Praktikumsprotokoll

Versuch Nr. 500
Der Photoeffekt

Frank Hommes
und
Kilian Klug

Durchgeführt am:
29. Juni 2004

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **3**

2 Theoretische Hintergründe **3**
2.1 Das Licht 3
2.2 Der Photeffekt 3
2.2.1 Wellen- und Teilchencharakter 3
2.3 Weitere Beobachtungen 4
2.3.1 Energieverteilung 4
2.3.2 Einfluss des Potentialverhältnisses 6

3 Durchführung **6**
3.1 Aufbau und Justierung der Messapparatur 7
3.2 Messprogramm 8

4 Auswertung **8**
4.1 Bestimmung der Grenzspannung U_g 8
4.2 Bestimmung von $\frac{h}{e_0}$ und A_K 9
4.3 Verlauf der Strom-Spannungs-Kurve für die gelbe Linie 10

5 Anhang **10**

1 Einleitung

In diesem Versuch soll der Photoeffekt untersucht werden. Darunter versteht man das Herausschlagen von Elektronen aus einer Metalloberfläche durch Einstrahlen von Licht. Insbesondere von Interesse sind hier die Maximalenergie und Anzahl dieser Elektronen in Abhängigkeit von der Frequenz bzw. Intensität des Lichtes. Zudem soll die Grenzfrequenz bestimmt werden, unterhalb derer der Photoeffekt nicht auftritt.

2 Theoretische Hintergründe

2.1 Das Licht

Das Licht lässt sich mit klassischen Methoden nicht vollständig beschreiben - je nach Experiment zeigt es Teilchen- oder Wellencharakter. Beide Fälle kann man als Grenzfälle innerhalb der Quantenelektrodynamik (QED) betrachten. Dabei nutzt man das Wellenmodell, wenn eine sehr große Zahl von Photonen betrachtet wird, während das Teilchenmodell bei einzelnen Photonen oder allgemein Wechselwirkungen mit Materie zu Einsatz kommt. Letzteres ist auch beim hier untersuchten Photo- oder auch lichtelektrischen Effekt der Fall.

2.2 Der Photeffekt

Der Photoeffekt ist die Emission von Elektronen aus einer Metalloberfläche beim Bestrahlen mit Licht. Diese Elektronen kann man als Photostrom messen, wenn man die bestrahlte Metallfläche als Kathode nutzt und ihr eine Anode gegenüberstellt. Untersuchungen ergeben dabei drei wesentliche Ergebnisse:

- Die Zahl der pro Zeiteinheit ausgelösten Elektronen ist proportional zur Lichtintensität.
- Die Energie der Photoelektronen ist - gemessen über ihre Geschwindigkeit - proportional zur Lichtfrequenz und unabhängig von der Lichtintensität.
- Es existiert eine Grenzfrequenz, unterhalb derer der Phrotoeffekt nicht auftritt.

2.2.1 Wellen- und Teilchencharakter

Nach dem **Wellenmodell** müsste man annehmen, dass die Elektronen der äußeren Schichten durch das E-Feld des einfallenden Lichtes zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden. Dann würden die Elektronen die Oberfläche

verlassen können, sobald ihre Amplitude groß genug ist. Dies müsste aber auch mit mit intensivem langwelligem Licht möglich sein - d.h. man würde eine Abhängigkeit der Energie von der Intensität erwarten, was gerade den Beobachtungen widerspricht.

Das **Teilchenmodell** besagt, dass die Energie des Lichtes nicht kontinuierlich über die gesamte Wellenfront verteilt, sondern in einzelnen Korpuskeln, den Photonen, konzentriert ist. Die Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit c, haben eine Frequenz f und die Energie hf.

Beim Photoeffekt trifft je ein Photon auf je ein Elektron und wird von diesem absorbiert, was die Abhängigkeit der Elektronen-Zahl von der Lichtintensität erklärt. Dabei überträgt es seine Energie auf das Elektron, das die Metalloberfläche daraufhin verlassen kann, sofern seine Energie nun größer als die Austrittsarbeit ist. Unter Austrittsarbeit versteht man diejenige Energiemenge, die aufgebracht werden muss, damit ein Teilchen aus einem Material austreten kann. Bei Metallen kann vereinfachend angenommen werden, dass die Elektronen sich im Inneren frei im weitgehend homogenen Coulomb-Feld aller Teilchen bewegen. Sie müssen beim Verlassen des Metalls also einen Potentialwall überwinden.
Es gilt

$$hf = E_{kin} + A_k \quad . \tag{1}$$

Ist also die vom Photon übertragene Energie kleiner als die Austrittsarbeit können keine Elektronen das Metall verlassen. Da die Energie der Photonen frequenzabhängig ist, ergibt sich damit automatisch die zu beobachtende Grenzfrequenz.

2.3 Weitere Beobachtungen

2.3.1 Energieverteilung

Bei der praktischen Untersuchung des Photoeffektes verwendet man die Gegenfeld-Methode. Dabei wird zwischen den beiden Elektroden ein elektrische Feld aufgebaut, dass die Elektronen abbremst. Da ihre kinetische Energie gegeben ist durch $E_{kin} = e_0 U$ werden keine Elektronen mehr registriert, wenn

$$e_0 U_g = \frac{1}{2} m_0 \mathrm{v}_{max}^2 \tag{2}$$

gilt (e_0=Elementarladung, U_g=Grenz-Gegenspannung, m_g=Elektronen-Ruhemasse, v_{max}=Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen). Wären die emittierten Photoelektronen monoenergetisch würde die Strom-Spannungskurve bei erreichen der Grenzspannung U_g unstetig und sofort vom vorher konstanten Niveau auf Null abfallen. Man beobachtet jedoch bei Strom-Spannungskurven etwa eine Gestalt wie in Abb.1. Dieser kurvenartige Verlauf mit einem allmähli-

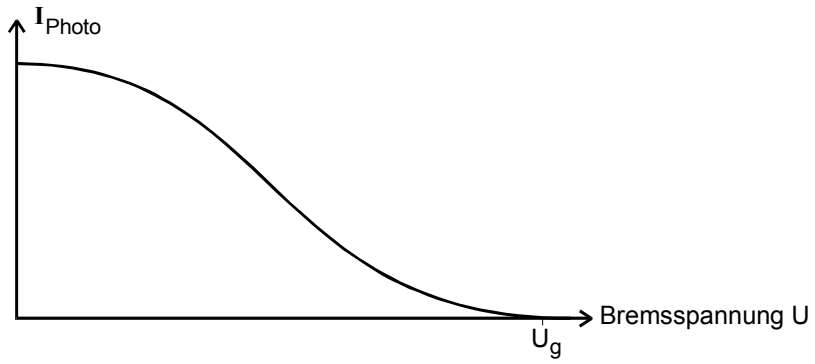


Abbildung 1: Photostrom in Abhängigkeit von der Bremsspannung in einer mit monochromatischem Licht bestrahlten Photozelle [1]

chen Absinken des Stromes bereits deutlich vor $U = U_g$ ist dadurch bedingt, dass die Elektronen nicht monoenergetisch sind. Vielmehr haben sie bereits innerhalb des Metall eine Energieverteilung, welche mit Hilfe der Fermi-Dirac-Statistik beschrieben werden kann. Die zugehörige Verteilungsfunktion hat die in Abb.2 wiedergegebene Gestalt. Für Elektronen hoher Energie gilt die Näherung

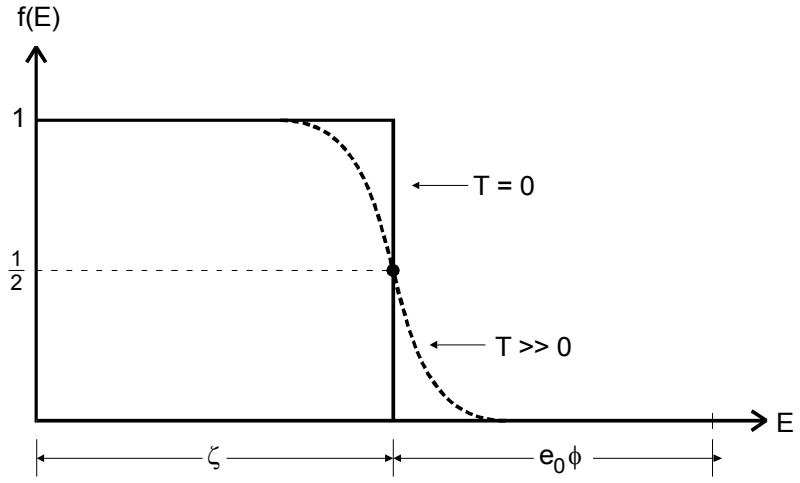


Abbildung 2: Der Verlauf der Fermi-Diracschen Verteilungsfunktion am absoluten Nullpunkt (durchgezogene Linie) und bei T $\gg$ 0 (gestrichelte Linie) [1]

$$f(E) = \exp\left(\frac{\zeta - E}{k_B T}\right) \quad . \tag{3}$$

Die maximale Energie der Elektronen hängt dabei von der Zahl n der Elektronen pro Volumeneinheit im Metall ab und heisst Fermische Grenzenergie.

Bei endlicher Temperatur können also gelegentlich Elektronen auftreten, deren Energie größer ist als $hf - A_k$.

2.3.2 Einfluss des Potentialverhältnisses

Unter Umständen erhält man bei Messungen falsche Ergebnisse, da nicht alle Elektronen die Anode erreichen. Ein Grund dafür kann neben technisch bedingten Einschränkungen (z.B. der Anodenform) sein, dass Kathoden- und Anodematerial verschiedene Austrittsarbeiten besitzen. Um den Photostrom zu messen, werden jedoch beide elektrisch leitend miteinander verbunden, was aber bewirkt, das sich ihre Fermi-Niveaus angleichen. Dabei kann die in Abb.3 dargestellte Situation auftreten. Ist die Austrittsarbeit A_A der Anode größer als diejenige der Kathode (A_K), so könnten die Elektronen zwar die Kathode verlassen, wenn $hf > A_K$ ist, sie müssen jedoch zusätzlich ein Gegenpotential überwinden. Es tritt dann wegen $hf < A_A$ also kein Photostrom auf (bzw. man kann sogar einen negativen Strom messen - die angelegte Spannung ist dann als Beschleunigungsspannung aufzufassen).

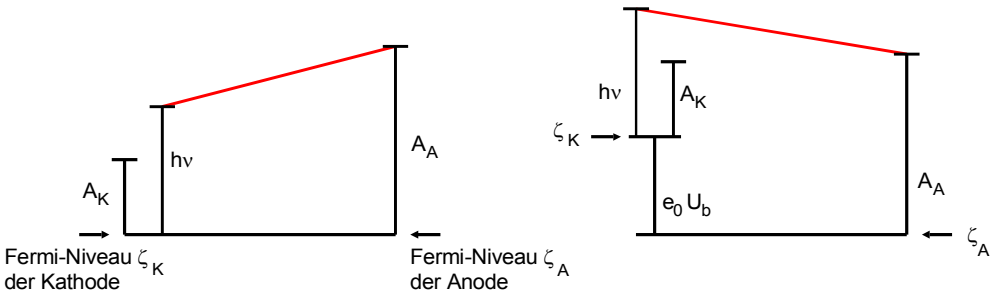


Abbildung 3: Potentialverhältnisse zwischen Anode und Kathode unter Berücksichtigung der Austrittsarbeiten von Anode und Kathode, rechts: mit beschleunigendem Potential [1]

3 Durchführung

Der Versuch wird an der rechten der beiden zur Verfügung stehenden Apparaturen durchgeführt.

3.1 Aufbau und Justierung der Messapparatur

Der optische Teil der verwendeten Messapparatur ist in Abb.4 dargestellt, während Abb.5 die elektrische Beschaltung zeigt. Das Licht der Spektrallampe, wir

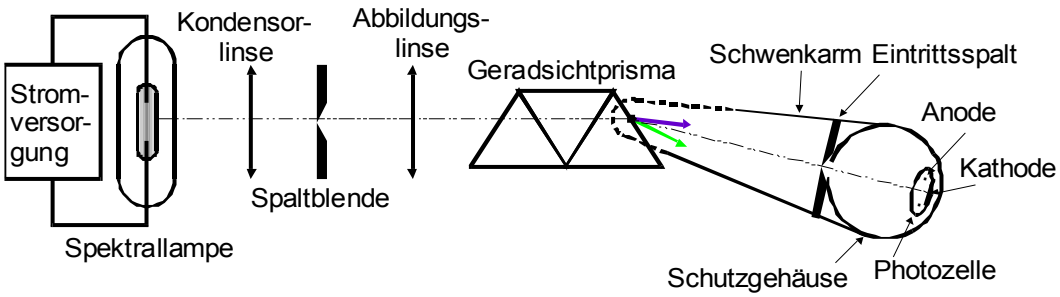


Abbildung 4: Optischer Teil des Versuchsaufbaus [1]

verwenden eine Quecksilberdampflampe, wird zunächst mit der Kondensorlinse (f=50mm) so auf eine Spaltblende abgebildet, dass das Bild etwa die gleiche Breite wie der Spalt hat, um eine möglichst große Lichtausbeute zu haben. Mit einer weiteren Sammellinse (f=100mm) wird das Licht dann auf ein Geradsichtprisma und schließlich auf die Photozelle gelenkt. Das Prisma spaltet das einfallende Licht in seine Spektral-Bestandteile auf, sodass durch Schwenken der am Ende des Lichtweges angebrachten Photozelle jeweils monochromatisches Licht aufgefangen werden kann.

Da die erreichbaren Lichtintensitäten und Ströme sehr klein sind (pA Bereich), wird die Apparatur so justiert, dass hier möglichst große Werte erzielt werden. Dazu können die Linsen-Abstände sowie die Spaltbreite etwas variiert werden. Streulicht und äußere Einflüsse sind natürlich ebenfalls soweit möglich zu minimieren.

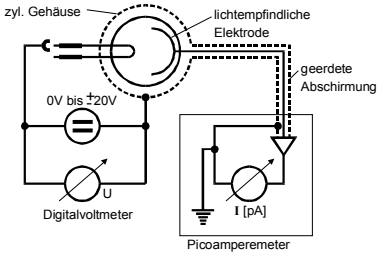


Abbildung 5: Elektrisches Schaltbild der Messapparatur [1]

3.2 Messprogramm

Zunächst werden für die verschiedenen Spektrallinien Messreihen aufgenommen, die die Abhängigkeit des Photostromes von der angelegten Spannung wiedergeben. Berücksichtigt werden hier die in Tab.1 aufgeführten Linien des Quecksilberspektrums.

λ [nm]	Farbe
577, 579	gelb
546	grün
434, 435, 436	violett
(408), 405	ultraviolett 1
365, 366	ultraviolett 2

Tabelle 1: Ausgemessene Linien des Hg-Spektrums

Mehrere Wellenängenangaben pro Farbe deuten auf weitere Aufspaltungen bzw. eine Feinstruktur hin, die mit der verwendeten Apparatur jedoch nicht aufzulösen war. Die ebenfalls sichtbare blaugrüne Linie (λ=492nm) war zu schwach um sinnvolle Messwerte zu erhalten.

Unter bestimmten Vorraussetzungen besteht zwischen dem Photostrom I_{Ph} und der Spannung U ein parabolischer Zusammenhang, also $I_{Ph} \propto U^2$. Um den Bereich der Gültigkeit dieser Beziehung zu erfassen, variieren wir bei allen Messreihen die Spannung zwischen +2 und -2 Volt. Lediglich für die gelbe Linie wurde der Bereich von +20 bis -20 Volt abgedeckt, sodass wir auch eine komplette Kennlinie zu erhalten.

Um im roten Bereich eine Messreihe aufnehmen zu können wird die Apparatur umgebaut, indem wir eine rote Leuchtdiode (λ=633nm, betrieben mit 64mA) direkt vor der Photozelle montieren. Hier ist der Rest des vorher verwendeten Aufbaus nicht notwendig, da die LED bereits monochromatisches Licht liefert.

Die erhaltenen Messwerte sind tabellarisch im Anhang aufgeführt (siehe Tab.3). Die Messwerte für die gelbe Linie sind in einer eigenen Tabelle (Tab.4) dargestellt.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der Grenzspannung U_g

Zunächst tragen wir die Wurzel aus dem gemessenen Photostrom in Abhängigkeit von der Gegenspannung auf (Diagramm 6). Die Schnittpunkte der Ausgleichsge-

raden durch die linearen Anteile mit der U-Achse liefern die jeweiligen Grenzspannungen U_g, deren Fehler wir durch eine Gauß'sche Fehlerfortpflanzung erhalten.

Farbe	Ausgleichsgerade	U_g
Rot	$f(x) = (0,49 \pm 0,05) \cdot x + (0,13 \pm 0,01)$	$-0,27 \pm 0,05$
Gelb	$f(x) = (0,27 \pm 0,01) \cdot x + (0,11 \pm 0,00)$	$-0,41 \pm 0,02$
Grün	$f(x) = (1,16 \pm 0,08) \cdot x + (0,70 \pm 0,03)$	$-0,60 \pm 0,07$
Violett	$f(x) = (0,79 \pm 0,02) \cdot x + (0,91 \pm 0,01)$	$-1,15 \pm 0,04$
UV 1	$f(x) = (0,49 \pm 0,01) \cdot x + (0,67 \pm 0,01)$	$-1,37 \pm 0,05$
UV 2	$f(x) = (0,61 \pm 0,01) \cdot x + (1,05 \pm 0,01)$	$-1,72 \pm 0,04$

Tabelle 2: Grenzspannungen für die verschiedenen Spektrallinien

4.2 Bestimmung von $\frac{h}{e_0}$ und A_K

Um das Verhältnis von plankschem Wirkungsquantum h und der Elementarladung e_0 zu ermitteln, tragen wir die angelegte Spannung U gegen die Lichtfrequenz f auf (siehe Diagramm 7).

Eine Ausgleichsrechung ergibt

$$\frac{h}{e_0} = (-4,31 \cdot 10^{-15} \pm -0,12 \cdot 10^{-15}) \frac{\mathrm{Js}}{\mathrm{C}}$$

sowie

$$A_K = (1,82 \pm 0,07) eV \quad .$$

Der Literaturwert für h/E_0 ist 4,14 $\cdot 10^{-15} \frac{\mathrm{Js}}{\mathrm{C}}$. Der von uns gemessene Wert weicht somit um 4,1% ab. Abweichungen lassen sich damit erklären, dass zum Einen die Spannung möglicherweise nicht exakt eingestellt worden ist oder auch vom verwendeten Gerät nicht exakt gehalten wird. Zum Anderen wurde die Feinstruktur der Spaktrallinien nicht berücksichtigt und für die Messungen ein recht breites Strahlbündel verwendet, so dass nicht wirklich monochromatisches Licht zum Einsatz kam. Auch die Messung des Photostromes ist vermutlich nicht sehr genau, da hier sehr kleine Ströme auftreten, deren Bestimmung entpsrechend störungsanfällig ist.

Leider können wir den Wert für die Austrittsarbeit nicht vergleichen, da wir nicht wissen, aus welchem Material die Kathode besteht.

4.3 Verlauf der Strom-Spannungs-Kurve für die gelbe Linie

Für die Stromspannungskurve haben wir die Messdaten aus Tab. 4 in Diagramm 8 aufgetragen.

Man erkennt, dass die Kurve bei großen Spannungen asymptotisches Verhalten zeigt. Dies ist damit zu erklären, dass erst bei höheren Spannungen alle herausgeschlagenen Elektronen die Kathode erreichen. Die Anzahl der Elektronen, die aus der Kathode geschlagen werden können ist aber nicht beliebig steigerbar.

Weiterhin beginnt der Photostrom schon vor Erreichen von U_g zu sinken, da die Elektronen schon eine gewisse Energie im Metall besitzen, welche der Fermi-Dirac-Statistik gehorcht.

Der negative Photostrom kommt zustande, da Teile der Photokathode schon bei 20°C merklich verdampfen und sich auf der Anode absetzen. Somit werden auch an der Anode Photoelektronen ausgelöst. Bei hinreichend großer Gegenspannnug werden die Elektronen dann in Richtung Kathode beschleunigt. Da es sich hierbei jedoch um wesentlich weniger Elektronen handelt als aus der Kathode ausgelöst werden, wird der Sättigungswert bereits viel früher erreicht.

Da der negative Strom bereits bei energiearmen Licht auftritt, kann man folgern, dass das Anoden-Material eine sehr niedrige Austrittsarbeit besitzt. Da die Apparatur schon einige Jahre zum Einsatz kommt, dürfte mittlerweile die ursprüngliche Anode vollständig mit dem Kathodenmaterial bedeckt sein, so dass nun effektiv beide Elektroden die gleiche Austrittsarbeit haben.

5 Anhang

Literatur

[1] Finke Skript, Versuchsanleitungen zum Anfänger-Praktikum in Physik Band 2 (Versuch Nr.500 und Versuch Nr.504) - *26. Auflage, 2002*

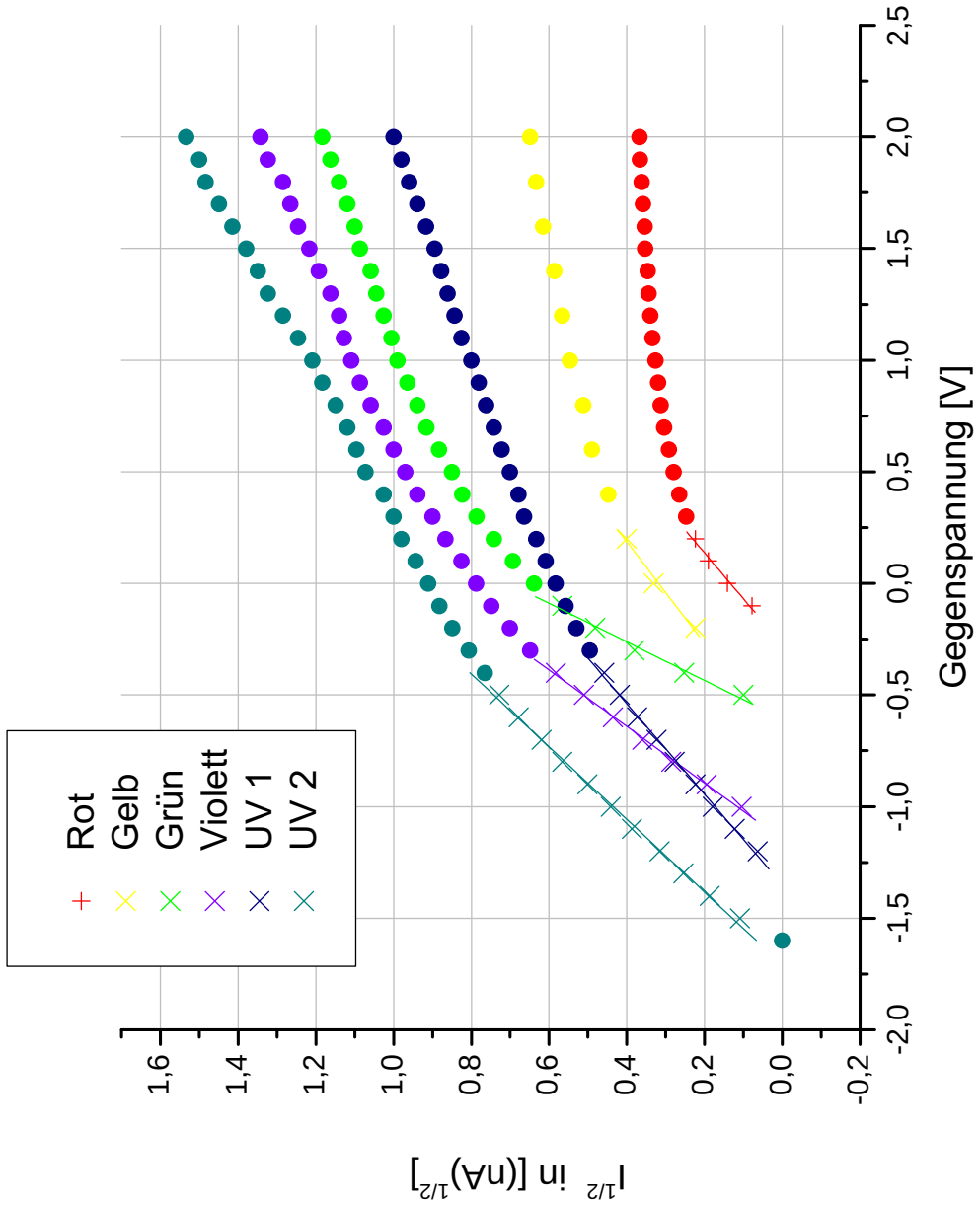


Abbildung 6: Darstellung des $\sqrt{I}$-Gesetzes

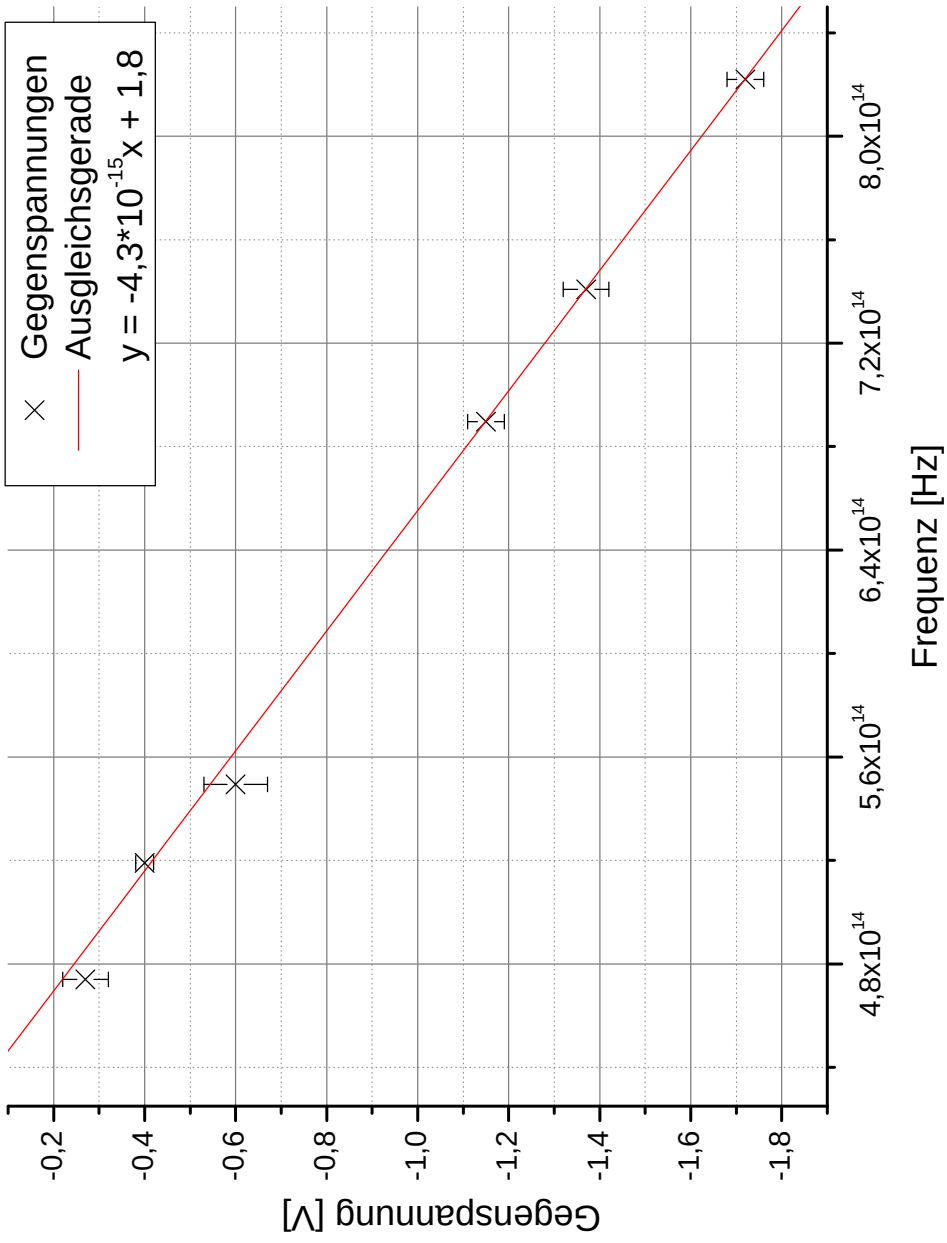


Abbildung 7: Die Gegenspannungen gegen die Lichtfrequenz

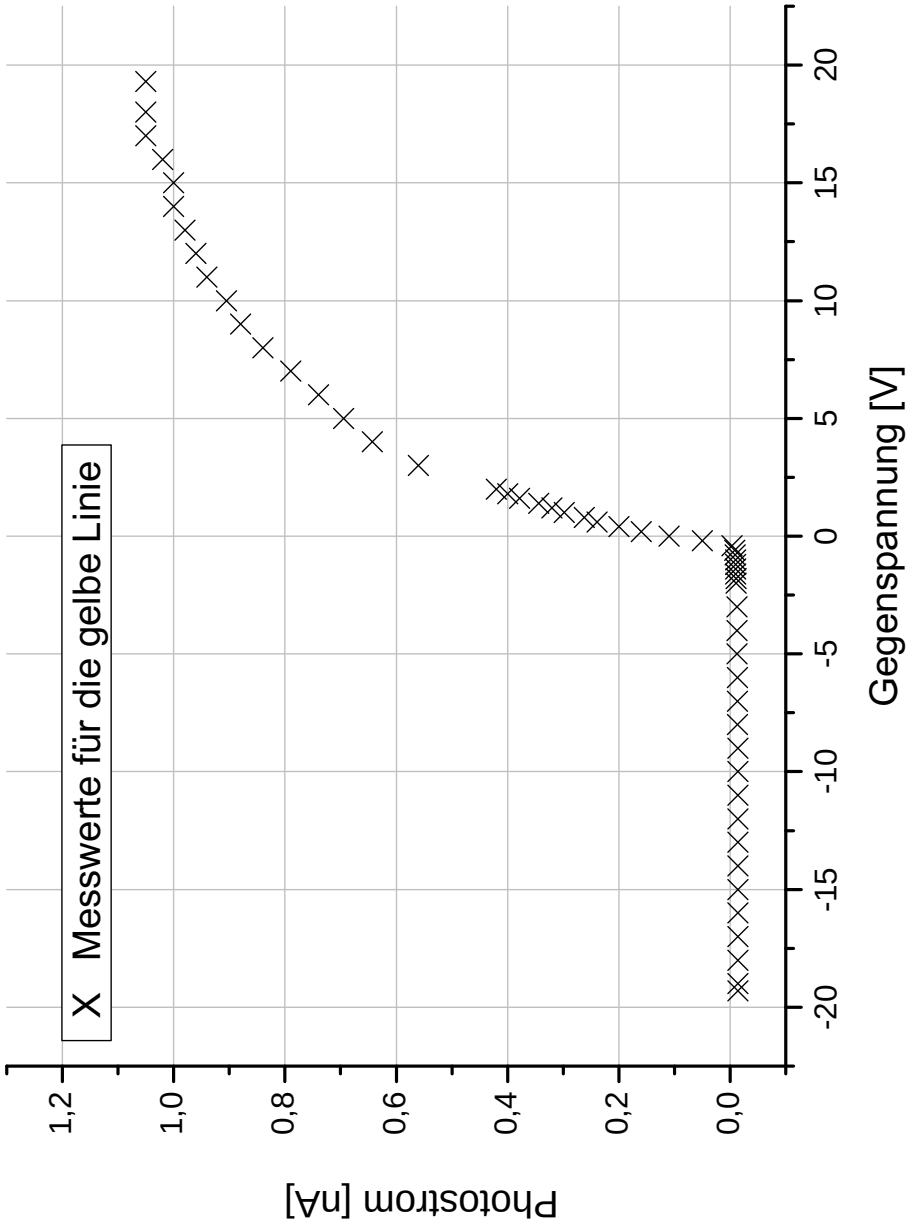


Abbildung 8: Verlauf der Strom-Spannungskurve für die gelbe Linie

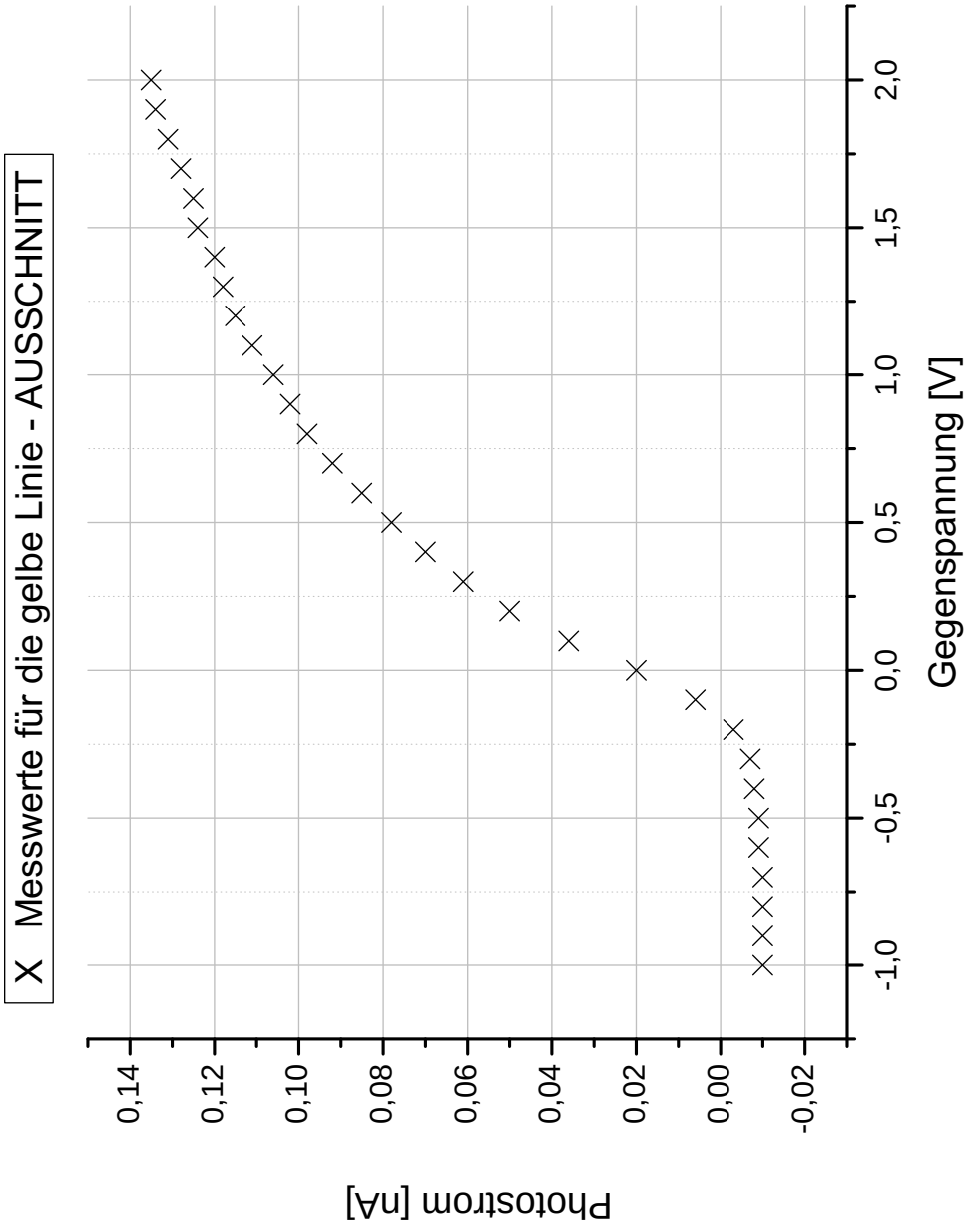


Abbildung 9: Ausschnitt aus dem Verlauf der Strom-Spannungskurve für die gelbe Linie

Beschl. Spannung [V]	I_{photo} von rot [nA]	I_{photo} von grün [nA]	I_{photo} von violett [nA]	I_{photo} von UV1 [nA]	I_{photo} von UV2 [nA]
2,0	0,135	1,400	1,8000	1,000	2,350
1,9	0,134	1,350	1,7500	0,960	2,250
1,8	0,131	1,300	1,6500	0,920	2,200
1,7	0,128	1,250	1,6000	0,880	2,100
1,6	0,125	1,210	1,5500	0,840	2,000
1,5	0,124	1,180	1,4800	0,800	1,900
1,4	0,120	1,120	1,4200	0,770	1,820
1,3	0,118	1,090	1,3500	0,740	1,750
1,2	0,115	1,050	1,3000	0,710	1,650
1,1	0,111	1,010	1,2700	0,680	1,550
1,0	0,106	0,980	1,2300	0,640	1,460
0,9	0,102	0,930	1,1800	0,610	1,400
0,8	0,098	0,880	1,1200	0,580	1,320
0,7	0,092	0,838	1,0500	0,550	1,250
0,6	0,085	0,780	1,0000	0,520	1,200
0,5	0,078	0,722	0,9400	0,490	1,150
0,4	0,070	0,677	0,8800	0,460	1,050
0,3	0,061	0,618	0,8100	0,440	1,000
0,2	0,050	0,550	0,7500	0,400	0,960
0,1	0,036	0,480	0,6800	0,370	0,890
0,0	0,020	0,408	0,6200	0,340	0,830
-0,1	0,006	0,320	0,5600	0,310	0,778
-0,2	-0,003	0,232	0,4900	0,280	0,720
-0,3	-0,007	0,145	0,4200	0,245	0,650
-0,4	-0,008	0,064	0,3400	0,210	0,585
-0,5	-0,009	0,010	0,2600	0,175	0,530
-0,6	-0,009	-0,014	0,1900	0,140	0,460
-0,7	-0,010	-0,022	0,1300	0,105	0,383
-0,8	-0,010	-0,025	0,0820	0,077	0,320
-0,9	-0,010	-0,026	0,0380	0,050	0,252
-1,0	-0,010	-0,027	0,0110	0,032	0,195
-1,1	-0,010	-0,028	-0,0060	0,015	0,150
-1,2	-0,010	-0,028	-0,0014	0,004	0,100
-1,3	-0,010	-0,028	-0,0018	-0,003	0,065
-1,4	-0,010	-0,029	-0,0200	-0,007	0,035
-1,5	-0,010	-0,029	-0,0220	-0,009	0,012
-1,6	-0,010	-0,029	-0,0240	-0,010	0,000
-1,7	-0,010	-0,030	-0,0240	-0,011	-0,008
-1,8	-0,010	-0,030	-0,0240	-0,012	-0,012
-1,9	-0,010	-0,030	-0,0250	-0,012	-0,015
-2,0	-0,010	-0,030	-0,0250	-0,013	-0,018

Tabelle 3: Gemessener Photostrom bei verschiedenen Wellenlängen

Beschl. Spannung V	I_{photo} von gelb [nA]	Beschl. Spannung [V]	I_{photo} von gelb [nA]
19,300	1,050	-0,200	0,050
18,000	1,050	-0,400	-0,003
17,000	1,050	-0,600	-0,008
16,000	1,020	-0,800	-0,009
15,000	1,000	-1,000	-0,010
14,000	1,000	-1,200	-0,010
13,000	0,980	-1,400	-0,010
12,000	0,960	-1,600	-0,010
11,000	0,940	-1,800	-0,011
10,000	0,905	-2,000	-0,011
9,000	0,880	-3,000	-0,012
8,000	0,840	-4,000	-0,012
7,000	0,790	-5,000	-0,012
6,000	0,740	-6,000	-0,013
5,000	0,695	-7,000	-0,013
4,000	0,643	-8,000	-0,013
3,000	0,560	-9,000	-0,014
2,000	0,420	-10,000	-0,014
1,800	0,400	-11,000	-0,014
1,600	0,378	-12,000	-0,014
1,400	0,344	-13,000	-0,014
1,200	0,320	-14,000	-0,014
1,000	0,298	-15,000	-0,014
0,800	0,262	-16,000	-0,014
0,600	0,239	-17,000	-0,014
0,400	0,200	-18,000	-0,014
0,200	0,160	-19,000	-0,014
0,000	0,110	-19,300	-0,014

Tabelle 4: Gemessener Photostrom von -20 bis +20 Volt bei Gelb