

VERSUCH NUMMER 500

Der Photoeffekt

Irgendjemand

irgend.jemand@tu-dortmund.de

Someone

some.one@tu-dortmund.de

Durchführung: 05.04.2022

Abgabe: 12.04.2022

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	1
2 Theoretische Grundlagen	1
2.1 Korpuskularmodell	1
2.2 Photozelle	2
2.3 Messschwierigkeiten	2
3 Versuchsaufbau und Durchführung	3
4 Auswertung	5
4.1 Messwerte und Darstellungen	5
5 Diskussion	14
Literatur	15

1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es den Photoeffekt quantitativ zu untersuchen. Dabei werden unter anderem Zusammenhänge zwischen Wellenlänge und Energie der emittierten Elektronen betrachtet.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Korpuskularmodell

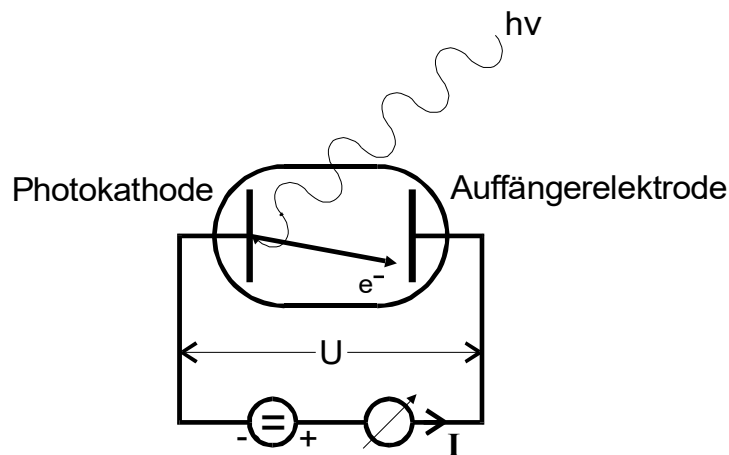


Abbildung 1: Prinzipielle Anordnung zur Untersuchung des Photoeffektes [1]

In Abbildung 1 ist eine prinzipielle Anordnung des Versuchsaufbaus dargestellt. Dabei lassen sich die hier auftretenden qualitativen Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Die Anzahl an ausgelösten Elektronen pro Zeitintervall ist proportional zur Intensität des auf die Photokathode gerichteten Lichtes
- Die Energie der einzelnen Elektronen ist proportional zur Lichtfrequenz
- Es gibt eine Grenzfrequenz, unterhalb welcher kein Photoeffekt auftritt

Diese Ergebnisse lassen sich alle über das einsteinsche Korpuskularmodell erklären. Entsprechend wird dieses Modell bei diesem Versuch verwendet. Bei diesem Modell gilt, dass die Energie des Strahlungsfeldes über verschwindend kleine **Lichtquanten** (auch **Photonen** genannt) im Raum transportiert wird. Nach Einstein entsprechen diese den PLANCKschen Energiequanten. Somit gilt also

1. Monochromatisches Licht der Frequenz f besteht aus Lichtquanten, welche sich mit der Lichtgeschwindigkeit c fortbewegen. Sie besitzen die Energie $E_{ph} = h \cdot f$
2. Je ein Photon überträgt seine Energie direkt auf ein Elektron

Dabei gilt allerdings, dass das Elektron nicht die gesamte Energie des Photons als kinetische Energie erhält. Ein Teil der Energie verrichtet die sogenannte **Austrittsarbeit** A_k . Diese beschreibt die Energie die benötigt wird um ein Elektron aus einem Festkörper zu lösen. So ergibt sich die Energiebilanz

$$h \cdot f = E_{kin} + A_k \quad (1)$$

Wobei h hier dem Plankschen Wirkungsquantum entspricht.

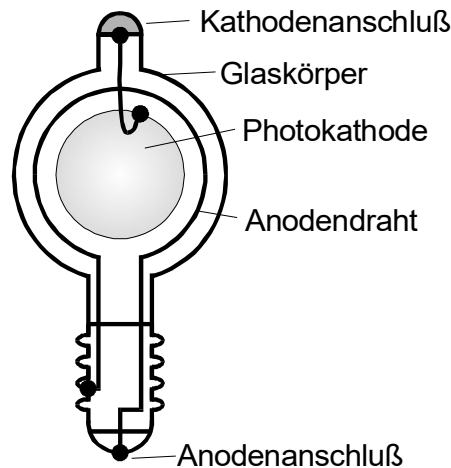


Abbildung 2: Schematische Darstellung der verwendeten Photozelle [1]

2.2 Photozelle

Die Auslösungen der Photoelektronen aus einem Festkörper geschieht in diesem Versuch in einer Photozelle wie sie in Abbildung 2 dargestellt ist. Dabei wird die sogenannte Photokathode über eine auf der Innenseite eines Glaskolbens aufgedampfte Metal- oder Legierungsschicht realisiert. Die Anode ist ein kreisförmiger Draht, der parallel einige Millimeter von der Kathode entfernt angebracht ist. Beim Versuch wird dann an die Kathoden-Anoden-Strecke eine variable Spannung U angelegt, welche ein elektrisches Feld erzeugt, dass die Photoelektronen abbremst. Dabei lässt sich ein Strom zwischen Kathode und Anode messen. Allerdings muss dafür die kinetische Energie der Photoelektronen größer sein als $e_0 U$. Gilt also

$$\underbrace{e_0}_{\text{Elementarladung}} U_g = \frac{1}{2} \underbrace{\widetilde{m_0}}_{\text{Ruhemasse des Elektrons}} v_{\max}^2 \quad (2)$$

verschwindet der Strom spätestens. v_{\max} beschreibt hierbei die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen. Entsprechend ergibt sich nach (1) und (2)

$$h \cdot f = e_0 + A_k \quad (3)$$

als Formel für die Energie der schnellsten Elektronen.

2.3 Messschwierigkeiten

Bei der Praktischen Durchführung der quantitativen Messungen treten jedoch einige Probleme auf. So verschwindet der Photostrom bei U_g nicht schlagartig, sondern sinkt bei Spannungen $U < U_g$ bereits merklich ab. Die Kurve hat dabei in etwa die Gestalt der Kurve in Abbildung 3. Diese Erschwerung der Bestimmung von U_g lässt sich dadurch erklären, dass die Photoelektronen eine Energieverteilung besitzen und somit Energien von 0 bis $\frac{1}{2} m_0 v_{\max}^2$ annehmen. Die **Fermi-Dirac-Statistik**, welche eine Aussage über die Energieverteilung von Elektronen in Festkörpern trifft erklärt dies. So besitzen nicht alle Elektronen die gleiche Energie bevor sie von einem Photon ausgelöst werden. Die Energie der Leitungs- und Valenzelektronen haben eine Energie zwischen 0 und der Fermi-Energie ζ , wobei zweitens materialabhängig ist. Hinzu kommt, dass bei endlicher Temperatur eine sehr geringe Zahl von Elektronen eine weitaus größere Energie als ζ aufweisen. Somit gibt es gelegentlich auch Elektronen deren Energie größer ist als $hf - A_k$. Durch Differentiation der Kurve aus Abbildung 3 lässt sich auf die Energieverteilung der Elektronen im Festkörper zurückschließen. Allerdings sind die Ergebnisse verfälscht, da nicht alle Photoelektronen die Anode erreichen, da die Oberfläche dieser viel zu klein ist. Unter bestimmten Voraussetzungen gilt hier folgender Zusammenhang zwischen Photostrom I_{ph} und der Bremspannung U :

$$I_{ph} \propto U^2.$$

Ein weiterer Grund dafür, dass die Photoelektronen von der Kathode die Anode nicht erreichen, kommt vor, wenn die Austrittsarbeit der Anode (hier A_A) sehr hoch ist. Die Potential- bzw. Energieverteilung zwischen Anode und

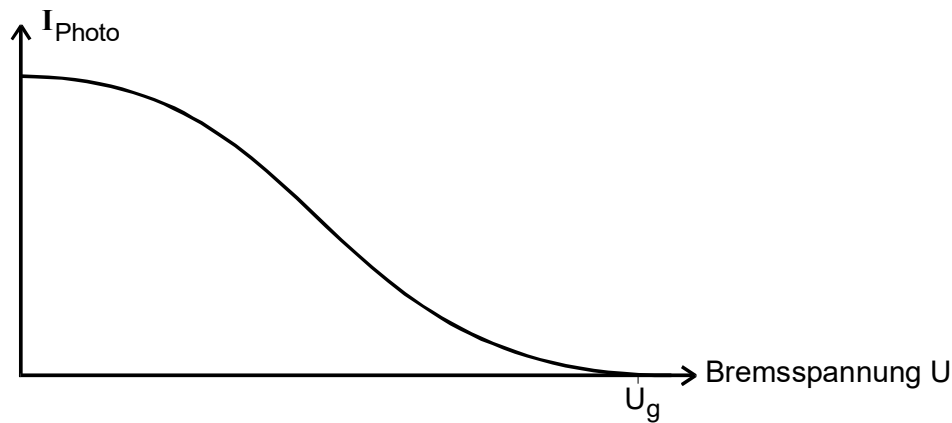


Abbildung 3: Photostrom in Abhängigkeit von der Bremsspannung in einer mit monochromatischem Licht bestrahlten Photozelle [1]

Kathode kann dann die in Abbildung 4 abgebildete Gestalt annehmen. Werden zwei Metalle leitend verbunden, so stellen sich ihre Fermi-Niveaus auf gleiche Höhe ein. In Abbildung 4a ist der Fall dargestellt, in dem $hf > A_K$ gilt, somit ist der Photoeffekt möglich, allerdings müssten die Elektronen aufgrund von $hf < A_A$ gegen ein Gegenfeld anlaufen um die Anode zu erreichen. Es entsteht also kein Photostrom. Ein Photostrom stellt sich erst dann ein, wenn ein beschleunigendes Potential U_b angelegt wird, sodass

$$hf + e_0 U_b \geq A_A$$

gilt. (siehe Abbildung 4b) An der im Experiment verwendeten Photozelle lässt sich ein negativer Strom beobachten,

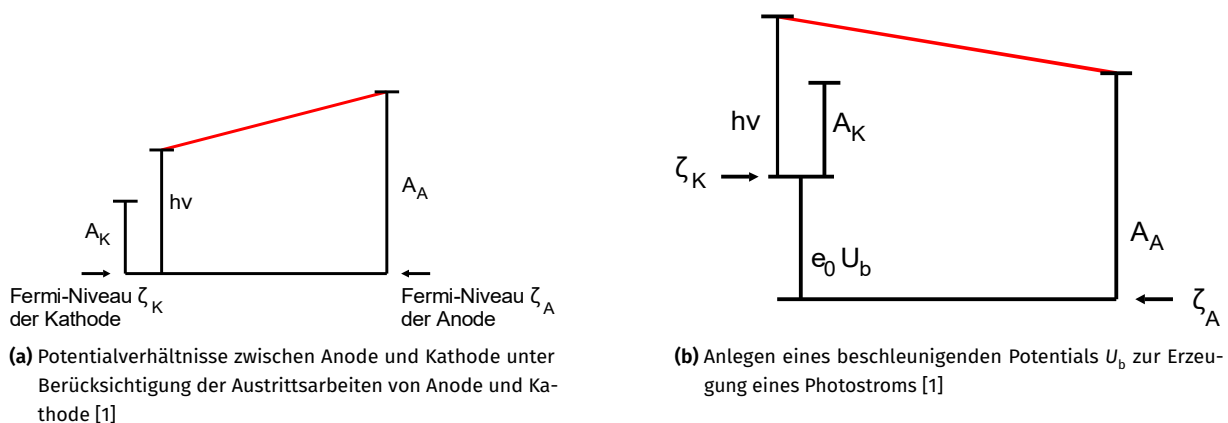


Abbildung 4

wenn die Bremsspannung hinreichend hoch gewählt ist. Dies erschwert die Bestimmung von U_g , da dieser Strom den Photostrom überlagern kann.

3 Versuchsaufbau und Durchführung

Zur Untersuchung des Photoeffektes kann die in Abbildung 5 skizzierte Apparatur verwendet werden. Das Licht der Lampe wird von einer Kondensorlinse gebündelt und fällt auf eine Spaltblende. Die Abbildungslinse wirft dann auf den Eintrittsspalt der Photokathode ein Bild der Spaltblendenöffnung. Das Geradsichtprisma trennt dann die von der Lichtquelle emittierten Spektrallinien räumlich auf, sodass durch Schwenken des Schutzgehäuses verschiedenes monochromatisches Licht auf die Photokathode gelenkt werden kann. Auf der Mattscheibe vor der Photokathode lassen sich entsprechend verschiedenfarbige Bilder der Spaltblende erkennen. Die Energie der ausgelösten Elektronen wird dann mit der Gegenfeldmethode gemessen (siehe Abbildung 6).

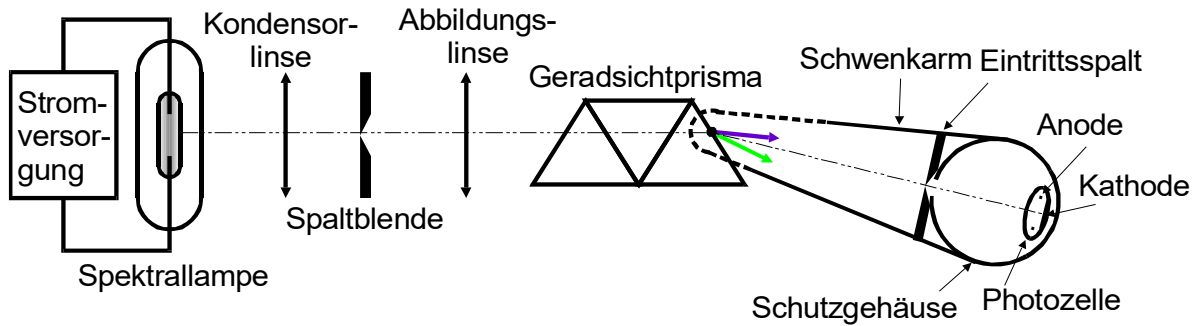


Abbildung 5: Optischer Teil des Versuchsaufbaus [1]

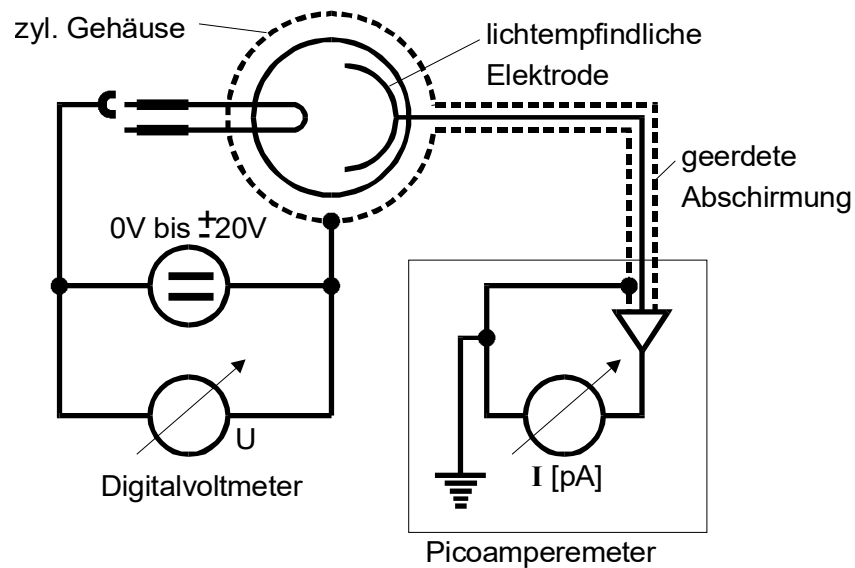


Abbildung 6: Elektrisches Schaltbild der Messapparatur [1]

Bei der Gegenfeldmethode wird eine variable Spannung an die Kathoden-Anoden-Strecke gelegt, die ein elektrisches Feld erzeugt, welches die Photoelektronen bremst. Durch variieren der Spannung lässt sich wie in Abschnitt 2 beschrieben die Energie der Photoelektronen bestimmen.

Zuerst wird für verschiedene Wellenlängen der Photostrom in Abhängigkeit von der Gegenspannung notiert. Danach wird der Photostrom für die Spektrallinie $\lambda = 580 \text{ nm}$ in Abhängigkeit der Spannung zwischen Anode und Kathode gemessen. Dabei soll der Bereich $-20 \text{ V} \leq U \leq 20 \text{ V}$ abgedeckt werden. Es ist auf eine konstante Lichtintensität während der Durchführung zu achten.

4 Auswertung

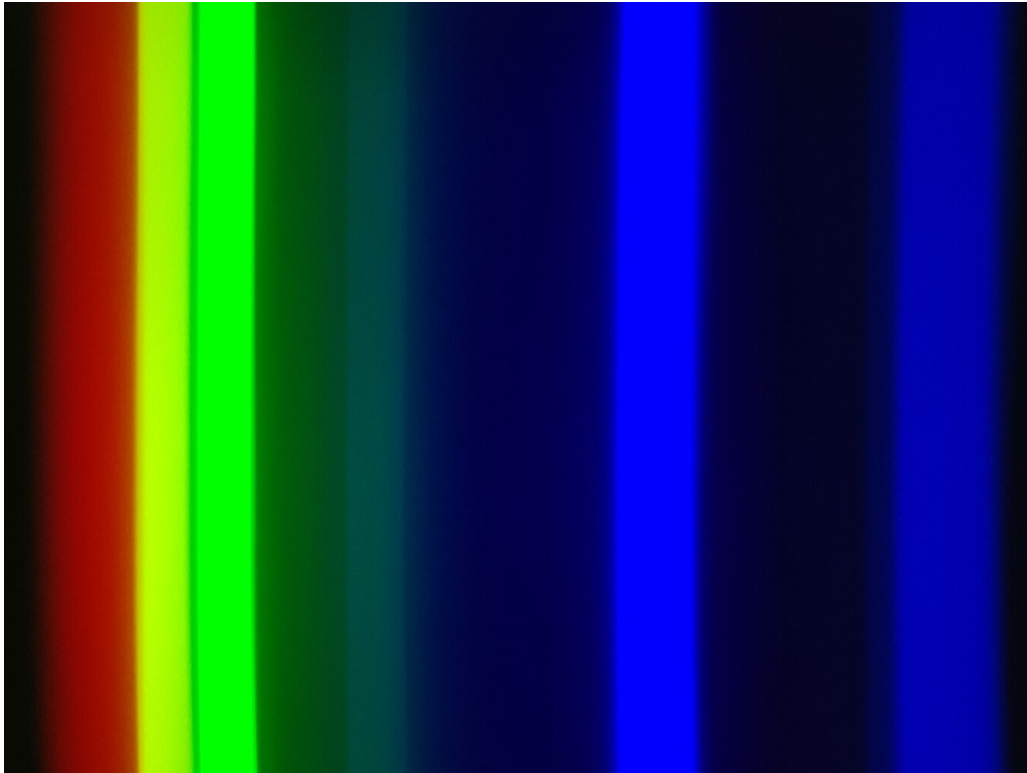


Abbildung 7: Spektrum der HG-Lampe

Zur Bestimmung des Plankschen Wirkungsquantums werden die Messungen zu den verschiedenen Wellenlängen verwendet.

4.1 Messwerte und Darstellungen

Es werden alle gesammelten Daten dargestellt. Dazu wird auch eine lineare Regression verwendet um die Austrittsarbeit bei der $I = 0$ ist zu bestimmen. Die Wellenlänge werden dabei zur Vereinfachung der Benennung einer Farbe zugeordnet. Die Wellenlängen der Farben werden in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Wellenlängen der Lichtfarben [1][2]

λ / nm	Farbe
370	Blau
410	Lila
430	Violett
550	Grün
580	Gelb
610	Rot

Es wird die Wurzel des Photostroms gegen die Spannung aufgetragen um eine lineare Rechnung durchzuführen. Ausgleichsgraden lassen sich wie folgt berechnen:

$$y = m \cdot x + b \quad (4a)$$

$$m = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \quad (4b)$$

$$b = \frac{\overline{x^2} \cdot \bar{y} - \bar{x} \cdot \overline{xy}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}. \quad (4c)$$

Bei der Angabe des Endergebnisses werden schließlich alle statistischen Teilfehler addiert. Alle Berechnungen, Graphen sowie das Bestimmen der Unsicherheiten werden mit Python 3.8.8 und entsprechenden Bibliotheken¹ durchgeführt. Es wird also am Beispiel des gelben Lichts das vorgehen dargestellt. Die Daten des gelben Lichts sind in Tabelle 2 wiedergegeben

¹Numpy [3], Uncertainties [4] and Matplotlib [5]

Tabelle 2: Messdaten des gelben Lichts

U / V	I_{ph} / pA
-0,41	0
-0,31	9,0
-0,26	22
-0,16	66
-0,11	110
-0,060	150
-0,010	210
0,050	260
0,10	310
0,15	360
0,20	420
0,25	470
0,30	530
0,35	590
0,40	650
0,45	700
0,50	750
1,0	1200
1,5	1500
2,0	1700
2,5	2000
3,0	2200
3,5	2400
4,0	2500
4,5	2700
5,0	2800
6,0	2900
7,0	3000
8,0	3200
9,0	3400
10	3500
11	3600
12	3700
13	3800
14	3800
15	3800
19	3900

und in Abbildung 8 dargestellt. Dabei wird wie erwähnt die Wurzel des Stroms I_{ph} gegen die gemessene Spannung U aufgetragen.

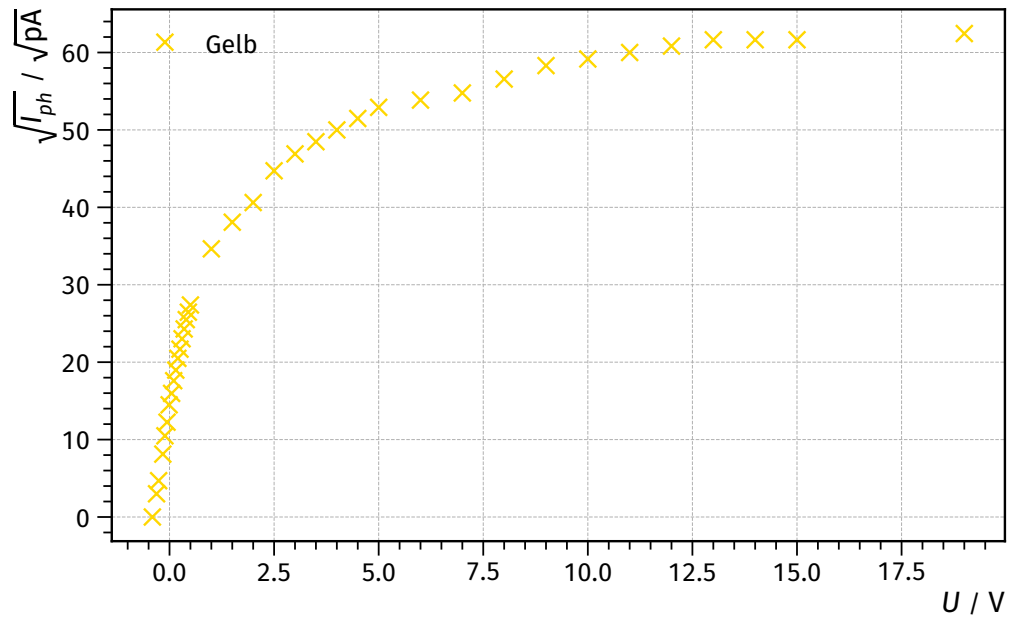


Abbildung 8: Messwerte des gelben Lichts

Zur Ausgleichsrechnung wird nur der lineare Teil der Kurve verwendet.

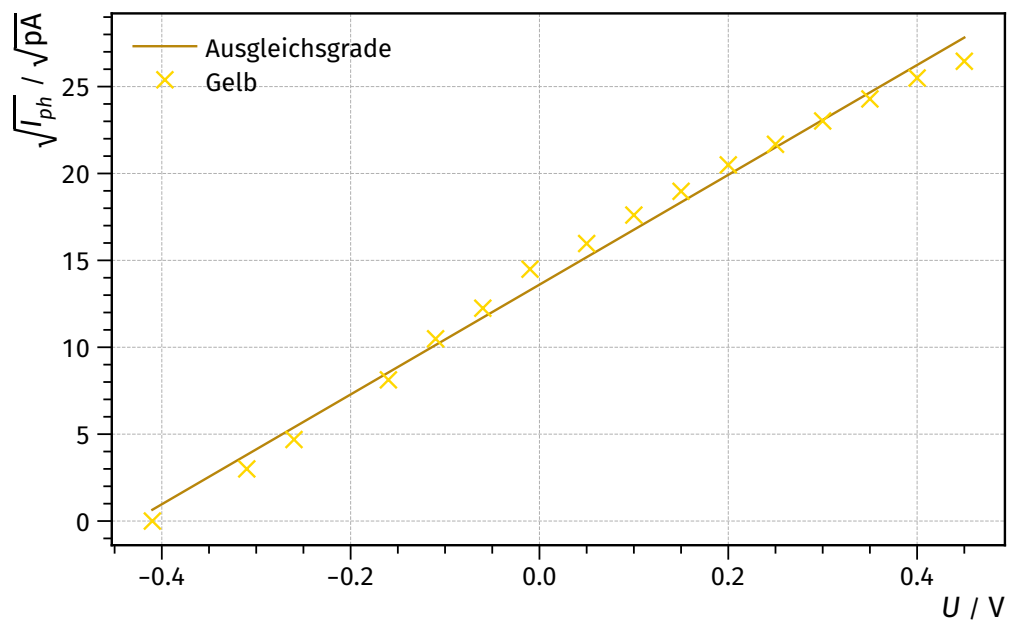


Abbildung 9: Messwerte des gelben Lichts im Bereich in dem eine Grade zu erkennen ist mit Ausgleichsgrade

So können wie beschrieben die Werte verwendet werden um die Parameter m und b der Geradengleichung zu bestimmen. Mit diesen wird dann der Schnittpunkt der Graden mit der U -Achse bestimmt. Diese Grenzspannung wird als U_g bezeichnet. Für die weiteren Daten wird genauso vorgegangen.

Tabelle 3: Messdaten von Licht verschiedener Wellenlängen

(a) Grün		(b) Violett		(c) Lila		(d) Blau	
U / V	I_{ph} / pA	U / V	I_{ph} / pA	U / V	I_{ph} / pA	U / V	I_{ph} / pA
-0,51	0	-1,1	0	-1,3	0	-1,4	0
-0,45	6,0	-1,0	8,0	-1,2	4,0	-1,3	20
-0,40	15	-0,90	19	-1,1	12	-1,2	30
-0,35	33	-0,80	40	-1,0	22	-1,1	40
-0,30	65	-0,70	88	-0,90	40	-1,0	50
-0,25	110	-0,60	140	-0,80	73	-0,90	90
-0,20	180	-0,50	230	-0,70	110	-0,80	130
-0,15	270	-0,40	260	-0,60	150	-0,70	150
-0,10	330	-0,30	320	-0,50	250	-0,60	200
-0,050	430	-0,20	500	-0,40	380	-0,50	240
0,00	510	-0,10	600	-0,30	360	-0,40	340
		0,00	720	-0,20	420	-0,30	360
				-0,10	500	-0,20	390
				0,00	570	-0,10	420
						0,00	500

U / V	I_{ph} / pA
-0,32	0
-0,25	1,0
-0,20	2,0
-0,15	2,0
-0,10	3,0
-0,050	4,0
0,00	4,0

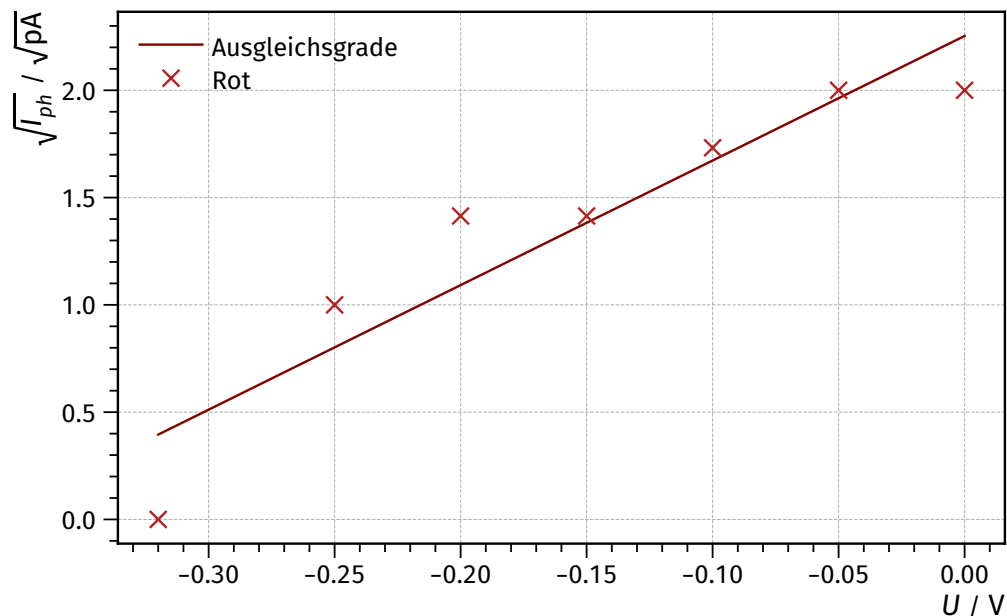


Abbildung 10: Messwerte des roten Lichts

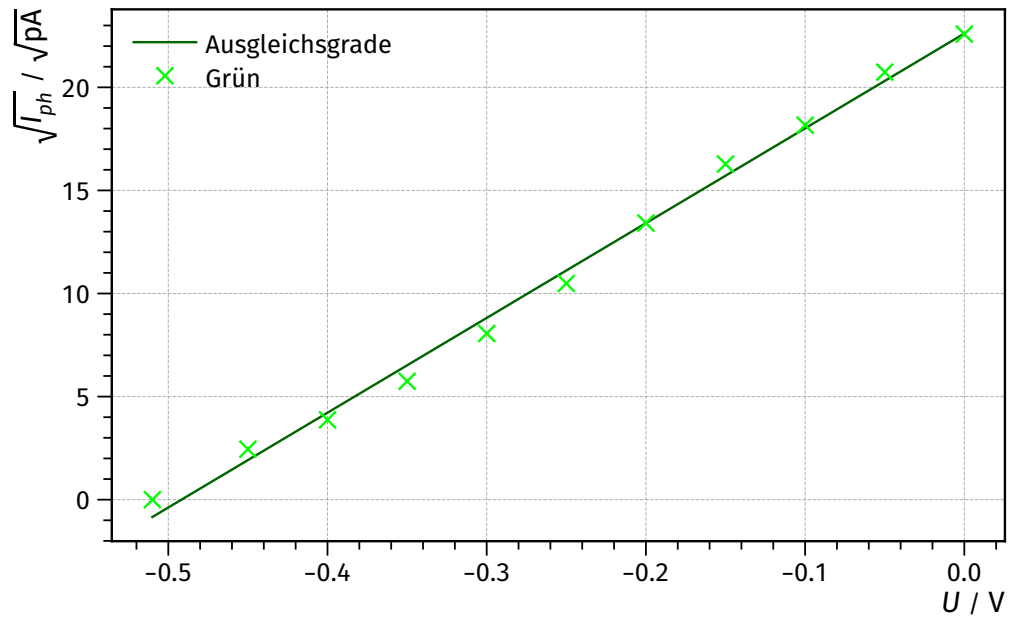


Abbildung 11: Messwerte des grünen Lichts mit Ausgleichsgrade

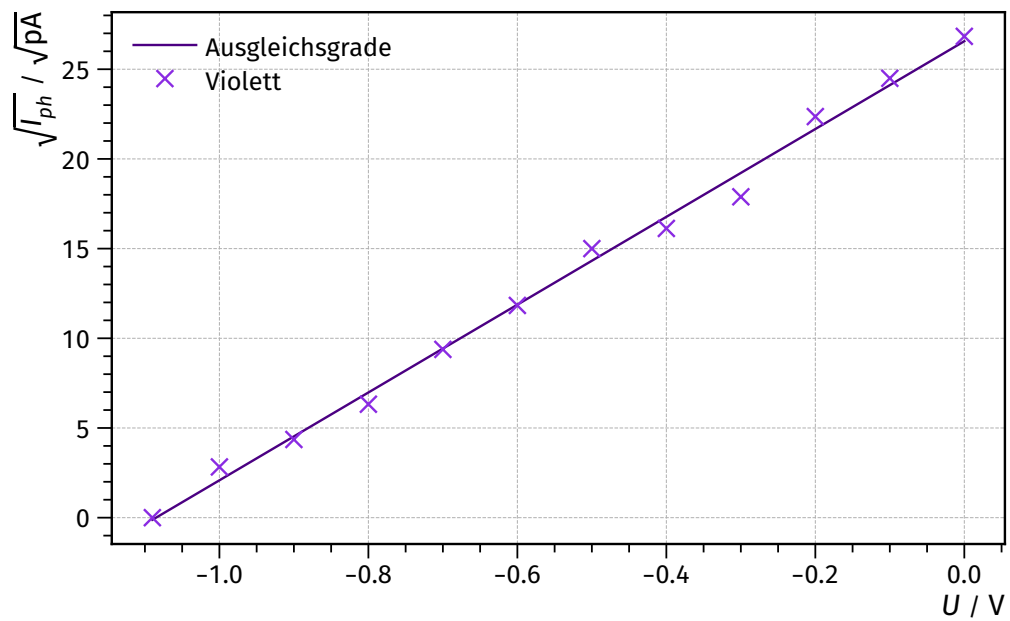


Abbildung 12: Messwerte des violetten Lichts mit Ausgleichsgrade

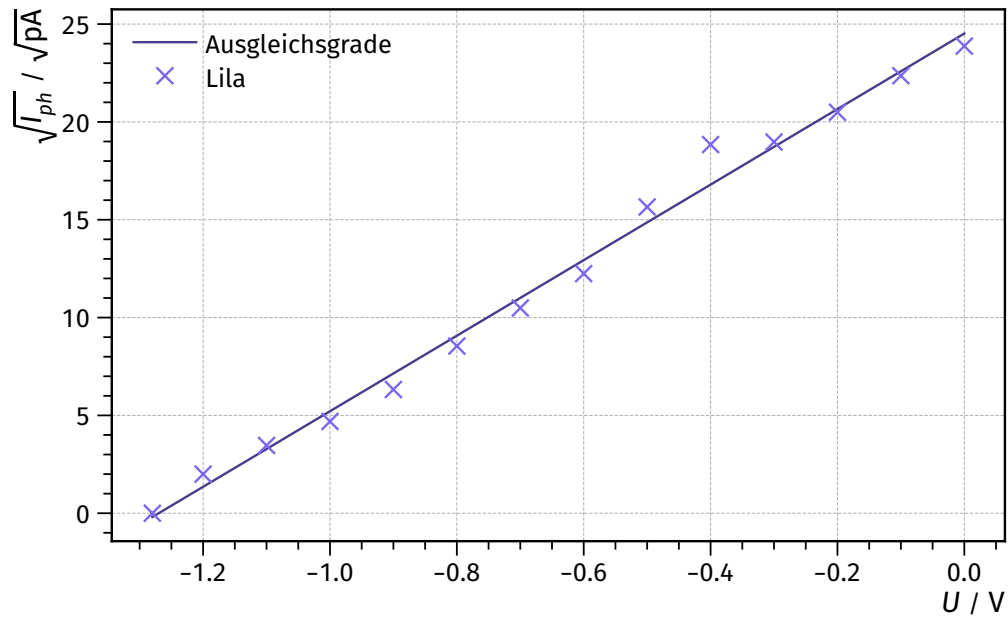


Abbildung 13: Messwerte des lila Lichts mit Ausgleichsgrade

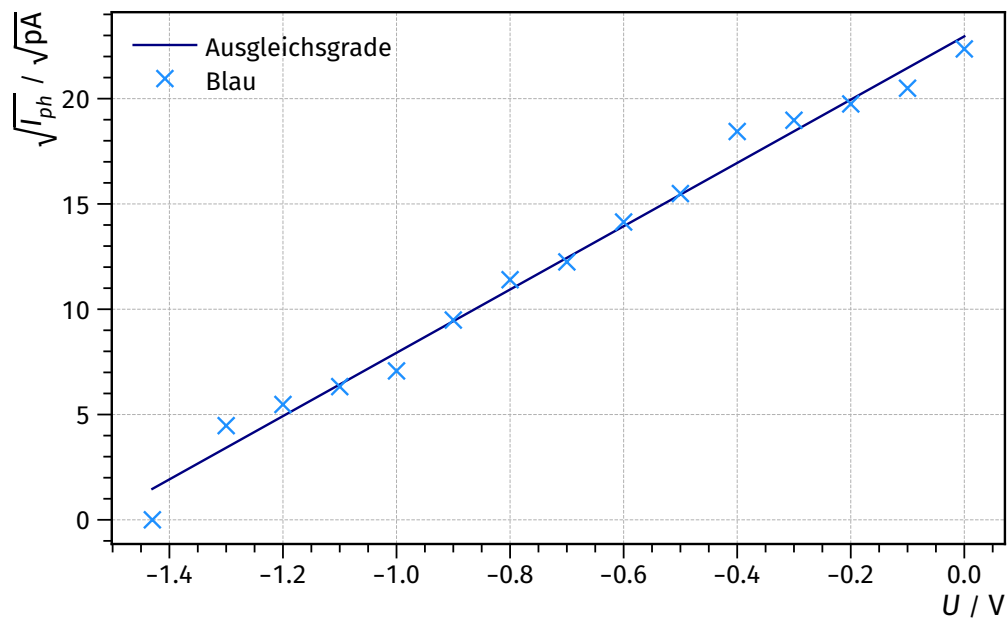


Abbildung 14: Messwerte des blauen Lichts mit Ausgleichsgrade

Die ermittelten Werte werden in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Daten der Ausgleichsrechnung

Farbe	$m / \sqrt{pA}/V$	b / V
Rot	$5,8 \pm 1,0$	$2,25 \pm 0,18$
Gelb	$36,4 \pm 1,1$	$14,43 \pm 0,25$
Grün	$46,0 \pm 1,1$	$22,61 \pm 0,33$
Violett	$24,5 \pm 0,6$	$26,6 \pm 0,4$
Lila	$19,3 \pm 0,5$	$24,5 \pm 0,4$
Blau	$15,0 \pm 0,5$	$23,0 \pm 0,4$

Damit die Grenzspannung bestimmt werden kann muss der Fehler besonders berechnet werden.
Alle Mittelwerte einer N -fach gemessenen Größe x werden über die Formel

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (5)$$

berechnet. Der zugehörige Fehler des Messwertes berechnet sich dann über

$$\Delta \bar{x} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (6)$$

Setzt sich eine zu berechnende Größe aus mehreren mit Unsicherheit behafteten Messwerten zusammen, so ist die Unsicherheit dieser Größe über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung gegeben

$$\Delta f(x_1, \dots, x_N) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (\Delta x_i)^2 \right]}. \quad (7)$$

Das bedeutet es ergibt sich für die Grenzspannungen die Werte in Tabelle 5.

Tabelle 5: Daten

Farbe	U_g / V
Rot	$0,39 \pm 0,07$
Gelb	$0,397 \pm 0,014$
Grün	$0,492 \pm 0,014$
Violett	$1,085 \pm 0,029$
Lila	$1,27 \pm 0,04$
Blau	$1,53 \pm 0,06$

Diese werden wiederum in Abbildung 15 dargestellt. Die Grenzspannungen werden gegen die Frequenz $f = c/\lambda$ aufgetragen. Auch bei diesen Daten wird eine Ausgleichsgerade bestimmt.

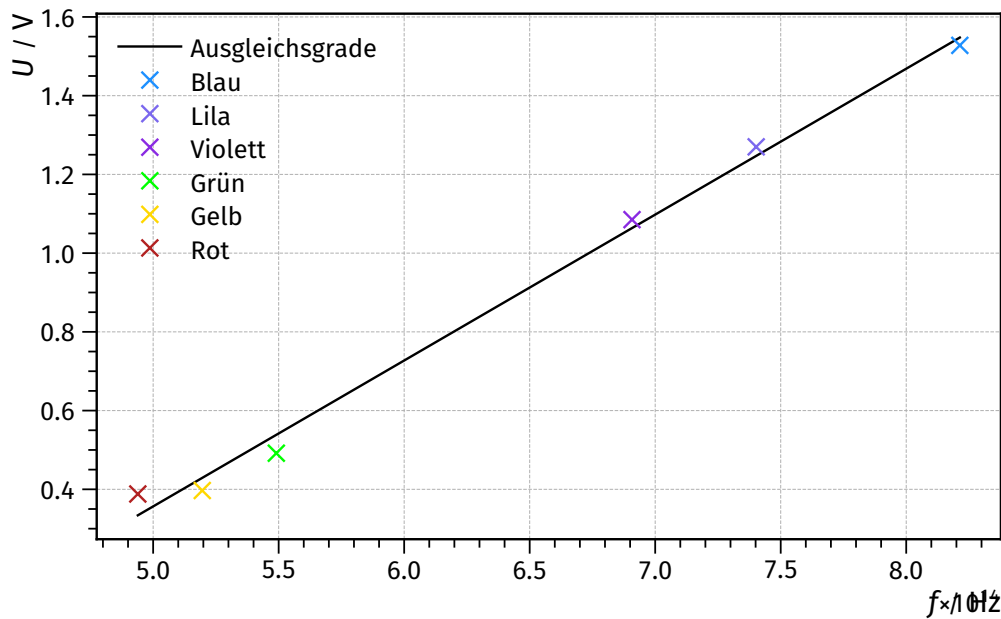


Abbildung 15: Alle Farben

Wie Parameter m und b können so bestimmt werden. m entspricht nach der Theorie dem Wert h/e_0 mit dem Plankschen Wirkungsquantum h und der Elementarladung e_0 . b beschreibt die Austrittsarbeit der Photozelle. Es werden so

$$\frac{h}{e_0} = m = (3,71 \pm 0,15) \cdot 10^{-15} \frac{\text{Vs}}{\text{C}}$$

und

$$b = (-1,50 \pm 0,09) \text{ V}$$

bestimmt.

Wichtige Eigenschaften des Photostroms

Die Kurve des Stroms I_{ph} wird in Abbildung 16 dargestellt.

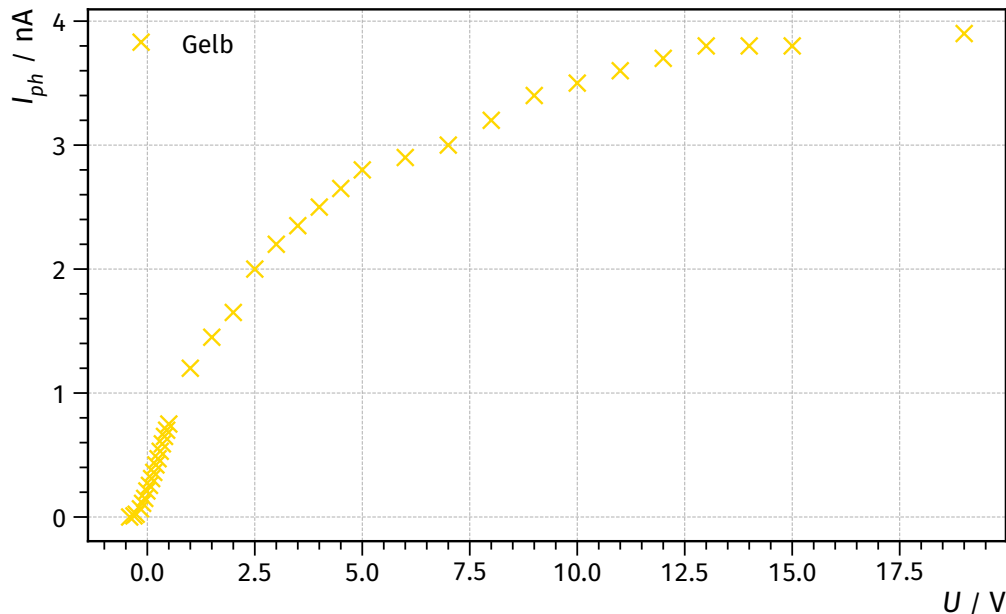


Abbildung 16: Messwerte des gelben Lichts

An diesem Verlauf sind einige wichtige Eigenschaften zu beachten. Es fällt auf, dass der Photostrom für große Spannungen einen Sättigungswert anstrebt, auch wenn dieser nicht ganz erreicht wird. Dies liegt daran, dass die Menge der aus der Kathode ausgelösten Elektronen proportional zur Intensität des Lichts ist. Bei Erhöhung der Spannung werden trotzdem die gleiche Anzahl an Elektronen ausgelöst, und es können keine weiteren Elektronen zur Anode gelangen. Trotzdem wird dieser Wert nur asymptotisch angenähert. Nicht alle Elektronen treffen auf die Anode, da sie in der Kathode bereits einen weiten Bereich von Energie besitzen. Der Sättigungswert ist vor allem durch die Fläche der Anode und die Intensität des Lichts bestimmt. Um den Sättigungswert tatsächlich zu erreichen, müsste die Anode eine so große Fläche besitzen, dass keine Elektronen verloren gehen. Es ist auch zu beobachten, dass der Strom schon für $U < U_g$ abfällt. Dies ist auch damit zu erklären, dass die Elektronen ein Spektrum von Energien haben können. So gibt es manche mit weniger Energie, die also bereits vor U_g nicht mehr ankommen. In bestimmten Situationen ist ein negativer Strom messbar. Dies ist möglich, da das Material der Kathode auch bei geringen Temperaturen bereits abgast. Dies verursacht den Transport von positiven Ladungen (Atomkerne) aus dem Kathodenmaterial. Dieser Strom überlagert sich mit dem Photostrom und kann ihn sogar übertrumpfen. Für große Austrittsarbeiten ist so auch bei geringen Photonenenergien schon ein negativer Strom zu beobachten. Auch kann so schnell ein Sättigungswert praktisch erreicht werden, da der negative Strom die Elektronen am Überqueren der Trennschicht hindert.

5 Diskussion

Zum Vergleichen der Werte werden die Literaturangaben [6, S. 577]

$$h_{lit} = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ V s}$$

$$e_{lit} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

und damit

$$\frac{h_{lit}}{e_{lit}} = 4,1 \cdot 10^{-15} \frac{\text{V s}}{\text{C}}$$

verwendet. Die relative Abweichung beträgt $(10,4 \pm 3,5) \%$. Der Fehler kommt vermutlich aus der Abweichung der Intensität des Lichts. Die Photozelle kann leicht ihre Position ändern, wenn der Tisch wackelt oder der Aufbau berührt wird. Dazu kommt, dass das Ablesen des Picoamperemeters oft Probleme macht. Es können leicht schwankende Ströme festgestellt werden, die die Messgenauigkeit beeinflussen. Auch war es oft der Fall, dass sich der Wert am

Picoamperemeters schlagartig ändert und die Spannung an der Photozelle einmal aus und eingeschaltet werden musste. Dies war vor allem bei geringen Photonenenergien der Fall. Des weiteren konnte nicht versichert werden das nur das Licht der Lampe in die Photozelle gelangt. Der Raum konnte nicht perfekt abgeschirmt werden und etwas Licht ist nötig um Werte abzulesen und aufzuschreiben. Insgesamt konnte der Versuch durchaus gut die Konstante $\frac{h}{e_0}$ bestimmen.

Literatur

- [1] Versuch Nr. 500. Der Photoeffekt. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.
- [2] Spektrum der Hg-Spektrallampe. FU Berlin. URL: https://www.physik.fu-berlin.de/studium/lehre/gp/dateien/skripte/NP_Skripte/NP_Optik/OPS_Linien_A4p.pdf (besucht am 11.04.2022).
- [3] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: Computing in Science & Engineering 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [4] Eric O. Lebigot. Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [5] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: Computing in Science & Engineering 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [6] J. Krause J. Grehn. Metzler Physik. 4. Aufl. Braunschweig: Bildunghaus Schulbuchverlage, 2007. ISBN: 978-3-507-10710-6.