Die Sättigungsspannung liegt bei  $U_G = 515,14$  mV, daraus folgt  $I_0 = (0,00 \pm 0,10)$  pA.



Parameter	Wert
Steigung $m$ [ $\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$ ]	$-4,81 \times 10^{-3} \pm 3,82 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt $b$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$2,22 \pm 8,54 \times 10^{-2}$
$\chi^2$	8,54
Freiheitsgrade (dof)	7
$\chi^2/\text{dof}$	1,219
Abbremsspannung $U_0$ [mV]	$461,54 \pm 40,73$

Tabelle A.26: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die erste Messung bei  $\lambda = 578 \text{ nm}$ . Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

$U$ [mV]	$\Delta U$ [mV]	$I$ [pA]	$\Delta I$ [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]
2.15	43.00	5.65	0.67	2.37	0.14
43.86	43.00	4.06	0.51	2.01	0.13
101.48	43.00	2.77	0.38	1.66	0.11
127.28	43.00	2.25	0.33	1.49	0.11
170.28	43.00	1.70	0.27	1.29	0.10
217.15	43.00	1.23	0.22	1.10	0.10
261.44	43.00	0.84	0.18	0.91	0.10
299.28	43.00	0.64	0.16	0.78	0.10
357.76	43.00	0.38	0.14	0.59	0.12
501.38	43.00	0.02	0.10	0.00	0.00

Tabelle A.27: Gemessenen Werte für die zweite Messung bei  $\lambda = 578 \text{ nm}$ . Die Sättigungsspannung liegt bei  $U_G = 501,38 \text{ mV}$ , daraus folgt  $I_0 = (0,02 \pm 0,10) \text{ pA}$ .

Parameter	Wert
Steigung $m$ [ $\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$ ]	$-4,77 \times 10^{-3} \pm 2,95 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt $b$ [ $\sqrt{\text{pA}}$ ]	$2,18 \pm 6,37 \times 10^{-2}$
$\chi^2$	4,80
Freiheitsgrade (dof)	7
$\chi^2/\text{dof}$	0,685
Abbremsspannung $U_0$ [mV]	$457,02 \pm 31,26$

Tabelle A.28: Ergebnisse des gewichteten linearen  $\chi^2$ -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

## Balmer-Serie

Spektrallinie Hg							
$\omega_B$ [°]	$\Delta\omega_B$ [°]	Spektrallinien	$\omega_G$ [°]	$\Delta\omega_G$ [°]	Farbe	Dicke $d$ [Skt]	$\Delta d$ [Skt]
145,0	0,5		48,0	0,5	violett	4	1
145,0	0,5		49,0	0,5	violett	2	1
145,0	0,5		49,5	0,5	violett	2	1
145,0	0,5		50,5	0,5	violett/blau	3	1
145,0	0,5		51,0	0,5	violett/blau	3	1
145,0	0,5		51,0	0,5	blau	4	1
145,0	0,5		55,5	0,5	türkis	1	0,1
145,0	0,5		61,0	0,5	grün	3	1
145,0	0,5		64,0	0,5	gelb	5	1
145,0	0,5		64,5	0,5	gelb	5	1
145,0	0,5		69,0	0,5	rot	5	1
135,0	0,5		68,0	0,5	grün	8	1
135,0	0,5		71,0	0,5	gelb	10	1
135,0	0,5		71,5	0,5	gelb	11	1
155,0	0,5		61,0	0,5	rot	1	0,1
155,0	0,5		61,5	0,5	rot	1	0,1
155,0	0,5		62,5	0,5	rot	2	1

Tabelle A.29: Spektrallinien der Hg-Dampfampe 1. Ordnung, gemessen an den Winkelpositionen und beobachteter Farbe. Hierbei ist  $d$  die Dicke der Spektrallinien (in Strichpunkten),  $\omega_B$  der Winkel der optischen Bank und  $\omega_G$  der Winkel des Gitters.

Spektrallinie H/Deuterium							
$\omega_B$ [°]	$\Delta\omega_B$ [°]	Spektrallinien	$\omega_G$ [°]	$\Delta\omega_G$ [°]	Farbe	$d$ [Skt]	$\Delta d$ [Skt]
145,0	0,5		51,0	0,5	violett	3	1
145,0	0,5		55,5	0,5	türkis	1	0,1
155,0	0,5		61,5	0,5	rot	1	0,1

Tabelle A.30: Spektrallinien der H/Deuterium-Lampe in erster Ordnung. Hierbei ist  $d$  die Dicke der Spektrallinien (in Strichpunkten),  $\omega_B$  der Winkel der Blende und  $\omega_G$  der Beugungswinkel.