

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
2	Durchführung	3
3	Auswertung	3
3.1	Bestimmung von $\frac{h}{e}$ und der Austrittsarbeit	3
3.2	Betrachtung des Photostroms in Abhängigkeit der Spannung	7
4	Diskussion	10
5	Literaturverzeichnis	11

1 Theorie

[sample]

2 Durchführung

3 Auswertung

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

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

Tabelle 1: Gelb

U / V	I / nA	$\sqrt{\frac{I}{\text{nA}}}$
-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

Nun wird mittels Python und Matplotlib für jede Spektrallinie eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt, indem \sqrt{I} gegen die Gegenspannung U aufgetragen wird. Die Plots sind in Grafik 1 zu sehen.

Die mit den Ausgleichsgeraden der Form

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

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

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

Mit den erhaltenen Gegenspannungen und den Lichtfrequenzen wird eine weitere Ausgleichsrechnung durchgeführt. Dazu werden die negativen Vorzeichen weggelassen, da sonst mit $E = U \cdot e$ eine negative Energie der Elektronen folgen würde. Das Ergebnis hierzu ist in Abbildung 2 zu begutachten.

Tabelle 2: Grün

U / V	I / nA	$\sqrt{\frac{I}{\text{nA}}}$
-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

Tabelle 3: Violett

U / V	I / nA	$\sqrt{\frac{I}{\text{nA}}}$
-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: Blau

U / V	I / nA	$\sqrt{\frac{I}{\text{nA}}}$
-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

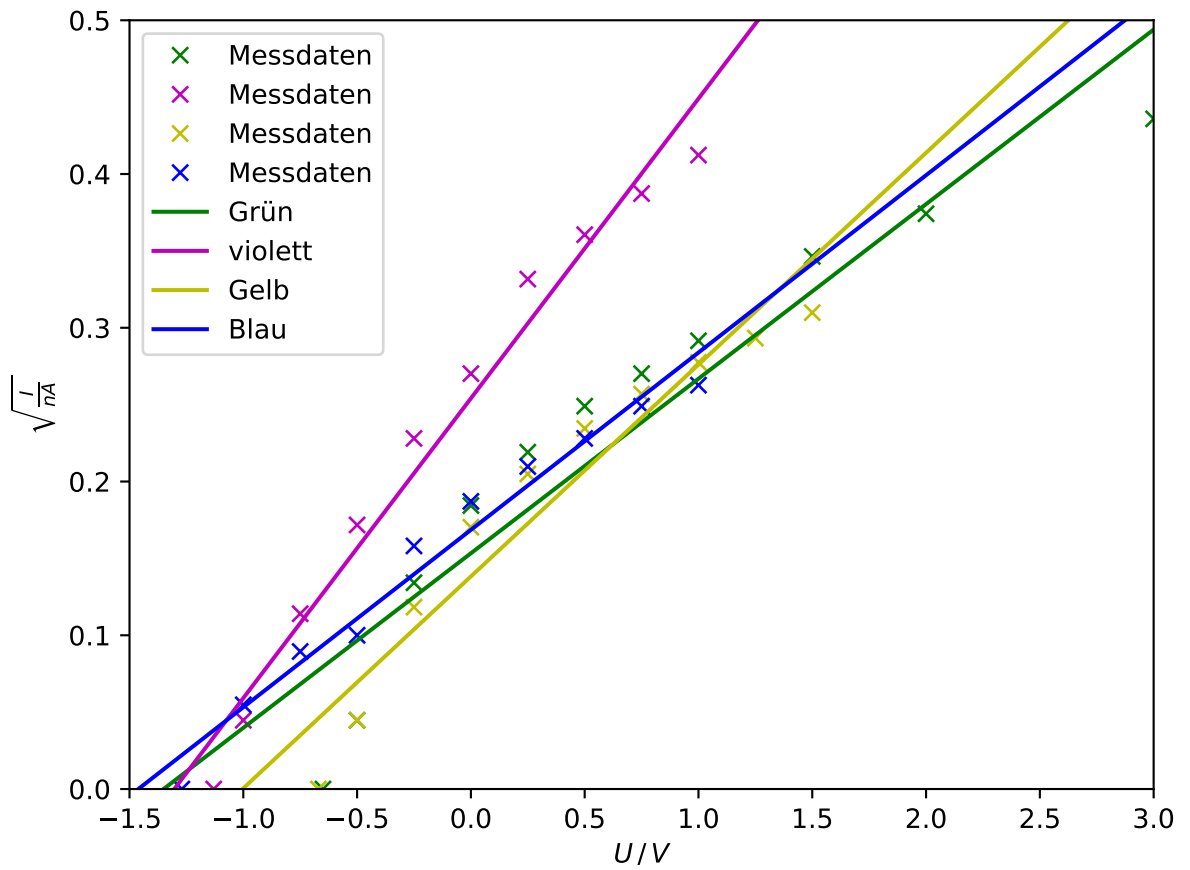


Abbildung 1: Messdaten von verschiedenen Spektrallinien und Regressionen.

Tabelle 5: Parameter der linearen Fits.

λ / nm	a / V s	b / V
546.00	$0,114 \pm 0,014$	$0,153 \pm 0,018$
435.80	$0,195 \pm 0,013$	$0,251 \pm 0,009$
576.96	$0,138 \pm 0,016$	$0,138 \pm 0,013$
404.70	$0,115 \pm 0,008$	$0,169 \pm 0,006$

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

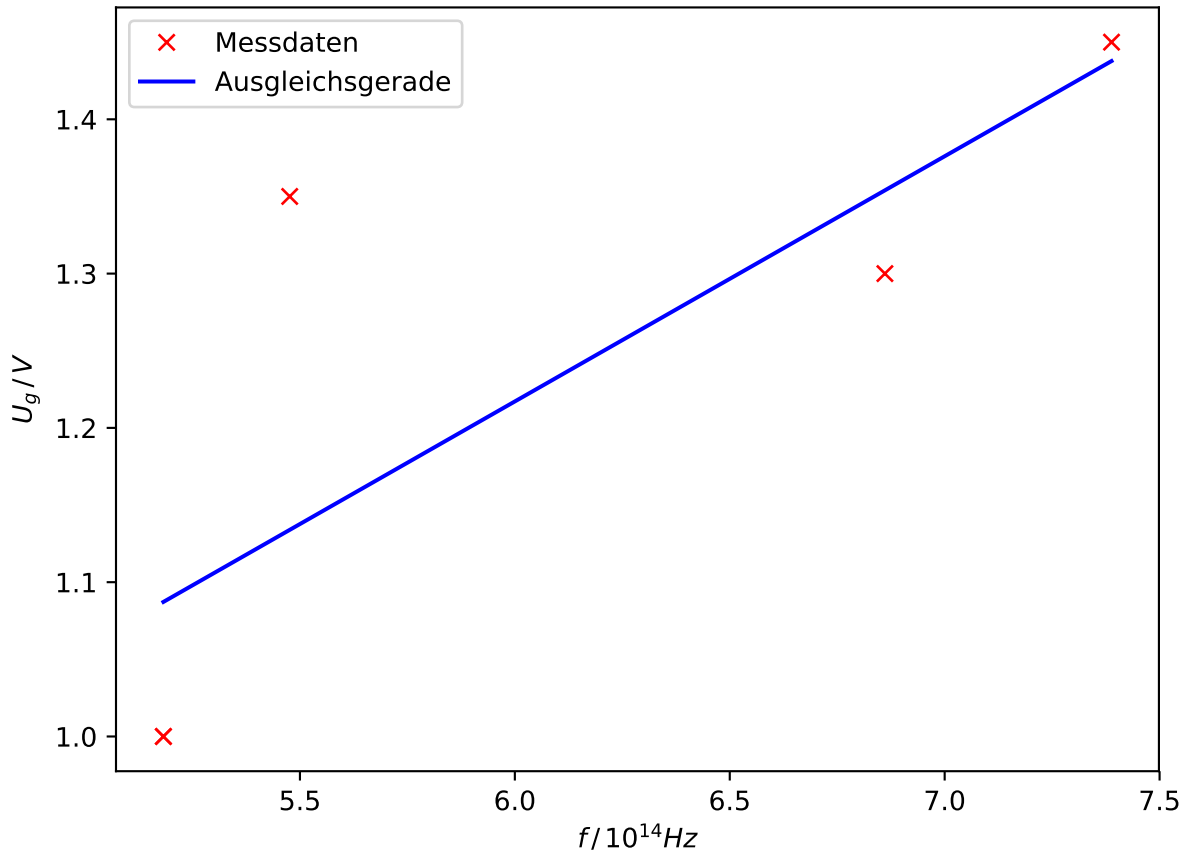


Abbildung 2: Die zuvor berechneten Spannungswerte gegen die jeweilige Frequenz.

Mit der Ausgleichsgeraden

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

werden die Werte

$$\begin{aligned} a &= (0,159 \pm 0,123) \cdot 10^{-14} \text{ V s}, \\ b &= (0,264 \pm 0,750) \text{ V} \end{aligned}$$

erhalten. Die Steigung a ist nun genau $\frac{h}{e}$, also h in eV 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:

$$\begin{aligned} h &= 1,59 \cdot 10^{-15} \text{ eV s}, \\ E_A &= 0,264 \text{ eV}. \end{aligned}$$

3.2 Betrachtung des Photostroms in Abhängigkeit der Spannung

Im zweiten Versuchsteil wird der Photostrom I in Abhängigkeit der angelegten Spannung U 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 in Abbildung 3.

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 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 $U \rightarrow U_g$ 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.

Tabelle 7: Strom-Spannungs-Messwerte

U / V	I / 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

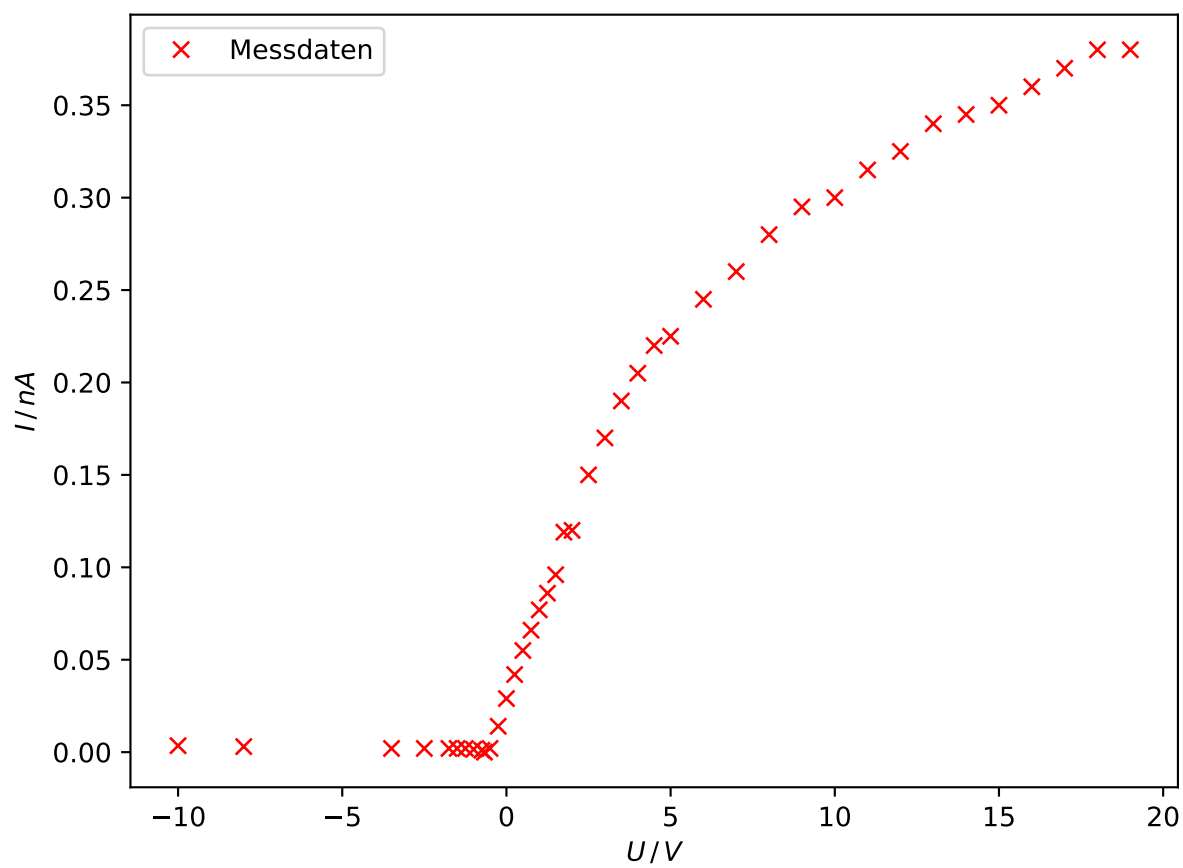


Abbildung 3: Aufgenommene Kennlinie bei $\lambda = 578 \text{ nm}$.

Weiterhin wird erkannt, dass im Bereich Gegenspannung $U < U_g$ 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 $E_A = 1,9 \text{ eV}$ 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 2 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

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

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

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

Nach [2] kann vermutet werden, dass es sich bei dem verwendeten Metall am ehesten um Cesium handelt, allerdings ist auch dieser Wert noch recht weit von unserer berechneten Austrittsarbeit entfernt. 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.

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