

Nr.500

Der Photoeffekt

Sara Krieg
sara.krieg@udo.edu

Marek Karzel
marek.karzel@udo.edu

Durchführung: 21.05.2019

Abgabe: 28.05.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Die Natur des Lichts	3
1.2	Der Photoeffekt	3
1.3	Die experimentelle Untersuchung	3
2	Durchführung	5
3	Auswertung	6
3.1	Bestimmung von $\frac{h}{e}$ und der Austrittsarbeit	6
3.2	Betrachtung des Photostroms in Abhängigkeit der Spannung	12
4	Diskussion	14
5	Literaturverzeichnis	15

1 Theorie

1.1 Die Natur des Lichts

Der Photoeffekt zeigt, dass die Wellenbeschreibung unzureichend ist, um alle Eigenschaften des Lichts zu erklären. Für die Phänomene der Wechselwirkung des Lichtes mit Materie ist die Einführung des Photons als Lichtteilchen notwendig. Erst wenn über viele Photonen gemittelt werden kann, findet die Wellenbeschreibung wie beispielsweise bei Beugungsphänomenen wieder Verwendung.

1.2 Der Photoeffekt

Als Photoeffekt benannt ist die Herauslösung von Elektronen aus Metalloberflächen bei (monochromatischer) Lichteinstrahlung. Diese ist entgegen der Wellentheorie abhängig von der Frequenz und nicht von der Lichtintensität. Die Energie des Lichtes, bzw. der sich mit der Lichtgeschwindigkeit c linear ausbreitenden Photonen, ist als

$$E_\lambda = hf \quad (1)$$

gegeben, wobei f die Lichtfrequenz beschreibt und h das Plancksche Wirkungsquantum darstellt.

Die Energie, die ein Photon auf ein Elektron im Metall überträgt, wird teilweise dazu aufgewendet, um die Austrittsarbeit W_A zur Herauslösung des Elektrons zu leisten. Die restliche Energie wird zur kinetischen Energie $E_{\text{kin,e}}$ des Elektrons. Es ergibt sich:

$$E_\lambda = hf = E_{\text{kin,e}} + W_A = \frac{1}{2}m_e v^2 \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow E_{\text{kin,e}} = hf - W_A. \quad (3)$$

Die kinetische Energie der Elektronen $E_{\text{kin,e}}$ wird also durch eine von f abhängige Gerade beschrieben. Für den Bereich

$$hf < W_A = hf_{\text{grenz}}$$

kleiner der Grenzfrequenz f_{grenz} tritt der Photoeffekt nicht auf, da die Austrittsarbeit W_A nicht geleistet werden kann.

1.3 Die experimentelle Untersuchung

In Abbildung 1 sind links der Aufbau der Photozelle und rechts der gesamte Versuchsaufbau abgebildet.

Die kinetische Energie der Elektronen

$$E_{\text{kin,e}} = \frac{1}{2}m_e v^2 = eU \quad (4)$$

wird mithilfe der Gegenfeldmethode bestimmt. Mit der Gegenspannung U_g wird zwischen den Elektroden ein elektrisches Feld aufgebaut, welches die Elektronen bremst.

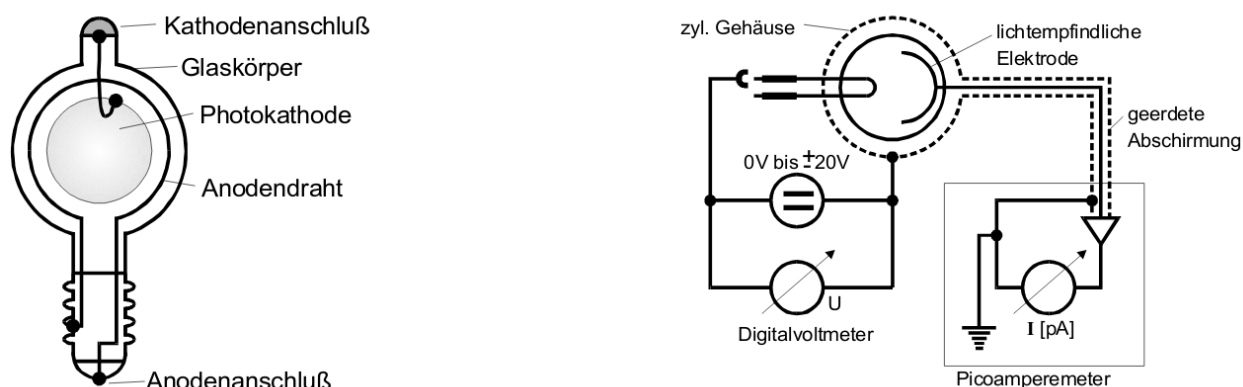


Abbildung 1: Der Aufbau einer Photozelle (links) und der Versuchsaufbau (rechts).
[1]

Die Gegenspannung wird erhöht, bis kein Photostrom mehr gemessen wird. Mithilfe der eingestellten Grenzspannung U_{grenz} wird $E_{\text{kin,e}}$ für Elektronen mit der maximalen Geschwindigkeit v_{max} bestimmt. Somit ergibt sich für die Lichtenergie:

$$E_{\lambda} = hf = e_0 U_{\text{grenz}} + W_{\text{A}} . \quad (5)$$

Die Elektronen in der Photokathode besitzen ein kontinuierliches Energiespektrum - die Fermi-Dirac-Verteilung. Somit besitzen sie auch nach Herauslösung keinen diskreten Energiewert, sodass schon vorm Erreichen der Grenzspannung U_{grenz} der Photostrom I_{λ} merklich absinkt. Es ergibt sich der in Abbildung 2 dargestellte parabolische Zusammenhang

$$I_{\lambda} \sim U^2 , \quad (6)$$

mit dem sich die Grenzfrequenz U_{grenz} bei $I_{\lambda} = 0$ ablesen lässt.

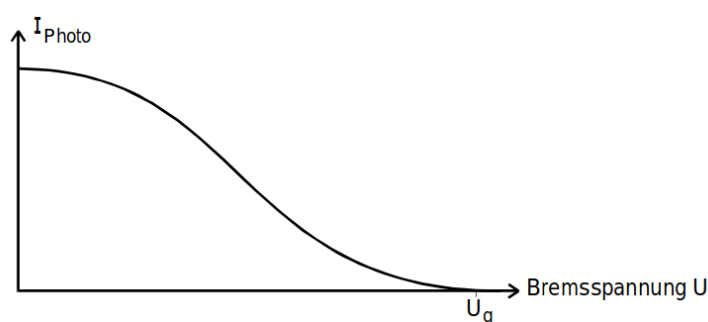


Abbildung 2: Der parabolische Zusammenhang zwischen Photostrom und Spannung.
[1]

Besitzt das Anodenmetall eine hohe Austrittsarbeit W_A (in der Abbildung A_A genannt), so muss nach Abbildung 3 eine Beschleunigungsspannung U_b angelegt werden, damit das Potential der Elektronen

$$hf + e_0 U_b \geq W_A \quad (7)$$

hoch genug ist, dass diese herausgelöst werden. Die Fermi-niveaus ξ_A und ξ_K der Anode und Kathode stellen sich auf gleiche Höhe ein, sobald die Elektroden elektrisch leitend miteinander verbunden sind.

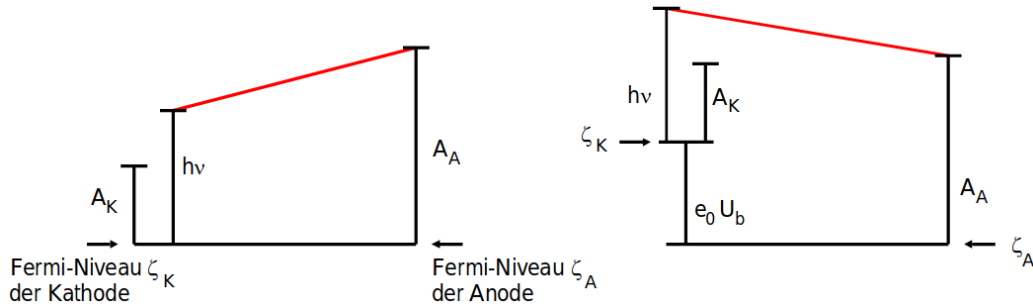


Abbildung 3: Die Potentialgefälle ohne angelegte Beschleunigungsspannung U_b (links) und mit U_b (rechts). [1]

2 Durchführung

Es werden die in Abbildung 1 und 4 abgebildeten Versuchsaufbauten verwendet.

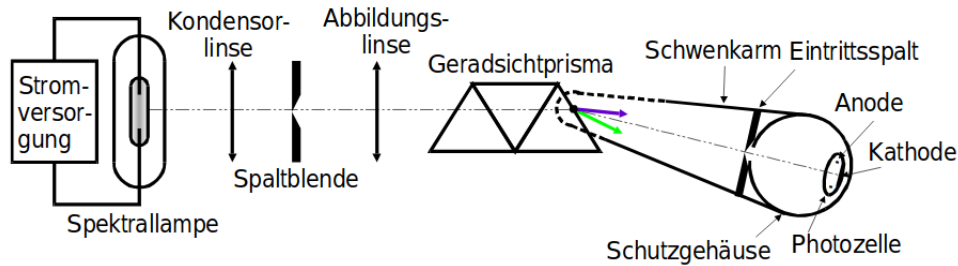


Abbildung 4: Optischer Aufbau. [1]

Das Licht der Spektrallampe fällt, wie in Abbildung 4 dargestellt, durch die Kondensorlinse, eine Blende und die Abbildungslinse. Dabei wird das Licht gebündelt und ein scharfes Bild erzeugt. Das Geradsichtprisma bricht die Spektrallinien verschiedener Frequenzen in verschiedenen Winkeln. Durch Verstellung der Photozellenposition treffen die verschiedenen Spektrallinien in der Photozelle auf.

Der Photostrom I_λ wird in Abhängigkeit von U_g für verschiedene Lichtfrequenzen gemessen. Für die Spektrallinie der Wellenlänge $\lambda = 578 \text{ nm}$ werden viele Messwerte im Messintervall von $-20 \text{ V} \leq U_g \leq 20 \text{ V}$ aufgenommen.

3 Auswertung

3.1 Bestimmung von $\frac{h}{e}$ und der Austrittsarbeit

Es werden die zwischen Photokathode und Anode angelegte Gegenspannung U_g , sowie der Photostrom I_λ für alle erkennbaren Spektrallinien durchgemessen und $\sqrt{I_\lambda}$ berechnet. Diese Messdaten finden sich in den Tabellen 1 bis 4.

Tabelle 1: Messwerte zur gelben Spektrallinie.

U_g / V	I_λ / nA	$\sqrt{\frac{I_\lambda}{\text{nA}}}$
-0,670	0,000	0,000
-0,500	0,002	0,045
-0,250	0,014	0,118
0,000	0,029	0,170
0,250	0,042	0,205
0,500	0,055	0,235
0,750	0,066	0,257
1,000	0,077	0,277
1,250	0,086	0,293
1,500	0,096	0,310

Tabelle 2: Messwerte zur grünen Spektrallinie.

U_g / V	I_λ / nA	$\sqrt{\frac{I_\lambda}{\text{nA}}}$
-0,650	0,000	0,000
-0,500	0,002	0,045
-0,250	0,018	0,134
0,000	0,034	0,184
0,250	0,048	0,219
0,500	0,062	0,249
0,750	0,073	0,270
1,000	0,085	0,292
1,500	0,120	0,346
2,000	0,140	0,374
3,000	0,190	0,436

Nun wird mittels Python und Matplotlib für jede Spektrallinie eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt, indem $\sqrt{I_\lambda}$ gegen die Gegenspannung U_g aufgetragen wird. Die Plots sind in Grafik 5 bis Grafik 8 zu sehen.

Die mit den Ausgleichsgeraden der Form

Tabelle 3: Messwerte zur violetten Spektrallinie.

U_g / V	I_λ / nA	$\sqrt{\frac{I_\lambda}{\text{nA}}}$
-1,130	0,0000	0,000
-1,000	0,0020	0,045
-0,750	0,0130	0,114
-0,500	0,0295	0,172
-0,250	0,0520	0,228
0,000	0,0730	0,270
0,250	0,1100	0,332
0,500	0,1300	0,361
0,750	0,1500	0,387
1,000	0,1700	0,412

Tabelle 4: Messwerte zur blauen Spektrallinie.

U_g / V	I_λ / nA	$\sqrt{\frac{I_\lambda}{\text{nA}}}$
-1,270	0,000	0,000
-1,000	0,003	0,055
-0,750	0,008	0,089
-0,500	0,010	0,100
-0,250	0,025	0,158
0,000	0,035	0,187
0,250	0,044	0,210
0,500	0,052	0,228
0,750	0,062	0,249
1,000	0,069	0,263

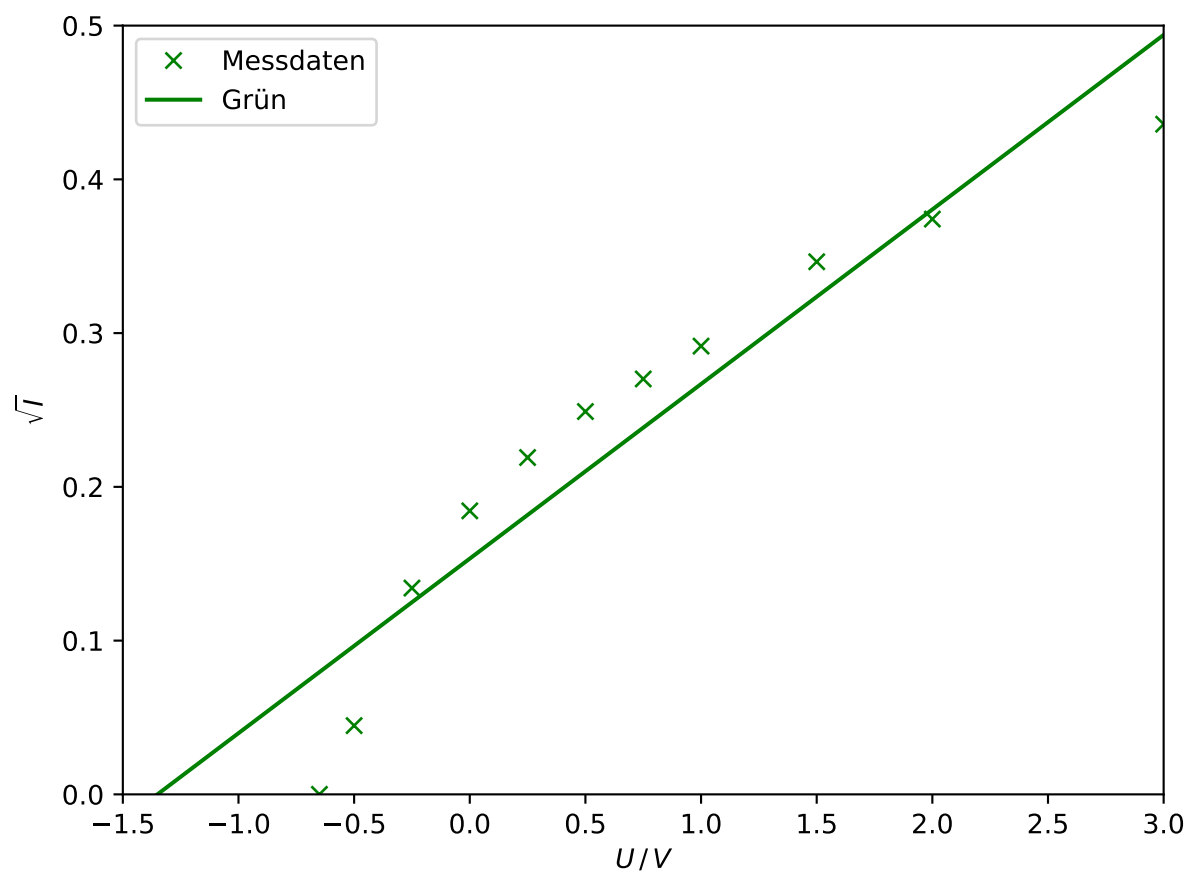


Abbildung 5: Messdaten für die grüne Spektrallinie.

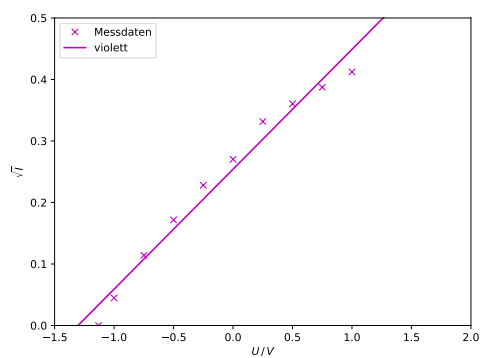


Abbildung 6: Messdaten für die violette Spektrallinie.

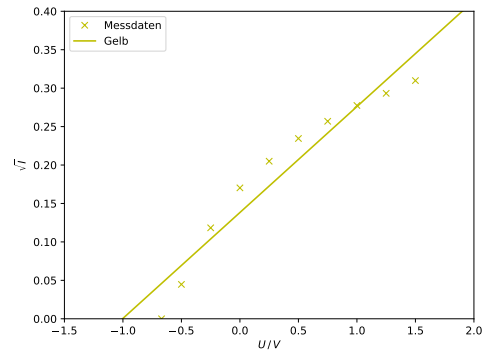


Abbildung 7: Messdaten für die gelbe Spektrallinie.

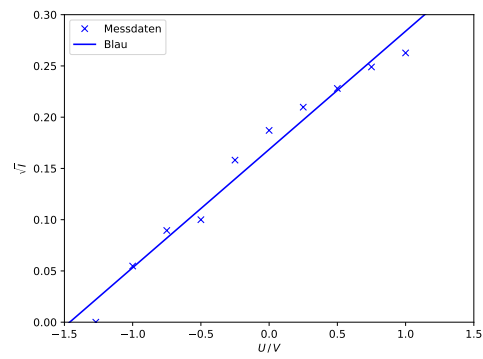


Abbildung 8: Messdaten für die blaue Spektrallinie.

$$\sqrt{I} = a \cdot U + b$$

erhaltenen Regressionsparameter sind für die zugehörigen Wellenlänge in λ in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Parameter der linearen Fits.

λ / nm	a / Vs	b / V
546,00	$0,11 \pm 0,01$	$0,15 \pm 0,02$
435,80	$0,20 \pm 0,01$	$0,251 \pm 0,009$
576,96	$0,14 \pm 0,02$	$0,14 \pm 0,01$
404,70	$0,115 \pm 0,008$	$0,169 \pm 0,006$

Aus den Schnittpunkten mit der Spannungsachse ergeben sich somit die Grenzspannungen, diese sind in Tabelle 6 eingetragen.

Tabelle 6: Schnittpunkte mit der Spannungsachse

λ / nm	U_g / V
546,00	-1,35
435,80	-1,30
576,96	-1,00
404,70	-1,45

Mit den erhaltenen Gegenspannungen und den Lichtfrequenzen wird eine weitere Ausgleichsrechnung durchgeführt. Im Folgenden werden die negativen Vorzeichen weggelassen, da eine Umpolung durchgeführt wird. Das Ergebnis hierzu ist in Abbildung 9 zu begutachten.

Mit der Ausgleichsgeraden

$$U_g = a \cdot f + b$$

werden die Werte

$$a = (0,16 \pm 0,12) \cdot 10^{-14} \text{ Vs},$$

$$b = (0,26 \pm 0,75) \text{ V}$$

erhalten. Die Steigung a ist nun genau $\frac{h}{e}$, also h in eVs angegeben, da $U = \frac{E}{e}$. Der Achsenabschnitt b entspricht aufgrund der gleichen Beziehung genau der Austrittsarbeit in eV. Somit ergeben sich die gesuchten Größen:

$$h = 1,59 \cdot 10^{-15} \text{ eVs},$$

$$W_A = 0,264 \text{ eV}.$$

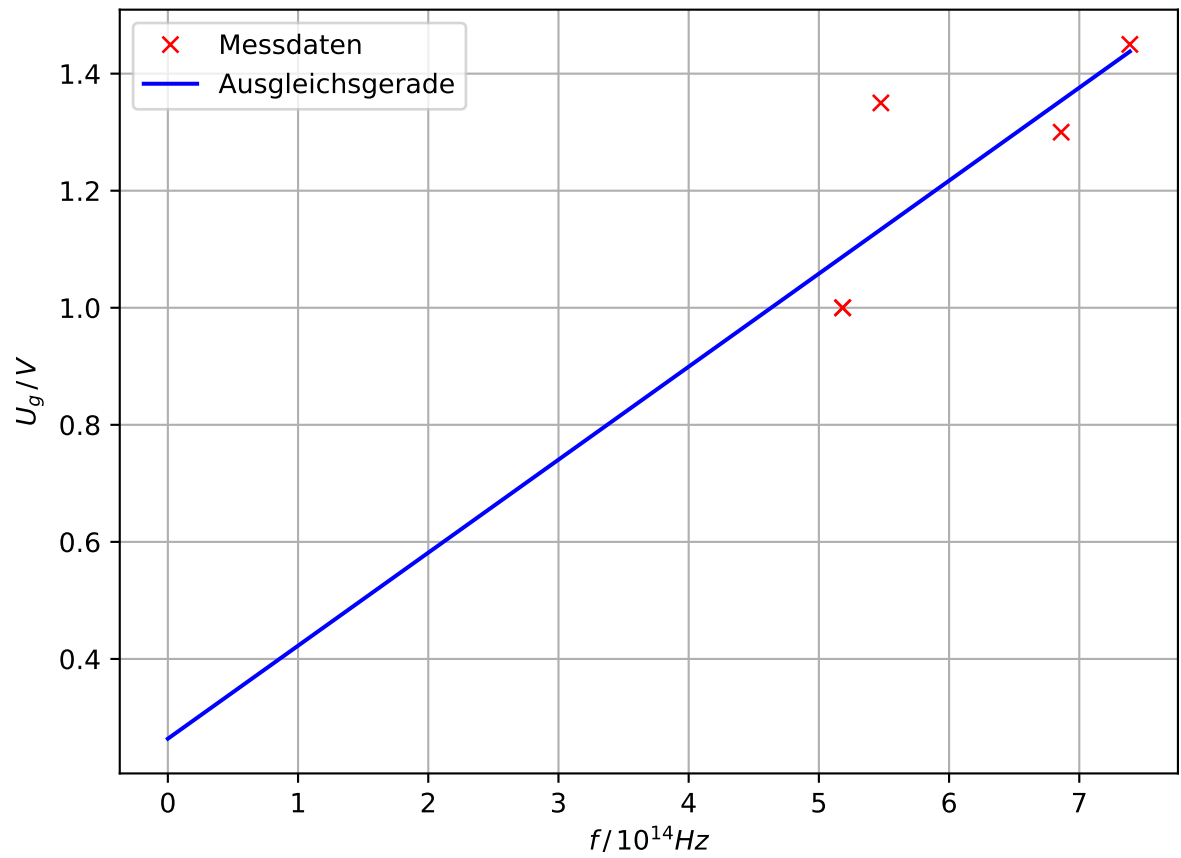


Abbildung 9: Die zuvor berechneten Spannungswerte gegen die jeweilige Frequenz.

3.2 Betrachtung des Photostroms in Abhängigkeit der Spannung

Im zweiten Versuchsteil wird der Photostrom I_λ in Abhängigkeit der angelegten Spannung U_g betrachtet, wobei die Spannung im Bereich vom -10 V bis 19 V variiert wird. Die gemessenen Wertepaare bei der konstanten Wellenlänge $\lambda = 578\text{ nm}$ sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Graphisch aufgetragen ergibt sich Abbildung 10.

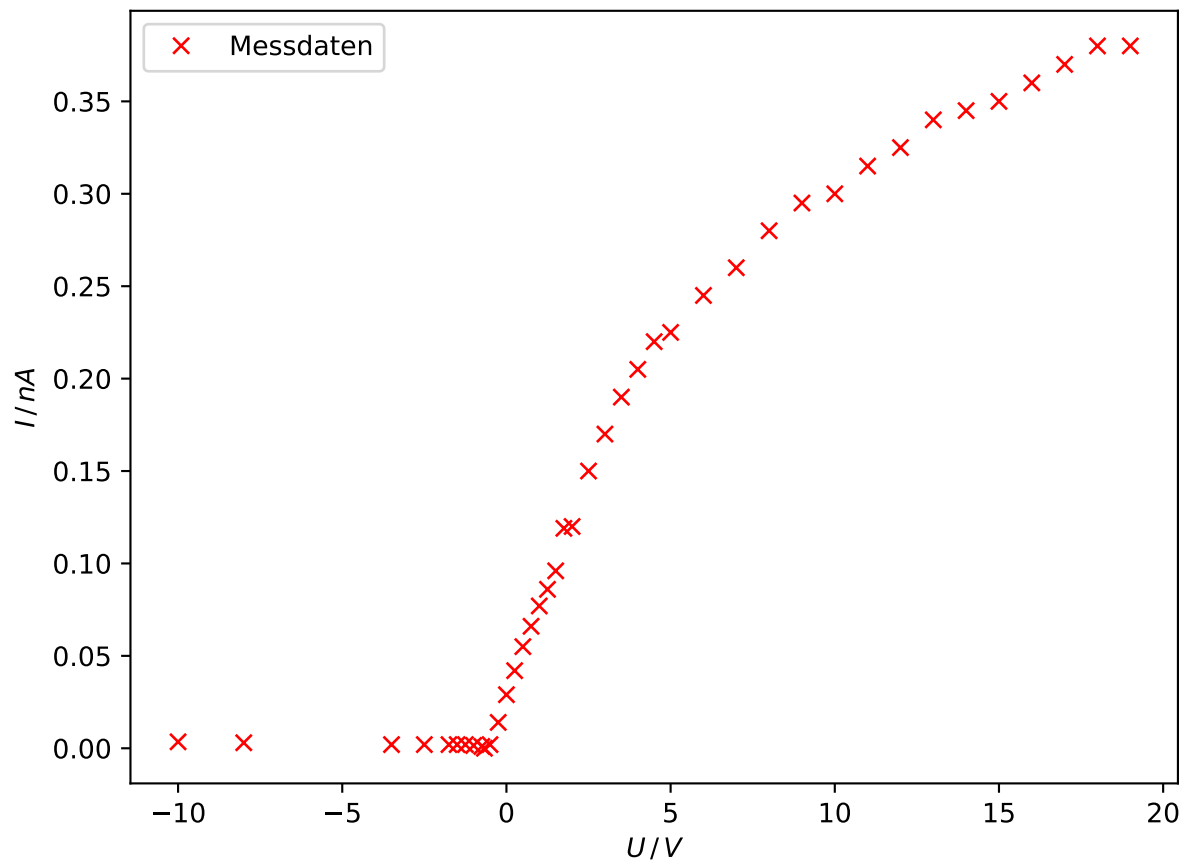


Abbildung 10: Aufgenommene Kennlinie bei $\lambda = 578\text{ nm}$.

Es ist ersichtlich, dass die aufgenommene Kurve bei positiven, beschleunigenden Spannungen gegen einen Sättigungswert geht. D.h. die Stromstärke nähert sich asymptotisch einer maximalen Stromstärke. Die Existenz eines solchen Sättigungswertes lässt sich einfach durch die konstante Intensität erklären. Da diese direkt proportional zur Anzahl der austretenden Elektronen ist, muss somit auch der Stromfluss durch eine Konstante beschränkt sein. Das Ohmsche Gesetz kann daher nicht angewandt werden. Die Tatsache, dass dieser Sättigungswert nur asymptotisch erreicht wird, liegt darin begründet, dass die Elektronen mit verschiedenen Energiewerten aus der Photokathode austreten. Dadurch

Tabelle 7: Strom-Spannungs-Messwerte

U_g / V	I_λ / nA
-10,000	0,0035
-8,000	0,0030
-3,500	0,0020
-2,500	0,0020
-1,750	0,0020
-1,500	0,0020
-1,250	0,0020
-1,000	0,0015
-0,750	0,0010
-0,670	0,0000
-0,500	0,0020
-0,250	0,0140
0,000	0,0290
0,250	0,0420
0,500	0,0550
0,750	0,0660
1,000	0,0770
1,250	0,086
1,500	0,096
1,750	0,119
2,000	0,120
2,500	0,150
3,000	0,170
3,500	0,190
4,000	0,205
4,500	0,220
5,000	0,225
6,000	0,245
7,000	0,260
8,000	0,280
9,000	0,295
10,000	0,300
11,000	0,315
12,000	0,325
13,000	0,340
14,000	0,345
15,000	0,350
16,000	0,360
17,000	0,370
18,000	0,380
19,000	0,380

kann der Sättigungswert nicht ab einer Grenzspannung plötzlich auftreten, sondern sich nur asymptotisch dem Sättigungswert nähern. Außerdem deckt die Ringanode nur einen kleinen Raumbereich ab, sodass ohnehin nur ein Bruchteil der Photoelektronen aufgefangen werden kann. Zum vollständigen Erreichen des maximalen Stromflusses bei einer endlichen Spannung müsste die Anode alle ausgelösten Elektronen auffangen.

Außerdem wird erkannt, dass der Strom im Bereich der Gegenspannung nicht unstetig auf 0 springt, sondern für $U_g \rightarrow U_{\text{grenz}}$ allmählich auf 0 absinkt. Dies liegt ebenfalls in der Energieverteilung der Elektronen begründet. Da diese in der Photokathode einer Fermi-Dirac-Statistik genügen, haben die Elektronen vor dem Austritt verschiedene Energiewerte. Auch nach dem Austritt liegt diese ungleiche Verteilung vor, da prinzipiell jedes Elektron den gleichen Energiebetrag von $E = h \cdot f$ zugeführt bekommt.

Weiterhin wird erkannt, dass im Bereich Gegenspannung $U_g < U_{\text{grenz}}$ ein geringfügiger, entgegengerichteter Stromfluss messbar ist, welcher bereits bei kleinen Spannungswerten einen Sättigungswert annimmt. Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass die Beschichtung der Photokathode bereits bei geringen Temperaturen anfängt zu verdampfen. Diese so erzeugten, freien Atome werden dann durch den auftretenden Photoeffekt ionisiert und wandern aufgrund ihrer positiven Ladung zur Anode. Dort lösen sie Elektronen aus, um sich wieder zu neutralisieren. Anschließend können sie erneut ionisiert werden und so weiter. Das bei der Ionisierung frei werdende Elektron hingegen wandert zur Photokathode. So entsteht insgesamt ein Strom in entgegengesetzter Richtung. Man erkennt, dass dieser Effekt eindeutig von der Teilchendichte der freien Atome im Vakuum abhängt. Da diese aber nicht beliebig hoch werden kann und die Metallatome der Photokathode auch kondensieren, gibt es einen Sättigungswert des Stromes. Die Tatsache, dass dieser Effekt bereits bei energiearmen Licht (ca. 650 nm) auftritt, beweist, dass die Anode eine sehr geringe Austrittsarbeit $W_A = 1,9 \text{ eV}$ haben muss. Dies leitet sich daraus ab, dass ein Atom im freien Raum mit genau dieser Energie ionisiert werden kann und genau diesen Energiebetrag dazu verwendet, um ein Elektron aus der Anode herauszulösen.

4 Diskussion

Der aus Plot 9 bestimmte Quotient aus der Planckschen Konstante und der Elementarladung lautet

$$\left(\frac{h}{e_0} \right)_{\text{gem}} = (1,59 \pm 1,23) \cdot 10^{-15} \text{ V s.}$$

Verglichen mit dem Literaturwert [1],

$$\left(\frac{h}{e_0} \right)_{\text{lit}} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ V s,}$$

ergibt sich eine prozentuale Abweichung von

$$\Delta \left(\frac{h}{e_0} \right) = 61,56 \, \%.$$

Diese Abweichung ist sehr groß. Dies liegt vermutlich daran, dass nur 4 Werte verwendet wurden um h mit einer linearen Ausgleichsrechnung zu bestimmen, worunter die Genauigkeit sinkt. Die aus jenem Plot berechnete Austrittsarbeit beträgt

$$W_A = (0,264 \pm 0,750) \text{ eV}.$$

Die Abweichung kann durch die gleiche Argumentation erklärt werden wie der zur Abweichung von $\left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{gem}}$ zu $\left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{lit}}$. Es bleibt zu erwähnen, dass während der Durchführung des Experiments auffiel, dass das Picoamperemeter starken Schwankungen unterlag und somit die Bestimmung eines Wertes nicht exakt möglich war. Außerdem wurden statt 5 nur 4 Spektrallinien vermessen, da keine 5. erkennbar war.

5 Literaturverzeichnis

[1]: TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 500: Der Photoeffekt.*

[2]: Wikipedia <https://de.wikipedia.org/wiki/Austrittsarbeit>

Werte entnommen am 21.05.2019