

V500

Der Photo-Effekt

Lukas Rolf

lukas.rolf@tu-dortmund.de

Yannik Brune

yannik.brune@tu-dortmund.de

Durchführung: 25.04.2017

Abgabe: 02.05.2017

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Der photoelektrische Effekt und seine Erklärung mithilfe der Korpuskeltheorie	3
3 Aufbau	4
4 Durchführung	5
5 Auswertung	5
5.1 Bestimmung der Grenzspannungen für die verschiedenen Wellenlängen . .	6
5.2 Näherung der Austrittsenergie aus der Kathode und des Verhältnisses vom Planckschem Wirkungsquantum zur Elementarladung	14
5.3 Untersuchung des Photostromes in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die gelbe Spektrallinie	14
6 Diskussion	15
Literatur	16

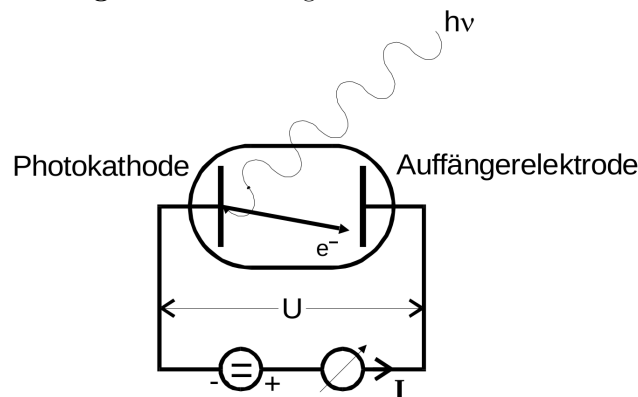
1 Zielsetzung

Es soll eine quantitative Untersuchung des photoelektrischen Effektes durchgeführt werden. Hierzu wird die kinetische Energie von Photonen einzelner Linien des Quecksilberspektrums betrachtet.

2 Theorie

2.1 Der photoelektrische Effekt und seine Erklärung mithilfe der Korpuskeltheorie

Abbildung 1: Die Schaltung einer theoretischen Photodiode.



Wird die Photokathode eines Photodiodenaufbaus wie in Abb. 1 mit monochromatischem Licht bestrahlt kann ein Strom gemessen werden. Dieser Effekt wird lichtelektrischer Effekt genannt und weist mehrere Eigenschaften auf, welche mit dem klassischen Wellenbild des Lichtes nicht erklärt werden können.

- Die Anzahl der aus dem Festkörper ausgelösten Elektronen verläuft proportional zur Intensität des Lichtes.
- die Energie der Photoelektronen ist unabhängig von der Intensität des Lichtes, verläuft jedoch proportional zu deren Frequenz.
- Unterhalb einer gewissen Lichtfrequenz f_g tritt der Photoeffekt nicht mehr auf

Alle Punkte lassen sich mit der Vorstellung erklären, dass das Licht aus einzelnen Lichtteilchen den Photonen besteht. Sie entsprechen den Planckschen Energiequanten, für welche gilt:

- Monochromatisches Licht mit der Frequenz f besteht aus Photonen, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen und die Energie

$$E = h \cdot f \quad (1)$$

besitzen.

- Trifft ein Photon auf ein Elektron überträgt es seine gesamte Energie. Ist diese größer als die benötigte Austrittsenergie A_k verlässt dieses die Festkörperoberfläche mit der kinetischen Energie E_{kin} . Damit folgt:

$$hf = E_{\text{kin}} + A_k. \quad (2)$$

Zusätzlich besitzen die Elektronen jedoch bereits eine gewisse Energie. Die Wahrscheinlichkeit, mit welcher ein solches Energielevel auftritt wird über die Fermi-Dirac-Verteilung beschrieben. Deswegen kommt es bei der Grenzgegenspannung U_g nicht zu einem plötzlichen Einbruch der Stromstärke, sondern zu einem bereits vorher eintretenden abflachen.

3 Aufbau

Abbildung 2: Die Darstellung einer realen Photodiode.

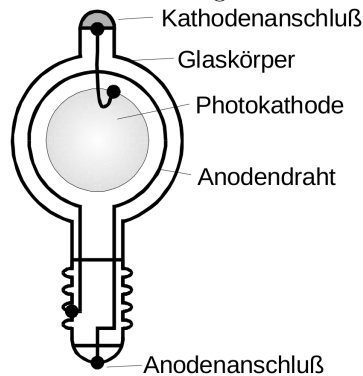
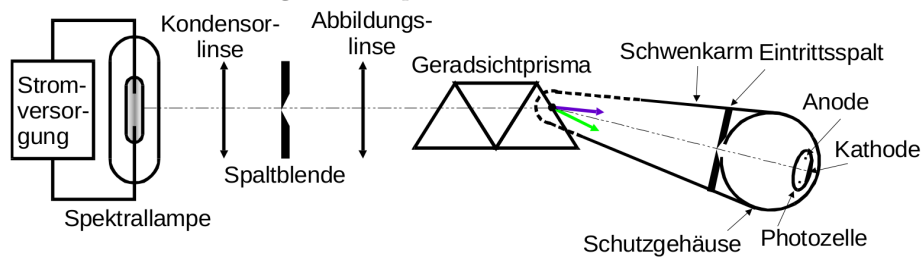
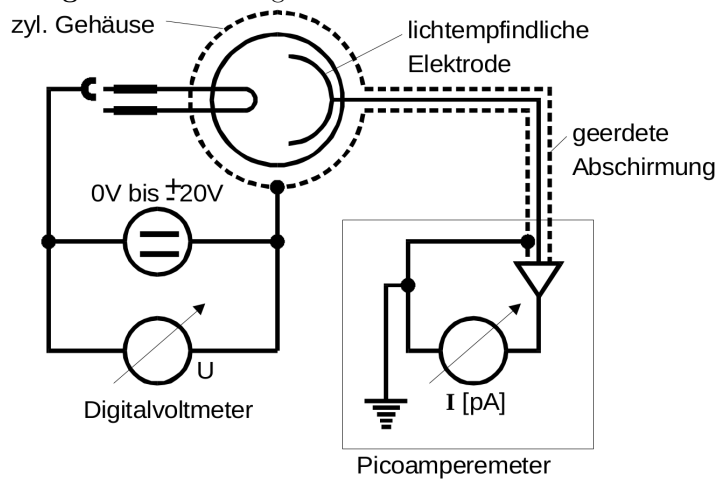


Abbildung 3: Der optische Teil des Versuchsaufbaus.



Der Messaufbau besteht aus zwei Teilen. Zum einen wird ein optischer Aufbau nach Abb. 3 verwendet, in welchem das Licht der Quecksilber Lampe in seine monochromatischen Spektrallinien aufgespalten wird. Zum anderen wird eine Schaltung mit einer Photodiode nach Abb. 4 benutzt um die auftretenden Effekte in Form einer Stromstärkenänderung sichtbar zu machen. Der optische Aufbau besteht zunächst aus der Lampe, deren Licht mit einer Kondensorlinse gebündelt wird. Mithilfe eines Glasprismas wird der Lichtstrahl in seine Spektrallinien zerlegt. Die Photodiode nach Abb. 2 besteht aus der bestrahlten

Abbildung 4: Die Schaltung des elektrischen Teiles des Versuchsaufbaus.



Photokathode und einer ringförmigen Photoanode, welche um die Kathode gelegt ist. Zwischen beiden liegt eine variierbare Beschleunigungsspannung an. Die vorherrschende Stromstärke wird mit einem geerdeten Pikoamperemeter gemessen.

4 Durchführung

Zunächst wird der unter verschiedenen Wellenlängen auftretende Photostrom in Abhängigkeit der angelegten Gegenspannung gemessen. Hierzu wird die Öffnung der Photodiode in den ersten der aufgespaltenen Lichtstrahlen gesetzt. Um den Lichtstrahl scharf zu stellen und eine möglichst hohe Lichtintensität zu erhalten, können die optischen Instrumente verschoben werden. Anschließend wird die angelegte Gegenspannung variiert und der zugehörige Strom über das Pikoamperemeter notiert. Die Gegenspannung wird solange erhöht, bis sich kein Strom mehr messen lässt. Falls die anfänglichen Ströme bereits zu gering sind, werden zusätzlich einige Werte unter einer Beschleunigungsspannung entnommen. Da die messbaren Ströme im Pikoamperebereich liegen, wird ein sehr empfindliches Messgerät benötigt. Daher muss ein Koaxialkabel verwendet werden und das Pikoamperemeter geerdet sein. Dieser Vorgang wird mit allen erkennbaren Linien der Quecksilberlampe wiederholt. Anschließend wird der Versuch nochmals mit der gelben Kernlinie des Spektrums wiederholt. Dieses mal wird die Gegenspannung jedoch im Bereich von -20 V bis 20 V variiert. Da das zu Verfügung stehende Pikoamperemeter jedoch keine negativen Ströme messen kann, kann die Variation der Gegenspannung bei einem Abfall des Stromes auf Null beendet werden.

5 Auswertung

Die Graphen wurden sowohl mit Matplotlib [3] als auch NumPy [6] erstellt. Die Fehlerrechnung wurde mithilfe von Uncertainties [4] durchgeführt.

5.1 Bestimmung der Grenzspannungen für die verschiedenen Wellenlängen

Tabelle 1: Die gemessenen Stromstärken I in Abhängigkeit der Saug- bzw. Gegenspannung U bei den Wellenlängen von 577 nm und 579 nm.

U/mV	I/pA	U/mV	I/pA
-18 000	320	-156	32
-16 000	280	-90	31
-14 030	280	-50	30
-12 000	260	-1	28
-11 000	250	1	30
-10 000	250	16	28
-9000	240	50	26
-8000	225	83	25
-7000	225	120	24
-6000	225	150	22
-5000	175	159	20
-4500	175	185	18
-4000	160	204	16
-3500	150	234	14
-3000	140	250	12
-2300	125	281	10
-2000	100	303	8
-1406	72	318	6
-1001	62	356	4
-697	60	404	2
-520	50	456	0
-375	45		

Abbildung 5: Die Wurzel der Stromstärke I gegen die Gegenspannung U bei den Wellenlängen von 577 nm und 579 nm aufgetragen.

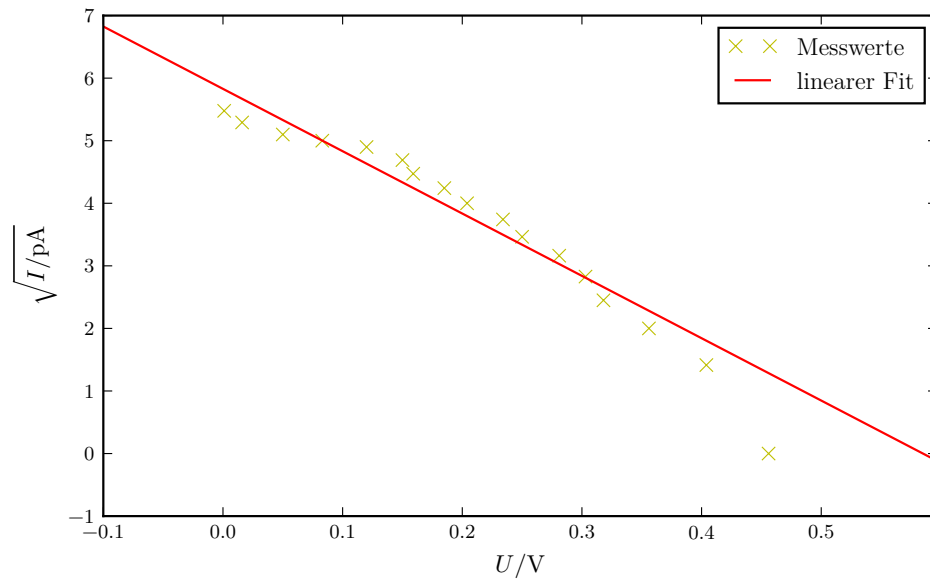


Tabelle 2: Die gemessenen Stromstärken I in Abhängigkeit der Saug- bzw. Gegenspannung U bei einer Wellenlänge von 546 nm.

U/mV	I/pA
−33	100
−1	78
1	80
18	70
35	76
60	74
85	70
132	65
137	60
161	55
190	50
223	40
229	30
373	20
416	10
500	0

Abbildung 6: Die Wurzel der Stromstärke I gegen die Gegenspannung U bei einer Wellenlänge von 546 nm aufgetragen.

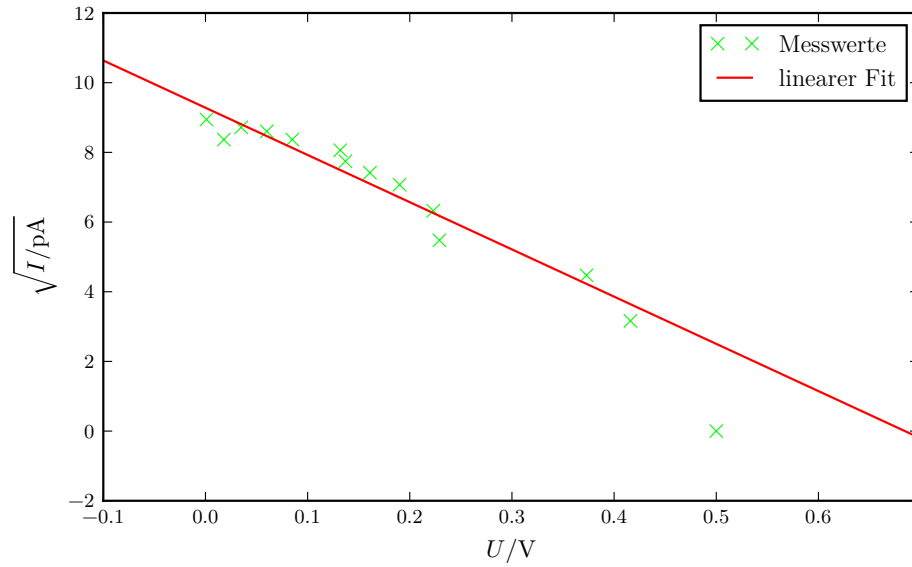


Tabelle 3: Die gemessenen Stromstärken I in Abhängigkeit der Gegenspannung U bei einer Wellenlänge von 492 nm.

U/mV	I/pA
1	9
60	8
127	7
203	6
271	5
365	4
413	3
484	2
622	1
734	0

Abbildung 7: Die Wurzel der Stromstärke I gegen die Gegenspannung U bei einer Wellenlänge von 492 nm aufgetragen.

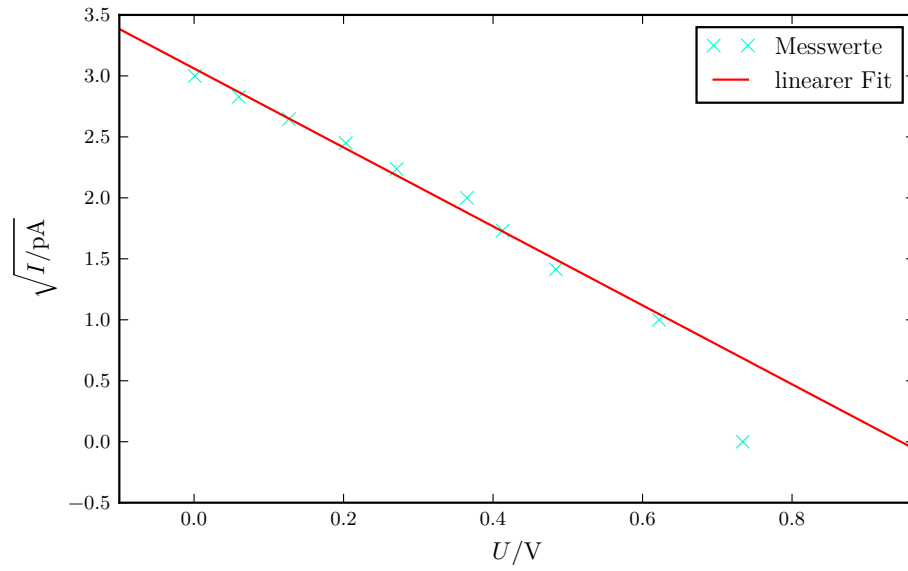


Tabelle 4: Die gemessenen Stromstärken I in Abhängigkeit der Gegenspannung U bei den Wellenlängen von 434 nm, 435 nm und 436 nm.

U/mV	I/pA
1	140
78	125
287	100
365	80
408	70
490	60
551	50
603	40
665	30
772	20
848	10
995	0

Abbildung 8: Die Wurzel der Stromstärke I gegen die Gegenspannung U bei den Wellenlängen von 434 nm, 435 nm und 436 nm aufgetragen.

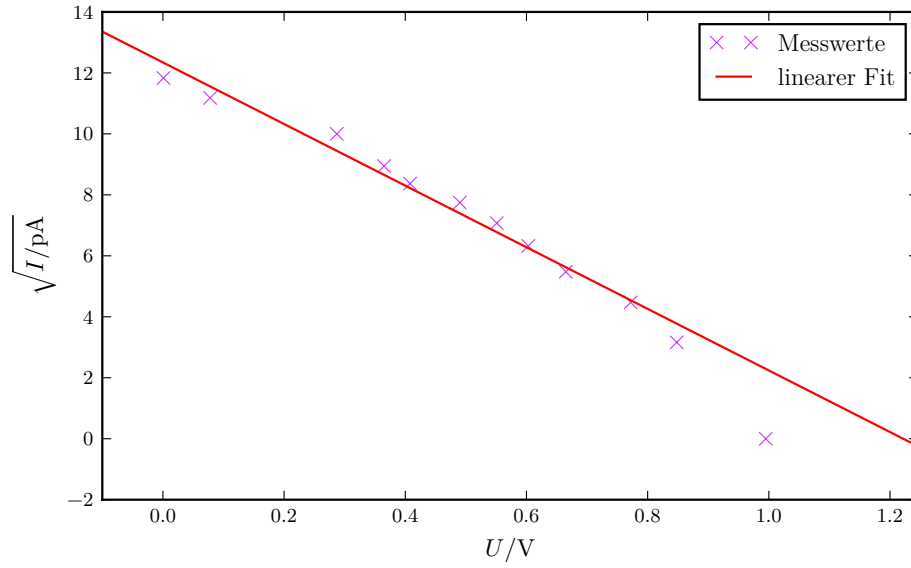


Tabelle 5: Die gemessenen Stromstärken I in Abhängigkeit der Gegenspannung U bei den Wellenlängen von 405 nm und 408 nm.

U/mV	I/pA
1	60
97	55
202	50
314	40
408	35
489	30
568	25
655	20
736	15
832	10
928	5
1007	0

Abbildung 9: Die Wurzel der Stromstärke I gegen die Gegenspannung U bei den Wellenlängen von 405 nm und 408 nm aufgetragen.

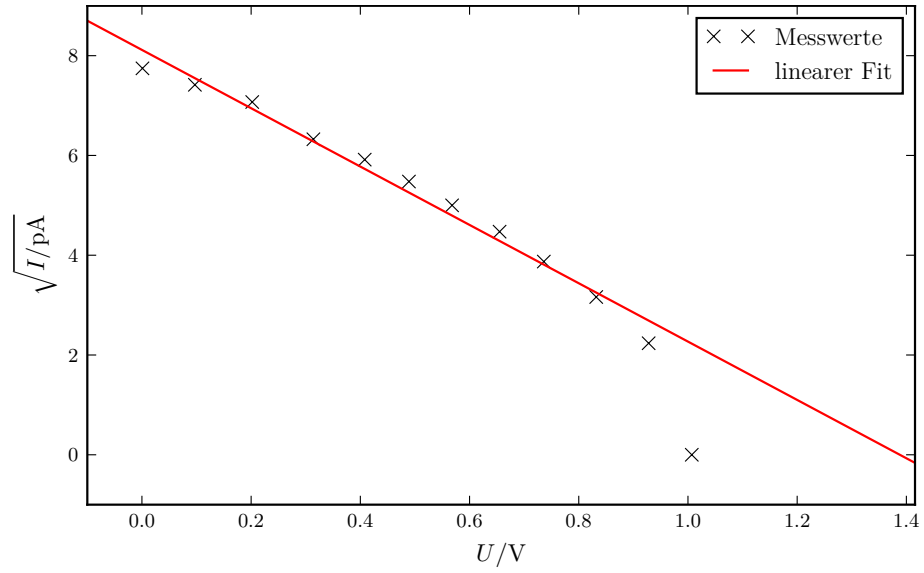
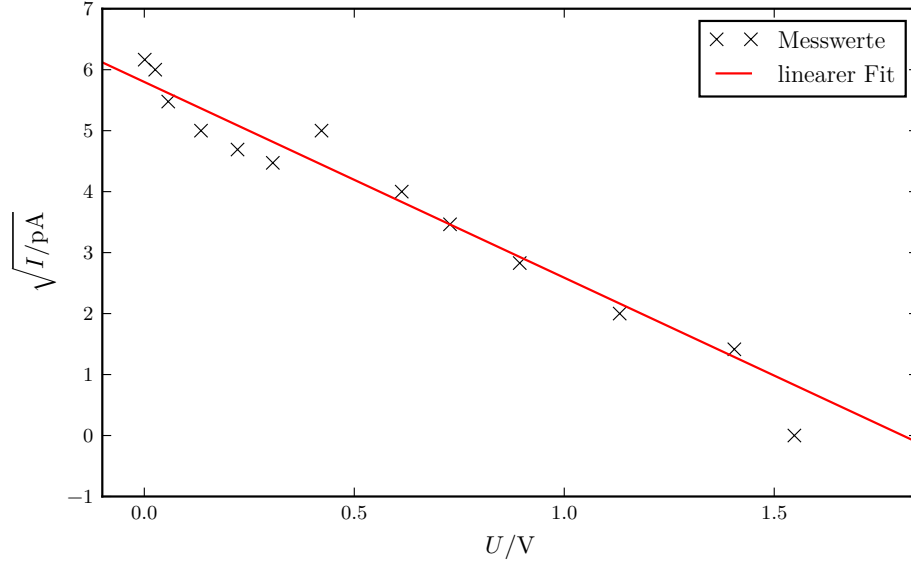


Tabelle 6: Die gemessenen Stromstärken I in Abhängigkeit der Gegenspannung U bei den Wellenlängen von 365 nm und 366 nm.

U/mV	I/pA
1	38
26	36
57	30
135	25
222	22
306	20
422	25
613	16
728	12
894	8
1132	4
1405	2
1548	0

Abbildung 10: Die Wurzel der Stromstärke I gegen die Gegenspannung U bei den Wellenlängen von 365 nm und 366 nm aufgetragen.



Die Fits in den Abbildungen 5, 6, 7, 8, 9 und 10 besitzen die Form $y_i = a_i x + b_i$. Eine lineare Ausgleichsrechnung der Form $y_i = a_i x + b_i$ liefert mit den Wertepaaren aus Tabelle 1, 2, 3, 4, 5 und 10 für die Grenzspannungen:

$$U_{g1} = -\frac{b_1}{a_1} = (0,59 \pm 0,04) \text{ V} \quad (3)$$

$$U_{g2} = -\frac{b_2}{a_2} = (0,68 \pm 0,05) \text{ V} \quad (4)$$

$$U_{g3} = -\frac{b_3}{a_3} = (0,95 \pm 0,04) \text{ V} \quad (5)$$

$$U_{g4} = -\frac{b_4}{a_4} = (1,22 \pm 0,06) \text{ V} \quad (6)$$

$$U_{g5} = -\frac{b_5}{a_5} = (1,39 \pm 0,07) \text{ V} \quad (7)$$

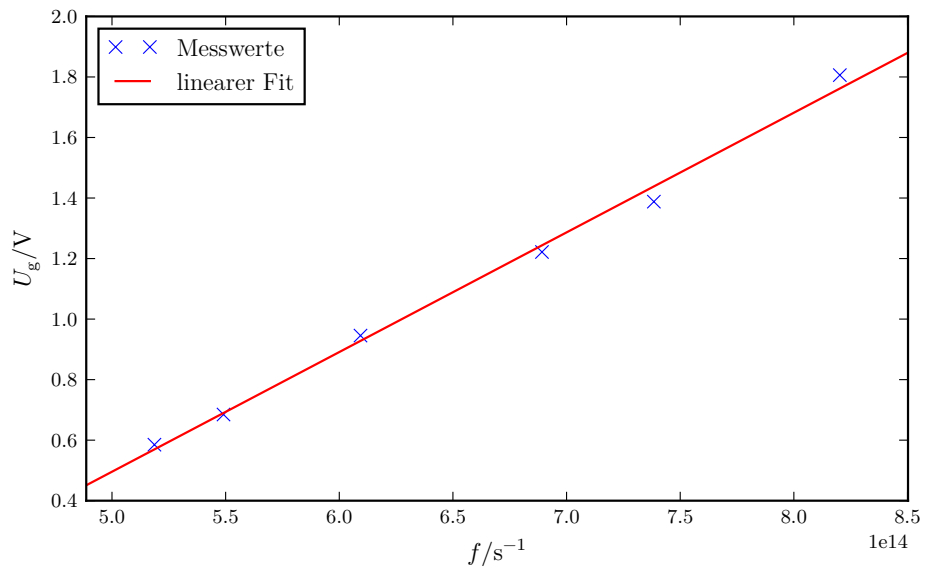
$$U_{g6} = -\frac{b_6}{a_6} = (1,81 \pm 0,13) \text{ V}. \quad (8)$$

Hierbei wurde der jeweils letzte Wert nicht berücksichtigt, da dieser anscheinend nicht im Bereich $I \propto U^2$ liegt. Es ist zu vermuten, dass diese bereits im negativen I -Bereich liegen.

Tabelle 7: Die berechnete Grenzspannung U_g und Frequenz f bei den verschiedenen Wellenlängen λ .

λ/nm	f/ps^{-1}	U_g/V
578,0	519	$0,59 \pm 0,04$
546,0	549	$0,68 \pm 0,05$
492,0	609	$0,95 \pm 0,04$
435,0	689	$1,22 \pm 0,06$
406,0	738	$1,39 \pm 0,07$
365,5	820	$1,81 \pm 0,13$

Abbildung 11: Die berechnete Grenzspannung U_g bei den verschiedenen Wellenlängen λ gegen die Frequenz f aufgetragen.



5.2 Näherung der Austrittsenergie aus der Kathode und des Verhältnisses vom Planckschem Wirkungsquantum zur Elementarladung

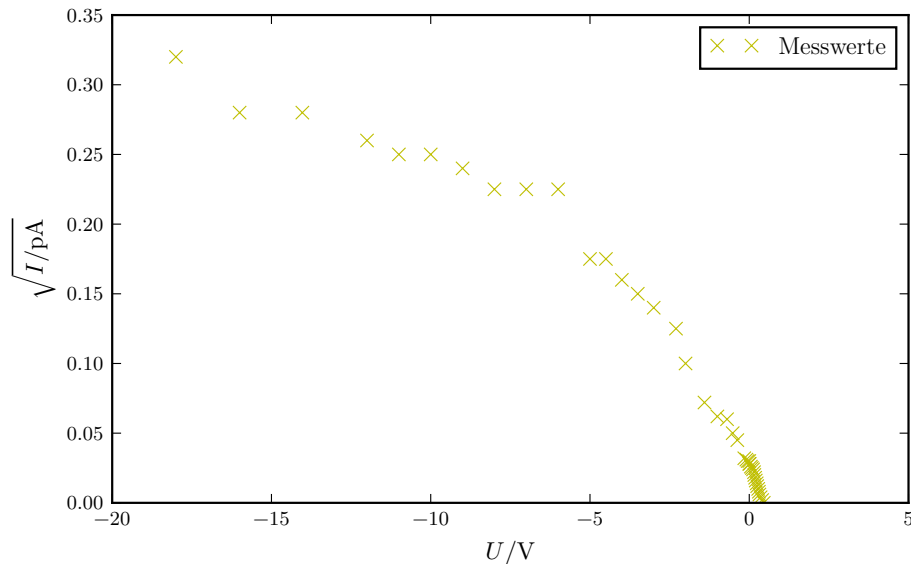
Der Fit in Abbildung 11 besitzt die Form $y = ax + b$. Eine lineare Ausgleichsrechnung der Form $y = ax + b$ liefert mit den Wertepaaren aus Tabelle 7 nach Formel (2):

$$\frac{h}{e_0} = \frac{1}{a} = (4,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-15} \text{ V s} \quad (9)$$

$$A_k = -\frac{b}{e_0} = (1,5 \pm 0,1) \text{ eV}. \quad (10)$$

5.3 Untersuchung des Photostromes in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die gelbe Spektrallinie

Abbildung 12: Die Stromstärke I gegen die Saug- bzw. Gegenspannung U bei den Wellenlängen von 577 nm und 579 nm aufgetragen.



In Abbildung 12 ist der Photonenstrom I bei den Wellenlängen von 577 nm und 579 nm gegen die Spannung aufgetragen. Die Kurve nähert sich bei betragsmäßig großen Saugspannungen asymptotisch einem Sättigungswert an. Dies liegt daran, dass nicht alle Elektronen, welche die Photokathode verlassen, auch die Anode erreichen. So erzeugen die Elektronen beim Verlassen der Kathode ein Gegenfeld, sodass das Ansaugfeld der Anode nicht mehr in voller Stärke bis zur Kathode reicht [2]. Auch die geringe Oberfläche der Anode kann dazu führen, dass die Elektronen erst bei größeren Saugspannungen diese erreichen. Der Sättigungswert wird dann erreicht, wenn alle austretenden Elektronen die Anode erreichen. Dieser Sättigungswert ist abhängig von der Anzahl der austretenden Elektronen und diese von der Intensität des einfallenden Lichtes. Damit der Sättigungswert schon bei endlichen Spannungen erreicht werden kann muss sichergestellt werden,

dass alle Elektronen bei genügend großen Saugspannungen die Anode erreichen. Diese könnte durch eine Anode, welche die Kathode komplett umgibt erreicht werden. Der Photostrom sinkt schon bevor U_g erreicht wird, da die Elektronen nach dem Austritt keine einheitliche kinetische Energie besitzen und dadurch bei steigenden Gegenspannungen weniger Elektronen die Anode erreichen können. Dies kommt durch die Energieverteilung der Elektronen in der Kathode zustande. Bei großen Gegenspannungen kann sogar ein negativer Strom auftreten, da auch an der Anode ein Photo-Effekt auftreten kann. Da die Kathode schon bei 20 °C [1] merklich verdampft, kann sich an der Anode Material von der Kathode ablagern. Dieses hat vermutlich eine sehr niedrige Austrittsarbeit und somit kann es an der Anode schon bei niedrigen Frequenzen zum Photo-Effekt kommen. Allerdings treten auf Grund der niedrigen Lichtintensität und Oberfläche nur wenige Elektronen aus. Aus diesem Grund und Aufgrund der großen Oberfläche der Kathode kann der Sättigungsstrom schon bei betragsmäßig kleinen Spannungen erreicht werden.

6 Diskussion

Tabelle 8: Die Ergebnisse der Auswertung.

$\frac{h}{e_0}/\text{fVs}$	A_k/eV
$4,0 \pm 0,1$	$-1,5 \pm 0,1$

Schon bei der Durchführung ist aufgefallen, dass die Intensität des Lichtes sich sprunghaft änderte. Dadurch kamen Schwankungen in der Größenordnung der gemessenen Werte für den Photostrom zustande. Diese wurden so gut wie möglich herausgefiltert indem gewartet wurde, bis sich wieder eine annähernd gleiche Intensität eingestellt hatte. Dennoch sind besonders in dem Graphen 10 dadurch entstandene Schwankungen erkennbar. Zusätzlich können die Ergebnisse durch ungewollte Lichteinstrahlung verfälscht worden sein. Eine weitere mögliche Fehlerquelle ist das Verbindungskabel zwischen Diode und Pikoamperemeter, welches aufgrund der geringen Ströme möglicherweise nicht ausreichend abgeschirmt ist. Die in Abb. 11 bestimmten Grenzspannungen bilden den linearen Zusammenhang zwischen U_g und f hingegen hinreichend ab. Das aus der Steigung der Geraden ermittelte Verhältnis h/e_0 weicht um 3 % nach unten bezüglich des Literaturwertes $h/e_0 = 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$ [5] ab. Aufgrund der beiden, letztgenannten Punkte ist zu vermuten, dass das berechnete Verhältnis aussagekräftig ist. Für A_k ist diese Aussage nicht erfüllt. Da das Kathodenmaterial nicht bekannt ist, kann ein systematischer Fehler bei A_k nicht ausgeschlossen werden.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *V500 Der Photo-Effekt*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V500.pdf>.
- [2] TU Dortmund. *V504 Thermische Elektronenemission*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V504.pdf>.
- [3] John D. Hunter. *Matplotlib: A 2D Graphics Environment*. Version 1.5.3. URL: <http://matplotlib.org/> (besucht am 09.12.2016).
- [4] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 3.0.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/> (besucht am 09.12.2016).
- [5] NIST. *Numpy Konstanten*. URL: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html> (besucht am 25.04.2017).
- [6] Travis E. Oliphant. *NumPy: Python for Scientific Computing*. Version 1.11.1. URL: <http://www.numpy.org/> (besucht am 09.12.2016).