



GRUNDPRAKTIKUM

---

# A1: Äußerer Photoeffekt

---

*Autor:*

■■■■■■■■■■

*Partner:*

■■■■■■■■■■

Versuchsdatum: ■■■■■■

Versuchsplatz: ■■■■■■■■■■

Abgabedatum: ■■■■■■

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Physikalische Grundlagen und Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Messwerte und Auswertung</b>	<b>2</b>
2.1	Untersuchung der Diodenkennlinie . . . . .	2
2.2	Bestimmung von $h$ und $\Phi_A$ durch die Einsteingerade . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Fehleranalyse und kritische Ergebniseinschätzung</b>	<b>7</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>8</b>

# 1 Physikalische Grundlagen und Aufgabenstellung

Im Versuch A1 soll mit Hilfe einer Ng-Spektrallampe und einer Photodiode der Photoeffekt physikalisch diskutiert und zur Bestimmung einiger Konstanten verwendet werden. Detaillierte Ausführungen zu den physikalischen Hintergründen und dem Versuchsaufbau können dem Skript entnommen werden [Müller 2012].

Im ersten Experiment wurde die Kennlinie der Photodiode für eine Wellenlinie von 579nm bei Gegenspannungen zwischen -15 und +60V ausgemessen und physikalisch diskutiert. Das zweite Experiment nutzt den äußeren Photoeffekt, um mit Hilfe der Gleichung

$$e \cdot U_{g,max} = h \cdot \nu - e \cdot \Phi_A \quad (1)$$

aus der mit der Gegenfeldmethode ermittelten maximalen Gegenspannung  $U_{g,max}$  und der bekannten Frequenz  $\nu$  das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  sowie die Austrittsarbeit der Anode  $\Phi_A$  zu berechnen.

## 2 Messwerte und Auswertung

### 2.1 Untersuchung der Diodenkennlinie

Für die Messung der Diodenkennlinie wurde gelbes Hg-Spektrallicht ( $\lambda = 579nm$ ) gewählt, wobei der gesamte vom Netzteil zur Verfügung gestellte Bereich von -15 bis 60V zur Erzeugung der Gegenspannung  $U_g$  genutzt wurde. Der Abstand zwischen zwei Messungen wurde variiert, um ausgezeichnete Bereiche der Kennlinie, insbesondere um den Nullpunkt, experimentell besser zu erfassen. Das vollständige Messdatenprotokoll befindet sich im Anhang.

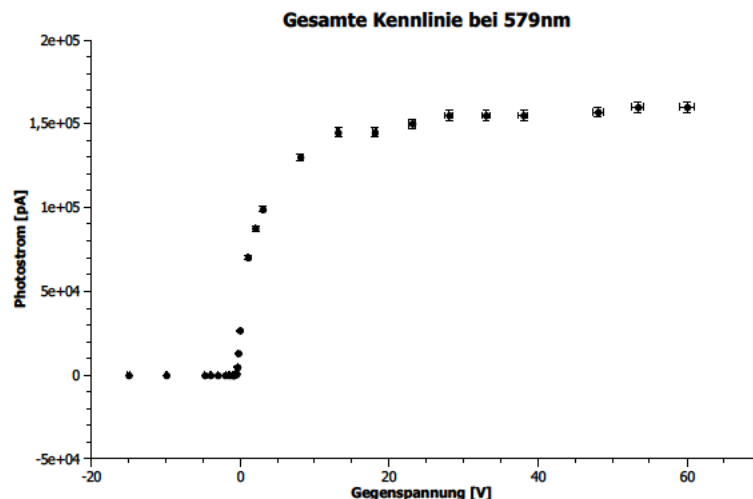


Abbildung 1: Vollständige Kennlinie für  $\lambda = 579nm$

Die Bestimmung der Messunsicherheiten spielt für die qualitative physikalische Diskussion der Kennlinie nur eine untergeordnete Rolle. Da nur eine Messreihe aufge-

nommen wurde, sind statistische Fehler auch gar nicht zu bestimmen. Die angegebenen Fehlerbalken beziehen sich somit ausschließlich auf die systematische Unsicherheit die aus der Geräteverwendung herrührt. Für die Spannungsmessung wurde ein Digitalvoltmeter vom Typ VC-10 der Firma Voltcraft verwendet, das im verwendeten Bereich eine Unsicherheit von  $u_U = (\pm 1\% + 3 \text{ dgt})V$  aufweist. Der Photostrom, im unteren Gegenspannungsbereich nur wenige Pikoampère groß, wurde mit Hilfe des Präzisionsampèremeters MV-40 gemessen. Die grundlegende Messunsicherheit betrug hier  $u_I = \pm 1,5\%$  vom Skalenmaximum, und eine zusätzliche absolute Unsicherheit von  $\pm 0,3 \text{ pA}$  für Messungen im Pikoampère-Bereich.

Wie Abb. 1 zeigt weicht die Kennlinie real von der idealen theoretischen Form ab: statt einer Rechteckfunktion, die erst konstant bei Null verharret, und dann ab  $U_{g,max}$  einen annähernd konstanten positiven Wert annimmt, findet man einen geglätteten Kurvenverlauf. Bei Gegenspannungen unter einem bestimmten Wert verharret der Photostrom im leicht negativen Bereich. Der Photostrom beginnt dann aber ab etwa -1V exponentiell zu wachsen. Die Kurve geht dann schließlich im Bereich jenseits von +15V Gegenspannung in eine Gerade über.

Physikalisch lässt sich der reale Verlauf wie folgt deuten: bei negativer Gegenspannung herrscht ein elektrisches Gegenfeld, d.h. die Elektronen, die aus der Kathode herausgeschlagen werden, müssen nicht nur die Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode, sondern auch noch das so erzeugte elektrische Feld durchlaufen. Trotz Lichteinfall haben die Elektronen also nicht genug Energie für die gesamte Strecke. Das der gemessene Photostrom nicht exakt bei 0 liegt lässt sich auf Verunreinigungen der Anode und die Unschärfe der Fermikante bei Raumtemperatur zurückführen (siehe Skript), es finden also immer vereinzelte Elektronen ihren Weg zum Sensor. Effektiv verschiebt sich die Kennlinie etwas nach unten, wodurch sich die Kurve für hohe negativen Spannungen asymptotisch an einen Sättigungsstrom kleiner 0 annähert, und der Nulldurchgang des Photostroms nicht mehr bei  $U_g = 0$  stattfindet.

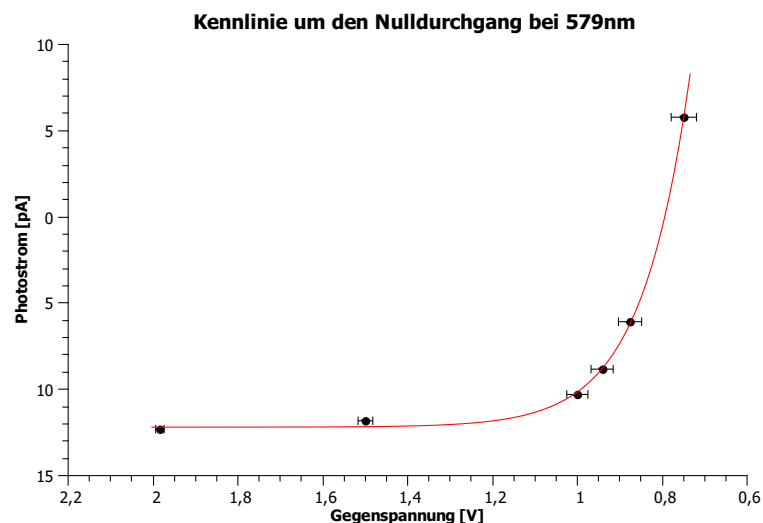


Abbildung 2: Ausschnitt der Kennlinie für  $\lambda = 579 \text{ nm}$

Der erwähnte Punkt, bei dem  $U_{g,max}$  erreicht ist und der Photostrom schließlich deutlich wächst, wurde durch genauere Messungen im relevanten Bereich näher eingegrenzt. Die Abb. 2 zeigt eine Detailaufnahme des Intervalls zwischen -2 und -0,6V, durch die der Wechsel vom annähernd geraden Verlauf zur starken Steigung deutlich wird.

Hier haben nun die ausgeschlagenen Elektronen genug Energie, den Potentialberg und das von der Gegenspannung aufgebaute (nunmehr deutlich schwächere) elektrische Feld zu überwinden. Eine Sättigung - und somit Abnahme der Kurvensteigung - tritt erst ein, wenn praktisch alle verfügbaren Elektronen im Kathodenmaterial von Photonen ausgeschlagen werden. Die angelegte Spannung wirkt nun auch nicht mehr bremsend, so dass nahezu alle ausgeschlagenen Elektronen auch vom Ampèremeter registriert werden. Die Kurve geht also in den in Abb. 1 beobachteten Linienverlauf für hohe positive Spannungen über.

## 2.2 Bestimmung von $h$ und $\Phi_A$ durch die Einsteingerade

Über den in Gleichung (1) dargestellten Zusammenhang kann der Photoeffekt genutzt werden, um  $h$  und  $\Phi_A$  durch eine lineare Regression zu bestimmen. Dazu soll zuerst die wellenlängenabhängige maximale Gegenspannung der Diode ermittelt werden. Da eine direkte Messung der Gegenspannung aus dem Nulldurchgang der Kennlinie aus verschiedenen Gründen unmöglich bzw. unpraktikabel ist (vgl. Skript), wird auf eine indirekte Bestimmung zurückgegriffen.

Im ersten Schritt wurden die Kennlinien der Photodiode unter einfallendem Licht bei sechs verschiedenen Wellenlängen in einem Intervall um den vermuteten Wert von  $U_{g,max}$  aufgenommen. Dazu wurden pro Wellenlänge zwei verschiedene Intensitäten mit Hilfe des Graufilters eingestellt und je 10-15 Messungen durchgeführt. Die Unsicherheiten der Spannungs- und Strommessungen ergibt sich dabei wie im vorigen Versuch aus der systematischen Unsicherheit der Messgeräte.

Nun wurde die im Skript erwähnte Beziehung verwendet, um den Schnittpunkt der je zwei Kennlinien pro Wellenlänge zu errechnen. Die Ausgangsformel:

$$I_{ph} = I_{sat} \cdot e^{\left(\frac{U-U_0}{\eta \cdot U_T}\right)} - I_{sat} \quad (2)$$

wurde dabei bis um einen aus einer graphischen Darstellung (siehe Anhang) abgeleiteten, vermuteten Schnittpunkt  $x_0$  in eine Taylorreihe bis zur ersten Ordnung entwickelt. Der reale Schnittpunkt der Kennlinien ergibt sich dann durch das Umstellen und Gleichsetzen, was die folgende Beziehung für den Wert  $U_{g,max}$  liefert:

$$x = U_{g,max} = \frac{\left[ I_{sat} \cdot e^{\left(\frac{x_0-U_0}{\eta \cdot U_T}\right)} - I_{sat} \right]^{(n)} - \left[ I_{sat} \cdot e^{\left(\frac{x_0-U_0}{\eta \cdot U_T}\right)} - I_{sat} \right]^{(h)}}{\left[ \frac{I_{sat}}{\eta \cdot U_T} \cdot e^{\left(\frac{x_0-U_0}{\eta \cdot U_T}\right)} - I_{sat} \right]^{(h)} - \left[ \frac{I_{sat}}{\eta \cdot U_T} \cdot e^{\left(\frac{x_0-U_0}{\eta \cdot U_T}\right)} - I_{sat} \right]^{(n)}} - x_0 \quad (3)$$

Die Markierung mit  $(h/n)$  dient der Übersichtlichkeit: sie zeigt an, wann sich die in der Klammer stehenden Symbole auf die Messreihe mit hoher Intensität ( $h$ ) oder

mit niedriger Intensität ( $n$ ) beziehen. In der Formel bezeichnet  $I_{sat}$  den Sättigungsstrom und  $U_0$  die Spannung am Nulldurchgang. Die Werte für  $I_{sat}$  und  $U_0$  wurden aus dem Kurvenverlauf abgeschätzt, im Falle von  $I_{sat}$  als derjenige Wert für den Photostrom  $I_{ph}$ , an den sich die Kurve bei hohen negativen Spannungen annähert. Der Normierungsfaktor  $\eta \cdot U_T$  wurde über eine nicht-lineare Regression der einzelnen Messreihen mit der Funktion (2), wobei die Schätzwerte für  $I_{sat}$  und  $U_0$  jeweils eingesetzt wurden, berechnet. Verwendet wurde das Softwarepaket *QtiPlot*.

Tabelle 1: Berechnung von  $U_{g,max}$

Wellenlänge	<b>579,0670nm</b>				<b>546,0750nm</b>			
Intensität	hoch		niedrig		hoch		niedrig	
$I_{sat}$ [pA]	12,300	$\pm 0,485$	6,500	$\pm 0,398$	32,000	$\pm 0,780$	17,500	$\pm 0,563$
$U_0$ [V]	-0,800	$\pm 0,028$	-0,780	$\pm 0,028$	-0,920	$\pm 0,026$	-0,910	$\pm 0,026$
$\eta \cdot U_T$ [V]	0,123	$\pm 0,006$	0,090	$\pm 0,006$	0,113	$\pm 0,001$	0,096	$\pm 0,004$
$x_0$ [V]	-0,83				-0,93			
$U_{g,max}$ [V]	$-0,83 \pm 0,07$				$-0,92 \pm 0,07$			
Wellenlänge	<b>491,6328nm</b>				<b>435,8335nm</b>			
Intensität	hoch		niedrig		hoch		niedrig	
$I_{sat}$ [pA]	1,800	$\pm 0,327$	1,000	$\pm 0,315$	34,000	$\pm 0,810$	20,000	$\pm 0,600$
$U_0$ [V]	-1,100	$\pm 0,024$	-1,000	$\pm 0,025$	-1,400	$\pm 0,019$	-1,300	$\pm 0,021$
$\eta \cdot U_T$ [V]	0,125	$\pm 0,003$	0,103	$\pm 0,001$	0,150	$\pm 0,006$	0,120	$\pm 0,002$
$x_0$ [V]	-1,17				-1,50			
$U_{g,max}$ [V]	$-1,16 \pm 0,06$				$-1,50 \pm 0,03$			
Wellenlänge	<b>404,6565nm</b>				<b>365,0158nm</b>			
Intensität	hoch		niedrig		hoch		niedrig	
$I_{sat}$ [pA]	19,500	$\pm 0,593$	13,500	$\pm 0,503$	8,000	$\pm 0,420$	7,600	$\pm 0,414$
$U_0$ [V]	-1,700	$\pm 0,015$	-1,600	$\pm 0,016$	-1,900	$\pm 0,012$	-1,900	$\pm 0,012$
$\eta \cdot U_T$ [V]	0,202	$\pm 0,005$	0,162	$\pm 0,002$	0,177	$\pm 0,008$	0,206	$\pm 0,005$
$x_0$ [V]	-1,86				-1,90			
$U_{g,max}$ [V]	$-1,86 \pm 0,03$				$-1,90 \pm 0,08$			

Die systematischen Unsicherheiten von  $I_{sat}$  und  $U_0$  wurden mit den Gerätefehlern analog zu oben abgeschätzt. Die Unsicherheit für  $\eta \cdot U_T$  ergibt sich aus dem statistischen Fehler der verwendeten Regression. Für  $x_0$ , das ja lediglich den geschätzten Stützwert für die Taylorentwicklung darstellt, wurde auf eine separate Fehlerberechnung verzichtet. Die Unsicherheit für die ermittelten Werte für  $U_{g,max}$  wurde letztlich durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes ermittelt, wobei die Gleichung (3) nach den unabhängigen Variablen  $U_0$ ,  $I_{sat}$  und  $\eta \cdot U_T$ , jeweils separat für hohe und niedrige Intensität ( $h/n$ ), abgeleitet wurde. Aufgrund der Unübersichtlichkeit und Fehleranfälligkeit wurde die Ableitung mit Hilfe des Softwarepakets *Maxima* durchgeführt.

Schließlich können die so gewonnenen Werte für  $U_{g,max}$  im Zusammenhang (2) einer linearen Regression unterzogen werden, um  $h$  und  $\Phi_A$  zu bestimmen. Dazu wird  $U_{g,max}$  mit der Elementarladung  $e$  multipliziert und gegen die verwendete Frequenz  $\nu$  aufgetragen. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Es ergibt sich die sogenannte Einsteingerade, aus der  $h$  direkt als Steigung abgelesen werden kann. Die Austrittsarbeit  $W_A = e \cdot \Phi_A$  ergibt sich aus dem y-Achsenabschnitt, und durch den Zusammenhang  $W_A = h \cdot \nu_0$  kann auch die Grenzfrequenz der Anode  $\nu_0$  bestimmt werden. Die jeweiligen Fehler wurden aus der Regression entnommen, die wieder mit *QtiPlot* durchgeführt und mit der Methode "Instrumental" nach den

Tabelle 2: Bestimmung von  $h$  und  $\Phi_A$

$\nu$ [Hz]	$U_g \cdot e$ [eV]	$u_{U_g} \cdot e$ [eV]
5,18E+14	1,33E-19	1,06E-20
5,49E+14	1,48E-19	1,07E-20
6,10E+14	1,87E-19	8,90E-21
6,88E+14	2,41E-19	4,69E-21
7,41E+14	2,97E-19	5,17E-21
8,21E+14	3,04E-19	1,29E-20

Unsicherheiten für  $U_g \cdot e$  gewichtet wurde. Für  $\nu_0$  wurde der Fehler nach Formel (32) des blauen Skriptes abgeschätzt [Müller 2007].

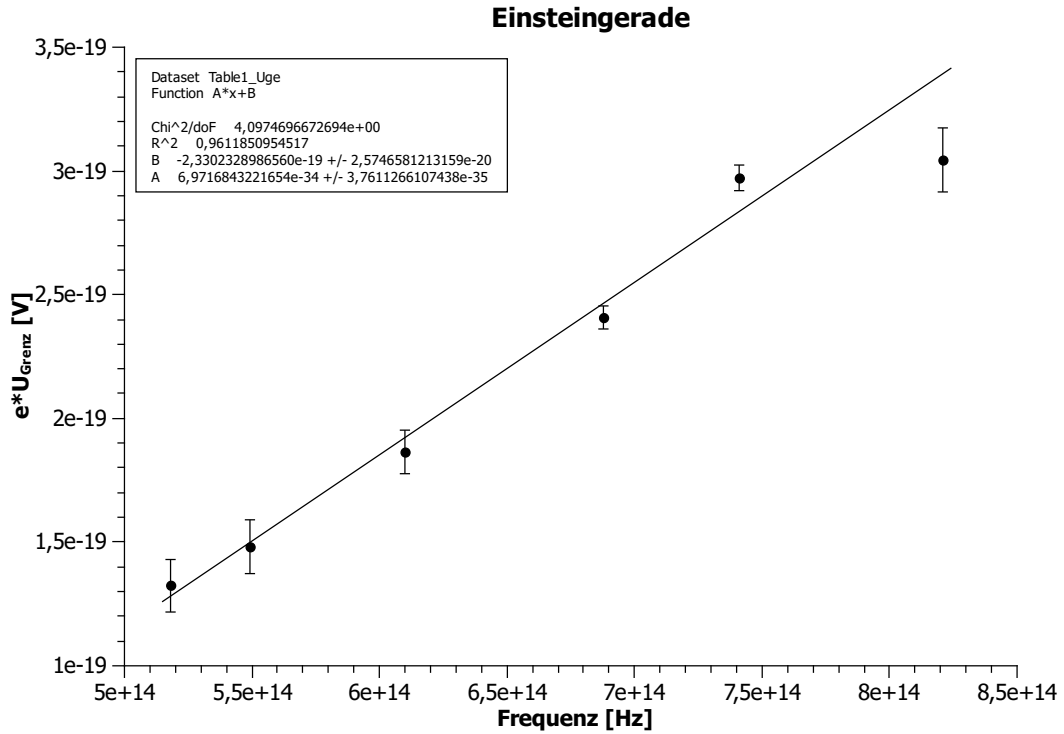


Abbildung 3: Bestimmung von  $h$  und  $\Phi_A$  mit der Einsteingerade

Die Ergebnisse des Versuchs lauten also:

$$\begin{aligned}
 h &= (6,97 \pm 0,38) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \\
 W_A &= (2,33 \pm 0,26) \times 10^{-19} \text{ J} \\
 \nu_0 &= (3,34 \pm 0,55) \times 10^{14} \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

### 3 Fehleranalyse und kritische Ergebniseinschätzung

Die Messergebnisse liegen für das Plancksche Wirkungsquantum sehr nah am Literaturwert ( $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ), der sich auch innerhalb der ermittelten Unsicherheit befindet. Die Grenzfrequenz der Anode, d.h. die geringste Frequenz, ab der dort Elektronen herausgeschlagen werden, ist wie erwartet etwas niedriger als die im Versuch verwendeten Frequenzen, was auf ein korrektes Ergebnis hindeutet. Die ermittelte Austrittsarbeit der Anode liegt ebenfalls in einem realistischen Rahmen. Der recht geringe Wert von umgerechnet etwa  $1,45 \text{ eV}$  deutet dabei auf die Verwendung einer bedampften Oberfläche bzw. einer Kombination verschiedener Materialien für die Anode hin, da die meisten Metalle allein größere Austrittsarbeiten haben.

Im Verlauf der Rechnungen wurde deutlich, dass die gefundenen Werte, insbesondere die Grenzspannungen  $U_{g,max}$  zum Teil nicht unerheblich von der Wahl der Anfangsparameter abhängen. Die Entscheidung, die Kennlinien mit der im Skript genannten Exponentialfunktion zu nähern sorgt zwar für genaue Ergebnisse und ein gutes Fitting, doch ist die Konvergenz der Funktion wie dort ebenfalls erwähnt recht kritisch. Es hat sich während der Berechnungen wiederholt gezeigt, dass insbesondere die Wahl des geschätzten Schnittpunktes  $x_0$  die Ergebnisse beeinflusst. Hier könnte z.B. eine iterative Berechnung der Parameter mit mehrmaliger Regression noch bessere Werte liefern.

### Literatur

- [Müller 2007] Müller, U. *Einführung in die Messung, Auswertung und Darstellung experimenteller Ergebnisse in der Physik*. 2007.
- [Müller 2012] Müller, U. *Physikalisches Grundpraktikum. Mechanik und Thermodynamik*. 2012.



# A Anhang

Tabelle 3: Vollständige Kennlinie bei 579nm

$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]	$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]
-1,22E+01	-1,50E+01	7,03E-01	-1,84E-01	7,00E+04	1,05E+00	1,26E+03	5,58E-02
-1,20E+01	-9,95E+00	6,96E-01	-1,09E-01	8,75E+04	2,03E+00	1,58E+03	7,05E-02
-1,18E+01	-4,79E+00	6,89E-01	-3,19E-02	9,90E+04	3,00E+00	1,78E+03	8,49E-02
-1,18E+01	-3,93E+00	6,89E-01	-1,90E-02	1,30E+05	8,07E+00	2,34E+03	1,61E-01
-1,17E+01	-2,94E+00	6,86E-01	-4,15E-03	1,45E+05	1,31E+01	2,61E+03	2,37E-01
-1,23E+01	-2,01E+00	7,06E-01	9,85E-03	1,45E+05	1,81E+01	2,61E+03	3,12E-01
-1,17E+01	-1,99E+00	6,86E-01	1,02E-02	1,50E+05	2,31E+01	2,70E+03	3,87E-01
-1,23E+01	-1,98E+00	7,06E-01	1,03E-02	1,55E+05	2,80E+01	2,79E+03	4,60E-01
-1,18E+01	-1,50E+00	6,89E-01	1,75E-02	1,55E+05	3,30E+01	2,79E+03	5,35E-01
-1,03E+01	-1,00E+00	6,40E-01	2,50E-02	1,55E+05	3,80E+01	2,79E+03	6,11E-01
-8,80E+00	-9,41E-01	5,90E-01	2,59E-02	1,57E+05	4,80E+01	2,83E+03	7,60E-01
-6,10E+00	-8,76E-01	5,01E-01	2,69E-02	1,60E+05	5,34E+01	2,88E+03	8,41E-01
5,80E+00	-7,49E-01	4,91E-01	2,88E-02	1,60E+05	6,00E+01	2,88E+03	9,40E-01
1,10E+02	-6,24E-01	3,93E+00	3,06E-02				
8,70E+02	-5,00E-01	1,57E+01	3,25E-02				
4,85E+03	-3,67E-01	8,73E+01	3,34E-02				
1,28E+04	-2,50E-01	2,30E+02	3,55E-02				
2,65E+04	-3,60E-03	4,77E+02	3,99E-02				

Tabelle 4: Messwerte und Fehler für 579nm und 546nm

579,067nm				546,075nm			
Hohe Intensität				Hohe Intensität			
$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]	$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]
-1,23E+01	-2,01E+00	7,06E-01	9,85E-03	-3,20E+01	-1,51E+00	1,36E+00	1,74E-02
-1,17E+01	-1,99E+00	6,86E-01	1,02E-02	-2,60E+01	-1,10E+00	1,16E+00	2,35E-02
-1,23E+01	-1,98E+00	7,06E-01	1,03E-02	-1,77E+01	-1,02E+00	8,84E-01	2,48E-02
-1,18E+01	-1,50E+00	6,89E-01	1,75E-02	3,45E+00	-9,09E-01	4,14E-01	2,64E-02
-1,03E+01	-1,00E+00	6,40E-01	2,50E-02	2,65E+01	-8,50E-01	1,17E+00	2,73E-02
-8,80E+00	-9,41E-01	5,90E-01	2,59E-02	5,85E+01	-8,04E-01	2,23E+00	2,79E-02
-6,10E+00	-8,76E-01	5,01E-01	2,69E-02	2,92E+02	-6,99E-01	9,94E+00	2,95E-02
5,80E+00	-7,49E-01	4,91E-01	2,88E-02	1,22E+03	-6,04E-01	2,20E+01	3,09E-02
1,10E+02	-6,24E-01	3,93E+00	3,06E-02	4,80E+03	-5,02E-01	8,64E+01	3,25E-02
8,70E+02	-5,00E-01	1,57E+01	3,25E-02	1,38E+04	-4,04E-01	2,48E+02	3,39E-02
4,85E+03	-3,67E-01	8,73E+01	3,34E-02	4,75E+04	-2,00E-01	8,55E+02	3,64E-02
1,28E+04	-2,50E-01	2,30E+02	3,55E-02	8,01E+04	-2,00E-03	1,44E+03	4,00E-02
2,65E+04	-3,60E-03	4,77E+02	3,99E-02	1,10E+05	1,97E-01	1,98E+03	4,35E-02
7,00E+04	1,05E+00	1,26E+03	5,58E-02				
Niedrige Intensität				Niedrige Intensität			
$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]	$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]
-6,50E+00	-2,85E+00	5,15E-01	-2,75E-03	5,90E+04	1,99E-01	1,06E+03	4,36E-02
-6,40E+00	-2,03E+00	5,11E-01	9,54E-03	4,35E+04	1,50E-02	7,83E+02	4,03E-02
-6,40E+00	-1,87E+00	5,11E-01	1,19E-02	2,60E+04	-2,00E-01	4,68E+02	3,64E-02
-6,30E+00	-1,51E+00	5,08E-01	1,73E-02	1,60E+04	-3,02E-01	2,88E+02	3,46E-02
-6,25E+00	-1,25E+00	5,06E-01	2,13E-02	7,90E+03	-4,02E-01	1,42E+02	3,40E-02
-5,65E+00	-1,00E+00	4,86E-01	2,50E-02	2,75E+03	-4,99E-01	4,95E+01	3,25E-02
-4,60E+00	-9,16E-01	4,52E-01	2,63E-02	6,50E+02	-6,05E-01	1,17E+01	3,09E-02
-1,10E+00	-8,04E-01	3,36E-01	2,79E-02	1,50E+02	-7,02E-01	5,25E+00	2,95E-02
6,10E+00	-7,23E-01	5,01E-01	2,92E-02	3,05E+01	-8,04E-01	1,31E+00	2,79E-02
4,30E+02	-5,06E-01	7,74E+00	3,24E-02	2,60E+00	-9,00E-01	3,86E-01	2,65E-02
4,40E+03	-3,03E-01	7,92E+01	3,45E-02	-8,50E+00	-9,98E-01	5,81E-01	2,50E-02
1,15E+04	-1,00E-01	2,07E+02	3,82E-02	-1,75E+01	-1,50E+00	8,78E-01	1,75E-02
1,45E+04	-5,00E-03	2,61E+02	3,99E-02				
2,00E+04	2,04E-01	3,60E+02	4,37E-02				
2,70E+04	5,02E-01	4,86E+02	4,75E-02				
3,20E+04	8,04E-01	5,76E+02	5,21E-02				
3,85E+04	1,26E+00	6,93E+02	5,88E-02				

Tabelle 5: Messwerte und Fehler für 492nm und 435nm

491,6328nm				435,8335nm			
Hohe Intensität				Hohe Intensität			
$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]	$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]
-1,75E+00	-2,50E+00	3,58E-01	2,44E-03	6,80E+03	-6,00E-01	1,22E+02	3,10E-02
-1,80E+00	-1,99E+00	3,59E-01	1,02E-02	3,70E+03	-7,01E-01	6,66E+01	2,95E-02
-1,70E+00	-1,50E+00	3,56E-01	1,75E-02	1,90E+03	-8,06E-01	3,42E+01	2,79E-02
7,50E-01	-9,92E-01	3,25E-01	2,51E-02	1,00E+03	-9,02E-01	1,80E+01	2,65E-02
3,80E+00	-9,02E-01	4,25E-01	2,65E-02	4,70E+02	-1,00E+00	8,46E+00	2,50E-02
1,35E+01	-8,04E-01	7,46E-01	2,79E-02	2,30E+02	-1,09E+00	7,89E+00	2,36E-02
4,00E+01	-7,05E-01	1,62E+00	2,94E-02	9,30E+01	-1,21E+00	3,37E+00	2,19E-02
7,10E+01	-6,49E-01	2,64E+00	3,03E-02	3,40E+01	-1,30E+00	1,42E+00	2,05E-02
1,25E+02	-5,93E-01	4,43E+00	3,11E-02	-7,40E+00	-1,49E+00	5,44E-01	1,76E-02
2,90E+02	-4,97E-01	5,22E+00	3,25E-02	-3,40E+01	-1,90E+00	1,42E+00	1,16E-02
8,00E+02	-4,00E-01	1,44E+01	3,40E-02				
9,50E+02	-3,03E-01	1,71E+01	3,45E-02				
1,35E+03	-2,01E-01	2,43E+01	3,64E-02				
1,75E+03	-9,80E-02	3,15E+01	3,82E-02				
2,05E+03	3,00E-04	3,69E+01	4,00E-02				
Niedrige Intensität				Niedrige Intensität			
$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]	$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]
0,00E+00	-1,01E+00	3,00E-01	2,49E-02	1,45E+04	-3,06E-01	2,61E+02	3,45E-02
6,40E+00	-8,01E-01	5,11E-01	2,80E-02	9,80E+03	-4,25E-01	1,76E+02	3,36E-02
1,90E+01	-7,08E-01	9,27E-01	2,94E-02	5,80E+03	-5,43E-01	1,04E+02	3,19E-02
5,80E+01	-6,01E-01	2,21E+00	3,10E-02	3,10E+03	-6,58E-01	5,58E+01	3,01E-02
1,42E+02	-5,03E-01	4,99E+00	3,25E-02	2,20E+03	-7,12E-01	3,96E+01	2,93E-02
2,10E+02	-4,47E-01	3,78E+00	3,33E-02	1,60E+03	-7,58E-01	2,88E+01	2,86E-02
3,00E+02	-3,93E-01	1,02E+01	3,29E-02	1,25E+03	-8,01E-01	2,25E+01	2,80E-02
3,60E+02	-3,54E-01	6,48E+00	3,36E-02	9,70E+02	-8,37E-01	1,75E+01	2,74E-02
4,70E+02	-3,01E-01	8,46E+00	3,46E-02	6,00E+02	-9,04E-01	1,08E+01	2,64E-02
6,90E+02	-2,01E-01	1,24E+01	3,64E-02	2,90E+02	-1,01E+00	9,87E+00	2,49E-02
8,60E+02	-1,04E-01	1,55E+01	3,81E-02				
1,05E+03	5,00E-03	1,89E+01	4,01E-02				

Tabelle 6: Messwerte und Fehler für 405nm und 365nm

404,6565nm				365,0158nm			
Hohe Intensität				Hohe Intensität			
$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]	$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]
-1,95E+01	-2,00E+00	9,44E-01	-1,60E+00	-8,00E+00	-2,05E+00	5,64E-01	9,22E-03
-5,90E+00	-1,71E+00	4,95E-01	1,43E-02	1,75E+01	-1,73E+00	8,78E-01	1,40E-02
2,90E+02	-1,14E+00	5,22E+00	2,29E-02	7,80E+01	-1,54E+00	2,87E+00	1,70E-02
5,20E+02	-1,05E+00	9,36E+00	2,43E-02	8,00E+02	-1,32E+00	1,44E+01	2,02E-02
8,80E+01	-1,32E+00	3,20E+00	2,03E-02	7,00E+02	-1,11E+00	1,26E+01	2,34E-02
2,10E+02	-1,19E+00	7,23E+00	2,22E-02	1,10E+03	-1,00E+00	1,98E+01	2,50E-02
3,40E+02	-1,12E+00	6,12E+00	2,33E-02	1,40E+03	-9,36E-01	2,52E+01	2,60E-02
6,30E+02	-1,01E+00	1,13E+01	2,48E-02	2,00E+03	-8,25E-01	3,60E+01	2,76E-02
1,15E+03	-9,01E-01	2,07E+01	2,65E-02	2,60E+03	-7,08E-01	4,68E+01	2,94E-02
1,95E+03	-7,99E-01	3,51E+01	2,80E-02	3,60E+03	-6,04E-01	6,48E+01	3,09E-02
Niedrige Intensität				Niedrige Intensität			
$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]	$I_{ph}$ [pA]	$U_g$ [V]	$u_I$ [pA]	$u_U$ [V]
1,35E+01	-1,51E+00	7,46E-01	1,74E-02	-7,60E+00	-2,22E+00	5,51E-01	6,70E-03
3,15E+01	-1,41E+00	1,34E+00	1,89E-02	-5,90E+00	-2,15E+00	4,95E-01	7,75E-03
6,30E+01	-1,31E+00	2,38E+00	2,04E-02	-4,60E+00	-2,05E+00	4,52E-01	9,25E-03
1,40E+02	-1,21E+00	4,92E+00	2,19E-02	7,00E-01	-1,91E+00	3,23E-01	1,14E-02
2,85E+02	-1,10E+00	9,71E+00	2,35E-02	2,70E+00	-1,82E+00	3,89E-01	1,28E-02
5,00E+02	-1,00E+00	9,00E+00	2,49E-02	1,01E+01	-1,71E+00	6,33E-01	1,44E-02
8,40E+02	-9,09E-01	1,51E+01	2,64E-02	2,55E+01	-1,59E+00	1,14E+00	1,61E-02
1,40E+03	-8,09E-01	2,52E+01	2,79E-02	5,00E+01	-1,50E+00	1,95E+00	1,75E-02
2,30E+03	-7,07E-01	4,14E+01	2,94E-02	1,04E+02	-1,38E+00	3,73E+00	1,93E-02
3,40E+03	-6,03E-01	6,12E+01	3,10E-02	3,50E+02	-1,11E+00	6,30E+00	2,33E-02