

Versuch 81: Bestimmung von h mit dem Photoeffekt

Physikalisches Institut

Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg

Physiklabor für Anfänger*innen

eingereicht von:

[REDACTED]

Gruppe 14b & 15b

Datum: 09.03.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsbeschreibung	3
1.1	Ziel des Versuchs	3
1.2	Physikalische Grundlagen	3
1.3	Versuchsaufbau	5
1.4	Versuchsdurchführung	5
2	Auswertung	7
2.1	Bestimmung der Wellenlängen	7
2.2	Strom-Spannungs-Kennlinie für verschiedene Intensitäten	7
2.3	Strom-Spannungs-Kennlinie für verschiedene Frequenzen und Bestimmung der Grenzspannung	9
2.4	Bestimmung von h	12
3	Zusammenfassung und Diskussion	14
4	Abbildungen	16
5	Tabellen	16
6	Literatur	16
7	Anhang	17

1 Versuchsbeschreibung

1.1 Ziel des Versuchs

Ziel des Versuchs ist die Untersuchung einer Photozelle, indem die Strom-Spannungs-Kennlinie für verschiedene Frequenzen und Intensitäten betrachtet wird. Dazu gilt es, zuerst die Wellenlängen der verwendeten LEDs zu bestimmen.

1.2 Physikalische Grundlagen

Wellen und Teilchencharakter von Licht

Licht wird in der klassischen Physik als Welle betrachtet. Damit lassen sich viele Phänomene korrekt beschreiben und berechnen (Beugung, Interferenz). Der Teilchencharakter hingegen kam erst durch Entdeckung des Photoeffekts auf. Es stellte sich heraus, dass Licht nicht jeden beliebigen Energiewert annehmen kann, sondern nur Vielfache einer Konstanten, dem Planckschen Wirkungsquantum:

$$E = h\nu \quad (1.1)$$

Photoeffekt und das Potentialtopfmodell

Der äußere Photoeffekt beschreibt, dass Elektronen aus Metallen/Leitern herausgelöst werden, wenn diese mit elektromagnetischen Wellen bestrahlt werden (siehe Abbildung 1).

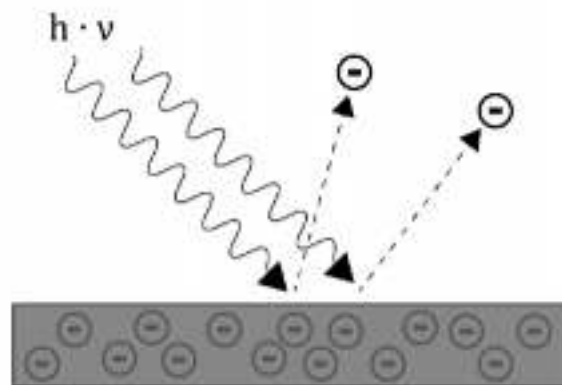


Abb. 1: Schematische Darstellung des äußeren Photoeffekts [1, S.3]

Metalle/Leiter haben in ihren Atomen Elektronen, die Leitungselektronen genannt werden. Diese Elektronen sind innerhalb des Metalls frei beweglich. Der Rest des Atoms (positiv geladen) ist fest in einer Gitterstruktur verankert. Diese Leitungselektronen haben eine gewisse Energie E_e , selbst bei $T = 0$. Für $T = 0$ können die Elektronen maximal $E_e = E_F$, die Fermienergie haben.

Die Fermienergie ist ein Resultat davon, dass Elektronen (Fermionen) nach dem Pauli Prinzip nur die gleiche Ortswellenfunktion innehaben können, wenn sie einen unterschiedlichen Spin besitzen ($\uparrow$, $\downarrow$). Das bedeutet, dass die energetischen Zustände, die ein Elektron einnehmen kann, von unten also vom Grundzustand nach oben, aufgefüllt werden. Wenn $T > 0$ ist können die Elektronen in dem Metall auch eine Energie $E_e > E_F$ besitzen, da sie durch die von Null verschiedene Temperatur zusätzlich zu ihrer Zustandsenergie eine thermische Energie erhalten.

Damit ein Elektron, das die Fermienergie besitzt, den Leiter verlassen kann, muss ihm mindestens die Energie ϕ hinzugefügt werden. Wenn das Elektron nicht auf Fermi Niveau war, muss

zusätzlich noch die Energie $E_F - E_e$ hinzugefügt werden. Wenn sogar noch mehr Energie als hier benötigt hinzugefügt werden, hat das austretende Elektron eine Energie E_{kin} . In Abbildung 2 sind die Zusammenhänge graphisch beschrieben.

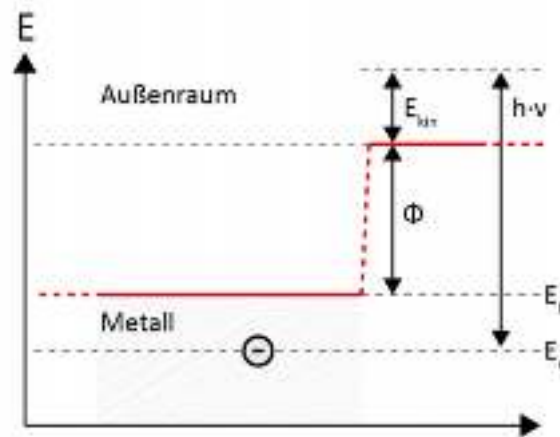


Abb. 2: Potentialtopfmodell [1, S.3]

Aus der Grafik lassen sich folgende Zusammenhänge leicht erkennen:

$$E_{\text{kin}} = h\nu - \phi - (E_F - E_e) \quad (1.2)$$

Wenn man nun nur Elektronen auf dem Fermi-niveau betrachtet folgt:

$$E_{\text{kin}} = h\nu - \phi. \quad (1.3)$$

Hieraus folgt die fundamentale Aussage des Photoeffektes. Nach Gleichung (1.3) sieht man, dass die Energie der austretenden Elektronen nicht von der Intensität des Lichtes, sondern nur von der Frequenz des Lichtes abhängt.

Die Wellenlänge λ hängt dabei über

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1.4)$$

mit der Frequenz f zusammen, wobei es sich bei c um die Lichtgeschwindigkeit handelt.

Gegenfeldmethode

In diesem Versuch wird die sogenannte Gegenfeldmethode zur Messung von E_{kin} benutzt. Dabei wird eine Kathode, die in einer kleinen Vakuumkammer gegenüber einer Anode steht, bestrahlt, sodass sich frei gelöste Elektronen von der Kathode zur Anode bewegen und sich ein Strom messen lässt. Legt man nun eine äußere Spannung an, sorgt dies je nach Richtung für eine Verstärkung oder Abschwächung des Feldes zwischen Anode und Kathode. Ersteres wird dabei als Saugspannung bezeichnet, Letzteres als Gegenspannung. Wirkt die Spannung entgegen der Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode, so kann diese langsam erhöht werden, um die Grenzspannung zu ermitteln, bei der kein Strom mehr fließt. An diesem Punkt ist die Energie des Gegenfeldes gleich der kinetischen Energie der austretenden Elektronen. Die Energie des Feldes ist $E = Ue$.

1.3 Versuchsaufbau

Bestimmung der Wellenlängen der Leuchtdioden

Zur Bestimmung der Wellenlängen der verwendeten LEDs wird ein Gitterspektrometer an einen PC angeschlossen, auf dem OceanView installiert ist. Vor das Spektrometer werden die jeweiligen Leuchtdioden gehalten, die mit einem Netzgerät betrieben werden.

Strom-Spannungs-Kennlinien der Photozelle

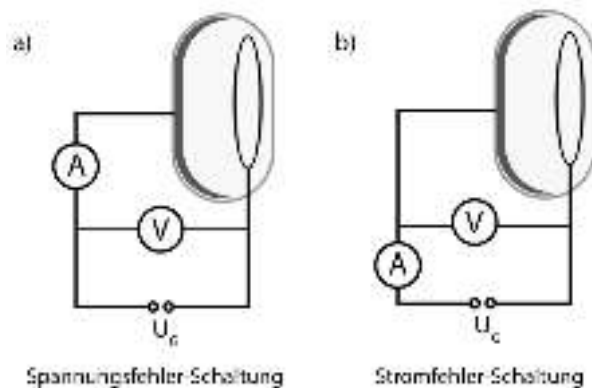


Abb. 3: Zwei Mögliche Schaltungen [1, S.7]

Eine Schaltung wird nach Abbildung 3 auf einem Schaltbrett aufgebaut, wobei hier die Stromfehler-Schaltung verwendet wurde. Die Diode wird dabei in einem Abstand d vor die Vakuumphotozelle positioniert. Die Spannung U_G wird von einem zweiten Netzgerät geliefert. Zur Messung von Strom und Spannung stehen zwei Digitalmultimeter und Kabel zur Verfügung.

1.4 Versuchsdurchführung

Bestimmung der Wellenlängen der Leuchtdioden

Zuerst werden für sieben unterschiedliche Dioden mit verschiedenen Wellenlängen mithilfe des Spektrometers die Wellenlänge bestimmt. Dafür ist das Spektrometer an einen PC angeschlossen, an dem mittels des Programms OceanView die Daten des Spektrometers graphisch angezeigt werden können. Mit der Cursorfunktion kann der höchste Punkt des angezeigten Peaks vermessen und die Wellenlänge angegeben werden. Hier ist nun zu beachten, dass die gemessenen Peaks eine gewisse Ausdehnung haben, da die Dioden nicht zu 100% monochromatisches Licht erzeugen. Dies ist besonders bei kleinen Wellenlängen (ca. 300 nm) relevant, da dort die Energie größer als bei großen Wellenlängen ist. Daher wird zusätzlich die Breite des Spektrums auf halber Höhe des Peaks notiert und später als Fehlerangabe verwendet.

Strom-Spannungs-Kennlinie der Photozelle für verschiedene Intensitäten bei fester Frequenz

Die Schaltung wird wie oben beschrieben aufgebaut. Als Lichtquelle wird die Diode mit einer Wellenlänge von 490 nm benutzt. Dabei wird zuerst qualitativ vorgegangen, um durch Beleuchtung der Photzelle durch die LED den richtigen Messbereich für die Multimeter festzulegen. Dabei muss die Gegenspannung ausgeschaltet sein. Anschließend wird der Zusammenhang zwischen dem Abstand der Diode von der Photozelle und der Intensität bzw. dem gemessenen Photostrom qualitativ untersucht sowie der Einfluss des Ggegenfeldes auf den gemessenen Strom betrachtet. Nun wird die Diode in einer Position auf dem Steckbrett befestigt, der Abstand

zwischen Diode und Photozelle notiert und während der Messung nicht mehr bewegt. Zur Messung wird bei der Gegenspannung ein Bereich von -4 bis 4 V abgedeckt und der resultierende Photostrom gemessen. Anschließend wird die Position der Diode verändert und die Messung analog durchgeführt. Insgesamt werden drei Messreihen durchgeführt.

Als nächstes Schalten wird zur Bestimmung des Stromfehler, der durch die Wahl der Schaltung entsteht, die Lichtquelle ausgeschaltet die Messung für die gleichen Gegenspannungen wie zuvor durchgeführt.

Es wurde dabei die Stromfehler-Schaltung verwendet, da durch eine zusätzliche Messreihe der Stromfehler leicht bestimmt werden kann. Mithilfe dieser Messung lassen sich die gemessenen Photoströme später korrigieren. Bei der Spannungsfehler-Schaltung wäre dies nicht so leicht möglich gewesen, da der Spannungsfehler komplizierter ist und nicht so leicht korrigiert werden kann.

Strom-Spannungs-Kennlinie für verschiedene Frequenzen und Bestimmung der Grenzspannung

Es wird wieder dieselbe Schaltung wie oben verwendet, wobei nicht mehr der Abstand und somit die Intensität verändert wird, sondern die Wellenlänge des Lichts. Dies geschieht durch die Verwendung einer anderen Diode. Dabei werden die zu Beginn vermessenen Dioden verwendet, deren Wellenlänge nun bekannt ist. Hier wird dabei lediglich mit einer Gegenspannung in einem Bereich von 0 bis -2 V gemessen, da es sich hierbei um den interessanten Teil des Verlaufs handelt, dafür aber in kleineren Abständen. Zuletzt wurde erneut der Stromfehler bestimmt, wobei hier die kleinere Schrittweite verwendet wurde. Da dies zuerst vergessen wurde, wurde diese Messreihe nachmittags nachgeholt.

2 Auswertung

2.1 Bestimmung der Wellenlängen

Die anfangs mithilfe des Gitterspektrometers bestimmten Wellenlängen können Tabelle 1 entnommen werden. Der dabei angegebene Fehler wurde aus der Breite des Spektrums bei halber Höhe des Peaks abgeschätzt.

LED	Wellenlänge λ [nm]	s_λ [nm]
380	379	5
430	430	6
490	502	14
515	525	11
600	605	6
660	655	7
740	741	23

Tab. 1: Gemessene Wellenlängen der LEDs

2.2 Strom-Spannungs-Kennlinie für verschiedene Intensitäten

Zuerst wurden qualitativ der Einfluss des Abstandes zwischen Photozelle und LED sowie die Auswirkungen der Gegenspannung auf den zu messenden Photostrom untersucht. Wird der Abstand zwischen Lichtquelle und Photozelle verkleinert, ist die Intensität größer und es fließt ein größerer Strom. Bei größer werdendem Abstand wird die Intensität immer geringer und der Strom kleiner.

Bei der Betrachtung des Gegenfelds fällt auf, dass dieses je nach Richtung einen verstärkenden oder abschwächenden Effekt hat. Verstärkt das Gegenfeld den Potentialunterschied zwischen Anode und Kathode, ist eine größere Stromstärke messbar. Wirkt es jedoch dieser Potentialdifferenz entgegen, nimmt der Strom immer weiter ab, bis ab einer gewissen anliegenden Spannung kein Strom mehr fließt. Bei der hier verwendeten Notation bezeichnet ein positives Vorzeichen eine die Potentialdifferenz verstärkende Spannung, genannt Saugspannung, während ein negatives Vorzeichen die Gegenspannung symbolisiert, die das Feld zwischen Kathode und Anode abschwächt.

Zur Ermittlung der Kennlinien wird zuerst der gemessene Stromfehler I_f , der durch die Schaltung des Amperemeters vor der Parallelschaltung von Voltmeter und Photozelle entsteht, von den notierten Photoströmen I' subtrahiert, sodass man den korrigierten Strom I erhält, der hier im Folgenden verwendet wird.

Die Messergebnisse des Versuchsteils mit konstanter Frequenz und verändertem Abstand, eingetragen in Tabelle 2, werden in ein Diagramm eingezeichnet, zu sehen in Abbildung 4. Dabei wird der Photostrom über der angelegten Spannung aufgetragen. Die Abstände haben die Werte $d_1 = (16,5 \pm 1)\text{cm}$, $d_2 = (11,6 \pm 0,1)\text{cm}$ und $d_3 = (6,5 \pm 0,1)\text{cm}$.

U [V]	I_{d_1} [μ A]	I_{d_2} [μ A]	I_{d_3} [μ A]
4,00	2,19	4,10	11,78
3,50	2,15	4,05	11,64
3,00	2,13	4,00	11,46
2,50	2,10	3,92	11,20
2,00	2,04	3,82	10,82
1,50	1,95	3,63	10,19
1,00	1,79	3,33	9,19
0,50	1,54	2,83	7,58
0,00	1,04	1,86	4,56
-0,25	0,63	1,15	2,99
-0,50	0,20	0,40	1,11
-0,75	0,02	0,03	0,08
-1,00	0,00	0,00	0,00
-1,50	-0,01	-0,01	-0,01
-2,00	0,00	0,00	0,00
-2,50	0,00	0,00	0,00
-3,00	0,00	0,00	0,00
-3,50	0,00	0,00	0,00
-4,00	0,00	0,00	0,00

Tab. 2: Werte der angelegten Spannung und des korrigierten Fotostroms für $d_1 = (16,5 \pm 1)\text{cm}$, $d_2 = (11,6 \pm 0,1)\text{cm}$ und $d_3 = (6,5 \pm 0,1)\text{cm}$

Kennlinien fuer verschiedene Intensitaeten

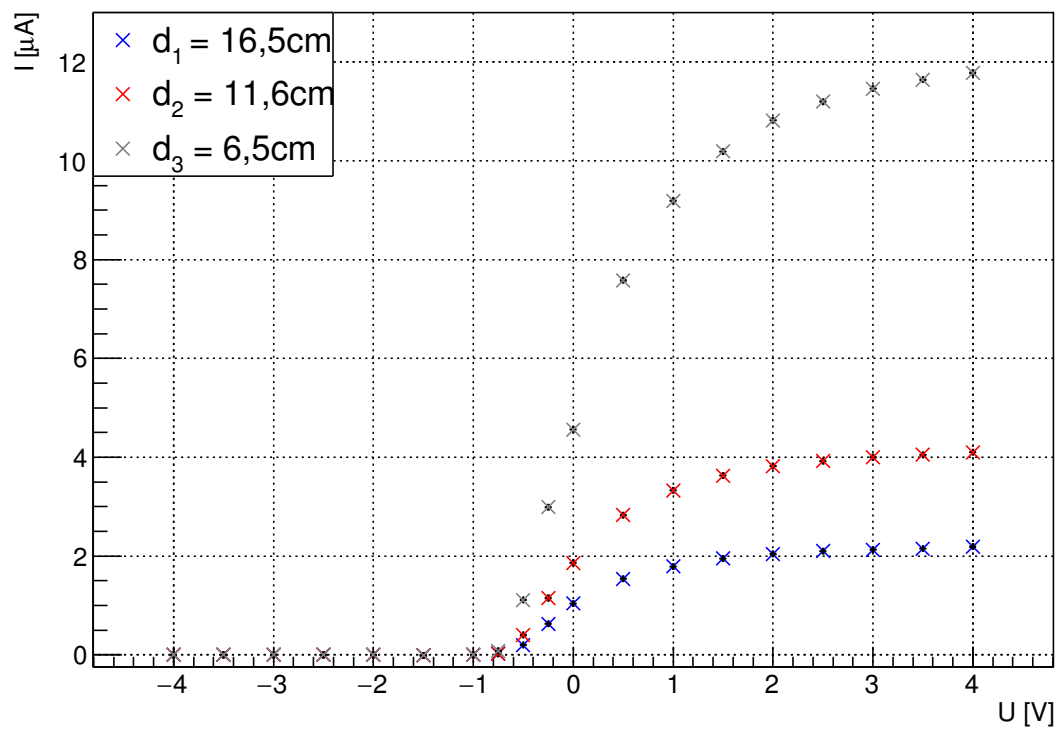


Abb. 4: Strom-Spannungs-Kennlinie der Photozelle für verschiedene Abstände zwischen Photozelle und LED

Als Messfehler wird für die Fehlerbalken lediglich der statistische Fehler verwendet. Dieser

wurde als 0,5 digits abgeschätzt und beträgt für die Spannung

$$s_U = 0,005\text{V}. \quad (2.1)$$

Für die Angabe der korrigierten Stromstärke muss der Ablesefehler des gemessenen Photostroms wie auch der des zum Ausgleich mitgemessenen Stromfehlers berücksichtigt werden. Dies führt zu einem Ergebnis von

$$s_I = \sqrt{0,005^2 + 0,005^2} = 0,007\mu\text{A}. \quad (2.2)$$

Die Fehlerbalken sind jedoch im Vergleich zu den gemessenen Werten so klein, dass sie im Diagramm kaum zu sehen sind.

2.3 Strom-Spannungs-Kennlinie für verschiedene Frequenzen und Bestimmung der Grenzspannung

Das Vorgehen wird hier beispielhaft für Licht mit einer Frequenz von 380nm erläutert.

Wie im ersten Versuchsteil wird zunächst der gemessene Stromfehler vom Photostrom abgezogen, sodass der Trend der Messgröße dadurch korrigiert wird, und dann die Wurzel des korrigierten Stroms berechnet.

Für den Fehler auf die Wurzel des Stroms wird dabei die Gaußsche Fehlerfortpflanzung verwendet.

$$s_{\sqrt{I}} = \sqrt{\left(\frac{\partial\sqrt{I}}{\partial I} \cdot s_I\right)^2} = \frac{s_I}{2\sqrt{I}}. \quad (2.3)$$

s_I ist dabei wie im Versuchsteil zuvor, genannt in (2.2), der Fehler des gemessenen Stroms und des Stromfehlers. Der Spannungsfehler ist auch hier der Ablesefehler von 0,5 digits, der

$$s_U = 0,005\text{V} \quad (2.4)$$

beträgt.

Die gemessenen Spannung, der korrigierte Photostrom I und $\sqrt{I}$ mit Fehler können Tabelle 3 entnommen werden.

U [V]	I [μA]	$\sqrt{I}$ [$\sqrt{\mu\text{A}}$]	$s_{\sqrt{I}}$ [$\sqrt{\mu\text{A}}$]
-0,02	2,02	1,421	0,002
-0,10	1,86	1,364	0,003
-0,20	1,62	1,273	0,003
-0,30	1,36	1,166	0,003
-0,40	1,15	1,072	0,003
-0,50	0,93	0,964	0,004
-0,60	0,75	0,866	0,004
-0,70	0,58	0,762	0,005
-0,80	0,43	0,656	0,005
-0,90	0,30	0,548	0,006
-1,00	0,19	0,436	0,008
-1,10	0,11	0,332	0,011
-1,20	0,06	0,245	0,014
-1,30	0,03	0,173	0,020
-1,40	0,01	0,100	0,035
-1,50	0,00	0,000	0,000

Tab. 3: Spannung und Photostrom sowie Wurzel des Stroms mit Fehler

Anschließend wird $\sqrt{I}$ über die Spannung aufgetragen, was in Abbildung 5 zu sehen ist. Da nach Abzug des Stromfehlers vom Photostrom einige Werte trotzdem noch negativ sind, selbst unter Berücksichtigung des Fehlerintervalls, werden diese hier vernachlässigt und nur die Wurzeln der positiven Werte eingezeichnet.

Der Verlauf der Werte und der Ausgleichsgeraden für eine Frequenz von 380nm können Abbildung 5 entnommen werden. Als Fehlerbalken sind dabei lediglich die statistischen Fehler eingetragen. Für die Spannung ist das der zuvor genannte Ablesefehler und für die Wurzel der Stromstärke werden die in Tabelle 3 genannten Fehler verwendet.

Bestimmung der Grenzspannung fuer 380nm

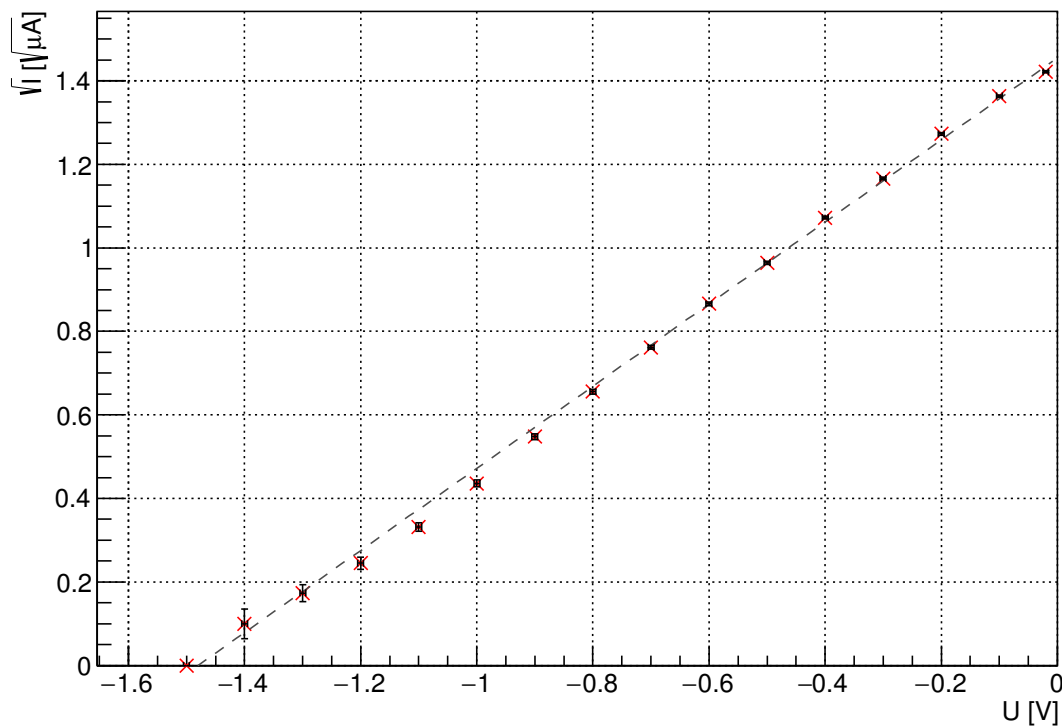


Abb. 5: Bestimmung der Ausgleichsgeraden für Licht der Wellenlänge 380nm zur Ermittlung der Grenzspannung

Zur Bestimmung der Steigung b , des Achsenabschnitts a und der zugehörigen Unsicherheiten s_a und s_b wird durch Fitting mit PyROOT die passende Geradengleichung der Ausgleichsgeraden ermittelt, was die gesuchten Größen liefert.

Mithilfe der so erhaltenen Geradengleichung wird die Kurve extrapoliert, indem der Schnittpunkt mit der x-Achse berechnet wird. Dies geschieht über

$$0 = a + b \cdot x \Rightarrow x = \frac{-a}{b} = -1,470V \quad (2.5)$$

Der Schnittpunkt stellt die gesuchte Grenzspannung U_G dar.

Die Fehler können durch

$$s_{U_G} = -U_G \cdot \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2} = 0,006V \quad (2.6)$$

berechnet werden.

Dabei wird hier lediglich der lineare Teil extrapoliert, um die Grenzspannung zu erhalten, da

für $T > 0$ die $I - U$ -Kurve asymptotisch gegen die Spannungsachse läuft. Da jedoch hier lediglich die positiven Stromwerte betrachtet werden und die nach Abzug des Stromfehlers noch negativen Werte zur Berechnung vernachlässigt wurden, beinhalten die verwendeten Werte hier nur den linearen Teil, sodass alle in das Diagramm eingezeichneten Werte für die Bestimmung der Ausgleichsgeraden verwendet werden können.

Dies wird für die sechs anderen Frequenzen analog durchgeführt, deren Verlauf mit Ausgleichsgerade in Abbildung 6 zu sehen ist.

Bestimmung der Grenzspannung

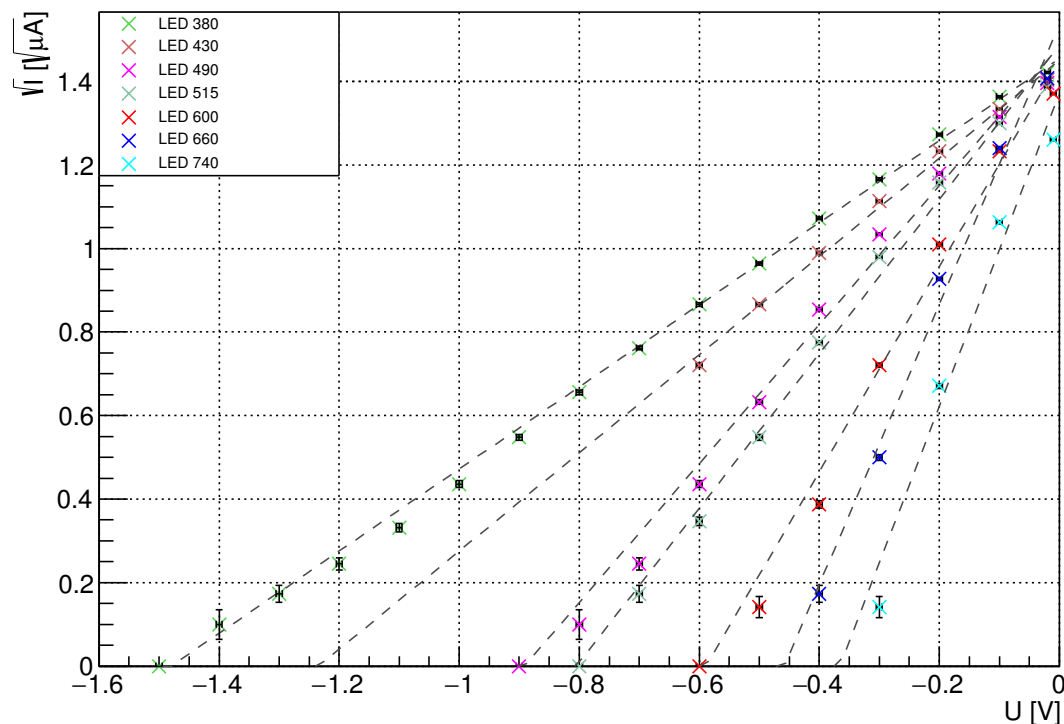


Abb. 6: Bestimmung der Ausgleichsgeraden für Licht mit unterschiedlichen Frequenzen zur Ermittlung von deren Grenzspannung

Die dafür verwendeten Werte und die so berechneten Grenzspannungen für die unterschiedlichen Frequenzen können Tabelle 4 entnommen werden.

LED	a [V]	s_a [V]	b [Vs]	s_b [Vs]	U_G [V]	s_{U_G} [V]
380	1,445	0,003	0,983	0,004	-1,470	0,006
430	1,451	0,005	1,175	0,014	-1,234	0,015
490	1,484	0,005	1,665	0,011	-0,891	0,007
515	1,487	0,006	1,849	0,014	-0,804	0,007
600	1,448	0,009	2,458	0,026	-0,589	0,007
660	1,537	0,014	3,354	0,068	-0,458	0,010
740	1,372	0,018	3,750	0,120	-0,366	0,013

Tab. 4: Bestimmung der Grenzspannung für die verschiedenen Frequenzen über Achsenabschnitt und Steigung

2.4 Bestimmung von h

Aus den in Versuchsteil 1 bestimmten Wellenlängen wird über Gleichung (1.4) die Frequenz bestimmt.

Den Fehler erhält man dabei über

$$s_f = c \cdot \frac{s_\lambda}{\lambda^2}. \quad (2.7)$$

Die zuvor berechneten Grenzspannungen werden anschließend über die Frequenzen aufgetragen. Dies ist in Abbildung 7 zu sehen.

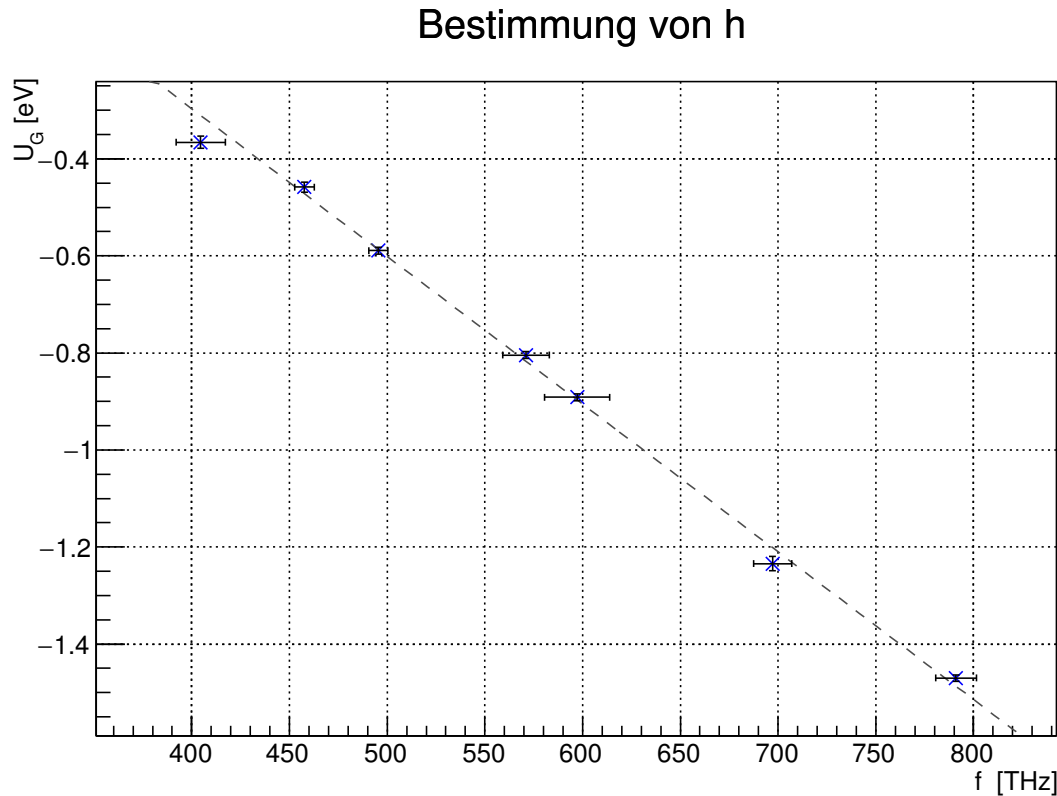


Abb. 7: Auftragen der Grenzspannung über die Frequenzen zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

Mittels PyROOT wird auch hier die Ausgleichsgerade bestimmt. Aus der Steigung kann das Plancksche Wirkungsquantum h ermittelt werden. Da hier lediglich U_G und nicht $U_G \cdot e$ aufgetragen wird, muss die Steigung noch mit der Elementarladung e multipliziert werden, die als fehlerfrei angenommen werden kann und den Wert $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ [2, S.654] hat.

Dies liefert ein Ergebnis von

$$h = e \cdot b = 4,87 \cdot 10^{-34} \text{Js}, \quad (2.8)$$

wobei sich der Fehler über

$$s_h = e \cdot s_b = 0,15 \cdot 10^{-34} \text{Js} \quad (2.9)$$

ergibt, sodass man insgesamt einen Wert von

$$h = (4,87 \pm 0,15) \cdot 10^{-34} \text{Js} \quad (2.10)$$

erhält.

Die Austrittsarbeit der Anode ϕ_A entspricht dabei dem Achsenabschnitt a der oben bestimmten Ausgleichsgerade. Dieser muss noch mit der Elementarladung e multipliziert werden, um die Austrittsarbeit zu erhalten. Dies ergibt einen Wert von

$$\phi_A = a \cdot e = 1,47 \cdot 10^{-19} \text{ J.} \quad (2.11)$$

Der Fehler lässt sich über den Fehler des Achsenabschnitts ermitteln:

$$s_{\phi_A} = s_a \cdot e = 0,08 \cdot 10^{-19} \text{ J,} \quad (2.12)$$

sodass sich als Endergebnis ein Ergebnis von

$$\phi_A = (1,47 \pm 0,08) \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (2.13)$$

ergibt.

3 Zusammenfassung und Diskussion

Die anfangs mithilfe eines Gitterspektrometers bestimmten Wellenlängen der verwendeten LEDs können Tabelle 5 entnommen werden. Sie wurden zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantum am Ende verwendet.

LED	Wellenlänge λ [nm]	s_λ [nm]
380	379	5
430	430	6
490	502	14
515	525	11
600	605	6
660	655	7
740	741	23

Tab. 5: Wellenlängen der LEDs

Strom-Spannungs-Kennlinien für verschiedenen Intensitäten

Die in ein Diagramm aufgetragenen Werte für den Photostrom und die Spannung folgen dem erwarteten Verlauf. Ohne Korrektur des durch die Schaltung entstandenen Stromfehlers würden die gemessenen Stromwerte sich der durch den Stromfehler entstandenen Gerade annähern. Da dieser Trend jedoch korrigiert wurde, streben die Werte für negative Spannungen, die hier die Gegenspannung bezeichnen, gegen 0.

Dem Diagramm kann entnommen werden, dass positive Spannungswerte, die die Saugspannung darstellen und für eine die Potentialdifferenz von Kathode und Anode unterstützende Spannung stehen, für eine große Stromstärke sorgen. Diese nähert sich für große Spannungen einem Grenzwert an, der von der Intensität abhängt.

Für große Gegenspannungen, die entgegen der Spannungsdifferenz der Kathode und Anode wirken, ist kein Strom mehr zu beobachten, da das Gegenfeld zu groß ist, als dass noch Elektronen gegen dieses Feld fließen könnten.

Je kleiner dabei der Abstand zwischen Photozelle und LED ist, desto größer ist die Intensität und der resultierende Strom bei positiven Spannungen.

Strom-Spannungs-Kennlinie für verschiedene Frequenzen und Bestimmung der Grenzspannung

Hier wurde die Wurzel des Photostroms über die angelegte Spannung aufgetragen, wobei auch hier die Stromstärke durch Subtraktion des gemessenen Stromfehlers korrigiert wurde.

Dabei waren die Werte des Stromfehlers jedoch etwas zu klein, sodass selbst nach Abzug der Werte die Photostromstärken noch teilweise negativ waren und somit bei der Auftragung von $\sqrt{I}$ nicht berücksichtigt wurden. Da die Messung des Stromfehlers am Ende nachgeholt wurde, spricht dies dafür, dass die Messung wahrscheinlich unter etwas anderen Bedingungen und Lichtverhältnissen durchgeführt wurde und somit die Messergebnisse des Stromfehlers somit nicht optimal sind.

Für die restlichen Werte wurde die Ausgleichsgerade bestimmt. Die daraus berechneten Grenzspannungen können in Tabelle 6 eingesehen werden.

LED	a [V]	s_a [V]	b [Vs]	s_b [Vs]	U_G [V]	s_{U_G} [V]
380	1,445	0,003	0,983	0,004	-1,470	0,006
430	1,451	0,005	1,175	0,014	-1,234	0,015
490	1,484	0,005	1,665	0,011	-0,891	0,007
515	1,487	0,006	1,849	0,014	-0,804	0,007
600	1,448	0,009	2,458	0,026	-0,589	0,007
660	1,537	0,014	3,354	0,068	-0,458	0,010
740	1,372	0,018	3,750	0,120	-0,366	0,013

Tab. 6: Grenzspannungen der verschiedenen Frequenzen

Es kann beobachtet werden, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und der Grenzspannung besteht. Je kleiner die Wellenlänge, desto größer ist der Betrag der Grenzspannung.

Bestimmung von h

Zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantum h wurde der oben genannte lineare Zusammenhang verwendet, wobei die Frequenz anstatt der Wellenlänge verwendet wurde. Der durch lineare Regression berechnete Wert der Steigung und somit indirekt des Planckschen Wirkungsquantum ist

$$h = (4,87 \pm 0,15) \cdot 10^{-34} \text{ Js} . \quad (3.1)$$

Verglichen mit einem Literaturwert von $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ [2, S.1163] stimmen diese beiden Werte innerhalb einer 12σ -Umgebung miteinander überein.

Wahrscheinlich ist der tatsächliche Fehler dabei noch etwas größer, da hier keine systematischen Fehler, sondern nur statistische berücksichtigt wurden.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen anderer Versuchsteilnehmer liefert ähnliche Abweichungen von der Literaturangabe, vergleiche mit dem Protokoll von Tobias Nauck und Michael Krebsbach [3] sowie dem von Joschka Birk und Maarten Van der Hoeven [4]. Diese wurden unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt.

Dies lässt darauf schließen, dass ein systematischer Fehler in der Art der Durchführung oder des Aufbaus vorliegt.

Es kann dabei ausgeschlossen werden, dass der Fehler aus der Wahl der Schaltung, in diesem Fall der Stromfehlerschaltung, liegt, da andere Gruppen teilweise die Spannungsfehlerschaltung verwendet haben und ihr Ergebnis trotzdem ähnliche Abweichungen aufweist.

Auch Fehler in der Funktion der Messgeräte können ausgeschlossen werden, da die Abweichungen vom Literaturwert nicht nur einzelne Gruppen betrifft.

Ein möglicher Grund könnte unter anderem eine Temperaturänderung im Versuchsaufbau, beispielsweise die Erhitzung der Diode oder Photozelle sein. Es kann jedoch keine wirkliche Aussage über mögliche Fehler im Versuchsaufbau getroffen werden, da dieser dafür in seinen Einzelheiten nicht gut genug bekannt ist.

Die zuletzt berechnete Austrittsarbeit der Anode hat den Wert

$$\phi_A = (1,47 \pm 0,08) \cdot 10^{-19} \text{ J} . \quad (3.2)$$

4 Abbildungen

1	Schematische Darstellung des äußeren Photoeffekts [1, S.3]	3
2	Potentialtopfmodell [1, S.3]	4
3	Zwei Mögliche Schaltungen [1, S.7]	5
4	Strom-Spannungs-Kennlinie der Photozelle für verschiedene Abstände zwischen Photozelle und LED	8
5	Bestimmung der Ausgleichsgeraden für Licht der Wellenlänge 380nm zur Ermitt- lung der Grenzspannung	10
6	Bestimmung der Ausgleichsgeraden für Licht mit unterschiedlichen Frequenzen zur Ermittlung von deren Grenzspannung	11
7	Auftragen der Grenzspannung über die Frequenzen zur Bestimmung des Planck- schen Wirkungsquantums	12

5 Tabellen

1	Gemessene Wellenlängen der LEDs	7
2	Werte der angelegten Spannung und des korrigierten Fotostroms für $d_1 = (16,5 \pm 1)\text{cm}$, $d_2 = (11,6 \pm 0,1)\text{cm}$ und $d_3 = (6,5 \pm 0,1)\text{cm}$	8
3	Spannung und Photostrom sowie Wurzel des Stroms mit Fehler	9
4	Bestimmung der Grenzspannung für die verschiedenen Frequenzen über Achsen- abschnitt und Steigung	11
5	Wellenlängen der LEDs	14
6	Grenzspannungen der verschiedenen Frequenzen	15

6 Literatur

- [1] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2; Versuch 00 – Bestimmung von h mit dem Photoeffekt*, Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- [2] *P.Tipler, G. Mosca: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Auflage. 2008. Berlin, Heidelberg*
- [3] *Nauck, Tobias; Krebsbach, Michael: Versuch 81: Bestimmung von h mit dem Photoeffekt, 15.03.2018*
- [4] *Birk, Joschka; Van der Hoeven, Maarten: Bestimmung von h mit dem Photoeffekt (Versuch 81), 15.03.2018*

7 Anhang

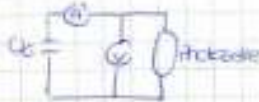
Versuch 8-1 09.03.2018

Teil 1) Bestimmung der Wellenlängen (bei $e^{-0,5}$)

LED	Peak	Peak auf Peak	Beste des Spektrums (Peak zu Peak)
* 710	744 nm ± 2 nm	(740 - 755) nm	$\rightarrow e^{-0,5}$
* 380	379 nm ± 2 nm	(376 - 386) nm	
* 515	525 nm ± 3 nm	(516 - 538) nm	
* 430	430 nm ± 2 nm	(424 - 436) nm	
* 600	605 nm ± 5 nm	(599 - 610) nm	
* 660	659 nm ± 2 nm	(648 - 661) nm	
* 490	502 nm ± 3 nm	(489 - 517) nm	

Teil 2)

Es wird die Stromfahrschaltung verwendet



Einfluss des Abstands zwischen Diode und Photodiode:

$\rightarrow$ Strom wird höher, wenn Diode näher an Photodiode ist

Einfluss des Gegenfelds:

Gegenfeld verstärkt Potentialdifferenz: höherer Strom

" - " schwächt Potentialdifferenz: sehr schwaches Licht
kann durch Umgebungslicht

Messung: LED 490

Gegenspannung /V (Messbereich: 20V)	Strom / μ A (Messbereich: 10 μ A)	Abstand Diode-Photodiode ($16,5 \pm 0,1$ cm)
4,00	2,64	
3,50	2,55	
3,00	2,48	
2,50	2,40	
2,00	2,28	
1,50	2,14	

Gegenspannung (V)	Strom (μA)
1,00	1,03
0,50	1,62
0,00	1,06
-0,50	0,16
-1,00	-0,09
-1,50	-0,15
-2,00	-0,20
-2,50	-0,25
-3,00	-0,30
-3,50	-0,35
-4,00	-0,40
-0,25	0,62
-0,75	-0,05

Abstand $d = (11,6 \pm 0,1) \text{ cm}$

Gegenspannung (V)	Strom (μA)	Gegenspannung (V)	Strom (μA)
4,00	4,55	-0,25	1,14
3,50	4,45	-0,75	-0,04
3,00	4,35	-1,00	-0,09
2,50	4,22	-1,50	-0,15
2,00	4,06	-2,00	-0,20
1,50	3,82	-2,50	-0,25
1,00	3,47	-3,00	-0,30
0,50	2,91 2,91	-3,50	-0,35
-0,01	1,38	-4,00	-0,40
-0,50	0,36		

Abstand $d = 16,5 \pm 0,1$ cm

Spannung (V)	Strom (μA)	Spannung (V)	Strom (μA)
4,00	12,23	-0,25	2,98
3,50	12,04	-0,50	1,07
3,00	11,81	-0,75	0,01
2,50	11,50	-1,00	-0,09
2,00	11,06	-1,50	-0,15
1,50	10,78	-2,00	-0,20
1,00	9,33	-2,50	-0,25
0,50	7,66	-3,00	-0,30
-0,04	4,58	-3,50	-0,35
		-4,00	-0,40

Messung des Stromfeldes $\rightarrow$ LED aus

Spannung (V)	Strom (μA)	Spannung (V)	Strom (μA)
4,00	0,45	-1,00	-0,09
3,50	0,40	-1,50	-0,14
3,00	0,35	-2,00	-0,20
2,50	0,30	-2,50	-0,25
2,00	0,24	-3,00	-0,30
1,50	0,19	-3,50	-0,35
1,00	0,14	-4,00	-0,40
0,50	0,08		
0,00	0,02		
-0,25	-0,01		
-0,50	-0,04		
-0,75	-0,07		

Test 3

LED 600

$$d = (11,7 \pm 0,1) \text{ cm}, U_{\text{Diode}} = 2 \text{ V}$$

Spannung (V)	Strom (µA)	Spannung (V)	Strom (µA)
-0,01	1,94	-1,20	-0,12
-0,10	1,54	-1,30	-0,13
-0,20	1,02	-1,40	-0,14
-0,30	0,52	-1,50	-0,15
-0,40	0,13	-1,60	-0,16
-0,50	-0,01	-1,70	-0,17
-0,60	-0,05	-1,80	-0,18
-0,70	-0,06	-1,90	-0,19
-0,80	-0,08	-2,00	-0,20
-0,90	-0,09		
-1,00	-0,10 -0,10		
-1,10	-0,11		

LED 490

$$d = 5,0, U_{\text{Diode}} = 2,1 \text{ V}$$

Spannung (V)	Strom (µA)	Spannung (V)	Strom (µA)
-0,02	2,01	-1,00	-0,09
-0,10	1,75	-1,10	-0,10 0,11
-0,20	1,39	-1,20	-0,12
-0,30	1,07	-1,30	-0,13
-0,40	0,77 0,71	-1,40	-0,14
-0,50	0,37	-1,50	-0,15
-0,60	0,14	-1,60	-0,16
-0,70	-0,00	-1,70	-0,17
-0,80	-0,06	-1,80	-0,18
-0,90	-0,08	-1,90	-0,19
		-2,00	-0,20

LED 430 $d = 50$ $\lambda = 2,17$

Spannung (V)	Strom (μA)	Spannung (V)	Strom (μA)
-0,02	2,03	-1,10	-0,09
-0,10	1,80	-1,20	-0,11
-0,20	1,52	-1,30	-0,12
-0,30	1,24	-1,40	-0,14
-0,40	0,96	-1,50	-0,15
-0,50	0,72	-1,60	-0,16
-0,60	0,47	-1,70	-0,17
-0,70	0,27	-1,80	-0,18
-0,80	0,12	-1,90	-0,19
-0,90	0,01	-2,00	-0,20
-1,00	-0,05		

LED 740 ~~$d = 50$~~ $\lambda = 0,59$ $d = 13,7 \pm 0,15 \text{ nm}$ $\lambda = 0,59$

Spannung (V)	Strom (μA)	Spannung (V)	Strom (μA)
-0,01	1,79	-1,10	-0,15
-0,10	1,32	-1,20	-0,16
-0,20	0,55	-1,30	-0,17
-0,30	0,03	-1,40	-0,18
-0,40	-0,06	-1,50	
-0,50	-0,08		
-0,60	-0,09		
-0,70	-0,11		
-0,80	-0,12		
-0,90	-0,13		
-1,00	-0,14		

Falsche Schaltung!

LED 380 $d = (11,6 \pm 0,1) \text{ cm}$ $U = 3,12 \text{ V}$

Spannung (V)	I (μA)	U (V)	I (μA)
-0,02	2,08	-1,10	0,01
-0,10	1,88	-1,20	-0,05
-0,20	1,62	-1,30	-0,09
-0,30	1,36	-1,40	-0,12
-0,40	1,13	-1,50	-0,14
-0,50	0,90	-1,60	-0,16
-0,60	0,70	-1,70	-0,17
-0,70	0,52	-1,80	-0,19
-0,80	0,36	-1,90	-0,19
-0,90	0,22	-2,00	-0,20
-1,00	0,10		

LED 660 $d = (11,6 \pm 0,1) \text{ cm}$ $U = 2,7 \text{ V}$

U (V)	I (μA)	U (V)	I (μA)
-0,02	2,04	-1,10	-0,11
-0,10	1,56	-1,20	-0,12
-0,20	0,86	-1,30	-0,13
-0,30	0,25	-1,40	-0,14
-0,40	0,01	-1,50	-0,15
-0,50	-0,04	-1,60	-0,16
-0,60	-0,05	-1,70	-0,17
-0,70	-0,07	-1,80	-0,18
-0,80	-0,08	-1,90	-0,19
-0,90	-0,09	-2,00	-0,20
-1,00	-0,10		

LED 740

 $d = (3.3 \pm 0.1) \text{ cm}$ $U = 0.54 \text{ V} \cdot 4$

Spannung (V)	Strom (μA)	Spannung (V)	Strom (μA)
-0.01	1.65	-1.10	-0.15
-0.10	1.15	-1.20	-0.16
-0.20	0.45	-1.30	-0.17
-0.30	0.02	-1.40	-0.18
-0.40	-0.06	-1.50	-0.19
-0.50	-0.08	-1.60	-0.20
-0.60	-0.09	-1.70	-0.21
-0.70	-0.11	-1.80	-0.22
-0.80	-0.12	-1.90	-0.23
-0.90	-0.13	-2.00	-0.24
-1.00	-0.14		

LED 515

 $d = (11.6 \pm 0.1) \text{ cm}$ $U = 2.78 \text{ V}$

Spannung (V)	Strom (μA)	Spannung (V)	Strom (μA)
-0.02	1.98	-1.10	-0.11
-0.10	1.71	-1.20	-0.12
-0.20	1.34	-1.30	-0.13
-0.30	0.96	-1.40	-0.14
-0.40	0.58	-1.50	-0.15
-0.50	0.27	-1.60	-0.16
-0.60	0.07	-1.70	-0.17
-0.70	-0.03	-1.80	-0.18
-0.80	-0.07	-1.90	-0.19
-0.90	-0.09	-2.00	-0.20
-1.00	-0.10		

Fehler Messgeräte:

UT 51 : Amperes : Messbereich 20 μ A : $\pm(2\% + 5 \text{ digits})$
 Volt : Messbereich 20V : $\pm(0,5\% + 1 \text{ digit})$

$$S_{\text{Amperes}} = \frac{1}{2} \text{ digit}$$

VT 17.12.14

Uachmessung Stromföhre ohne LED für Teil 3

Spannung V	I / μ A	U / V	I / μ A
-0,00	0,06	-1,10	-0,10
-0,10	0,02	-1,20	-0,11
-0,20	0,00	-1,30	-0,12
-0,30	-0,00	-1,40	-0,13
-0,40	-0,02	-1,50	-0,14
-0,50	-0,03	-1,60	-0,15
-0,60	-0,05	-1,70	-0,16
-0,70	-0,06	-1,80	-0,17
-0,80	-0,07	-1,90	-0,18
-0,90	-0,08	-2,00	-0,19
-1,00	-0,09		