



Hinweis: Die Zylinderförmige Schutzabdeckung soll nicht heruntergeschraubt werden, da die empfindliche Photozelle durch die hohe Lichtintensität dauerhaft beschädigt werden kann. Auch im besten Fall würde die Photozelle eine geraume Zeit benötigen um sich wieder zu stabilisieren. Nach den Versuchen sollte auch die Plastikschutzhaube über das LED Aufnahmerohr geschoben werden.

1.) Einleitung:

Im Jahre 1887 untersuchte der deutsche Physiker Heinrich Herz, die Bildung und Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Er befasste sich mit der Funkenbildung zwischen elektrisch geladenen Platten und entdeckte, dass die Stärke und die Anzahl der Funken zunahmten wenn die Platten mit ultraviolettem Licht bestrahlt wurden. Im Jahre 1888 entdeckte ein anderer deutscher Physiker, Wilhelm Hallwachs, dass eine negativ geladene Metallplatte aus Zink, wesentlich schneller ihre Ladung verliert, wenn sie mit ultraviolettem Licht bestrahlt wird. Er erklärt das Phänomen durch die Emission negativ geladener Teilchen. Zwölf Jahre später entdeckte der deutsche Physiker Philipp Eduard Anton Lenard, dass die Zündspannung für elektrische Lichtbögen zwischen zwei Elektroden erheblich niedriger wird wenn die negative Elektrode mit ultraviolettem Licht bestrahlt wird. Er bewies außerdem, dass es sich bei den Teilchen die durch die Bestrahlung der negativen Elektrode emittiert werden um Elektronen handelt. Im Weiteren versuchte Lenard die Energie zu messen, die man braucht um Elektronen durch Bestrahlung aus Fotosensitiven Platten herauszuschlagen. Er entdeckte dabei, dass mit wachsender Intensität der Strahlung zwar die Anzahl der herausgeschlagenen Teilchen zunimmt, nicht aber deren kinetische Energie. Er stellte auch fest, dass durch langwellige Strahlung, unabhängig von der Höhe der Intensität, keine Elektronen von den Platten emittiert werden. Die Ergebnisse der Experimente von Lenard konnten durch die klassische Maxwellsche Theorie des Lichtes nicht erklärt werden.

Datum:	Schülername:	Klasse:	Seite:
--------	--------------	---------	--------

Dieser so genannte Photoeffekt stellte Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts, als man die Physik für fast abgeschlossen hielt, eines der letzten Rätsel dar. Man konnte sich nicht erklären wieso Licht erst ab einer bestimmten Frequenz (unter einer bestimmten Wellenlänge) Elektronen aus bestimmten Metallen schlagen kann, denn Licht ist in der klassischen Physik eine elektromagnetische Welle, deren Energie proportional zu ihrem Amplitudenquadrat ist. Für das Auslösen eines Elektrons aus einem Metall ist eine gewisse Energie notwendig. Nach der klassischen Theorie des Lichtes müsste man also nur die Intensität, also die Amplitude der Lichtwelle mit der man das Metall bestrahlt, entsprechend hoch einstellen um Elektronen herauszuschlagen. Das sollte unabhängig von der gewählten Frequenz bzw. Wellenlänge funktionieren.

Die Experimente von Hertz, Hallwachs und Lenard führten zum gegenteiligen Resultat. Unter einer gewissen Grenzfrequenz (für jedes Metall eine andere), kann die Intensität beliebig erhöht werden, ohne das Elektronen aus diesem Metall herausgeschlagen werden. Überschreitet man diese Frequenz, werden auch bei niedrigeren Intensitäten Elektronen herausgeschlagen. Je größer die Intensität ist, desto mehr Elektronen werden ausgelöst. Die Energie der Elektronen steigt aber nicht mit der Intensität des Lichtes, sondern mit seiner Frequenz.

Die Erklärung dieses Phänomens konnte mit der klassischen Theorie gar nicht gelingen. 1905 gelang Einstein die genial einfache, theoretische Beschreibung dieses Effekts mit Hilfe der von Max Planck eingeführten Quantentheorie. Er nahm an, dass Licht aus Teilchen besteht, den so genannten Photonen. Die Energie E , dieser Photonen (Lichtquanten) sollte direkt proportional zu ihrer Frequenz f und der Betrag ihres Impulses p indirekt proportional zur Wellenlänge λ sein:

$$E = h \cdot f$$

$$p = h/\lambda$$

Dabei ist die Proportionalitätskonstante h das Planksche Wirkungsquantum. Das bedeutet, dass Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung nur in kleinen Paketen, Quanten abgegeben werden kann. Diese Mindestgröße ist von der Frequenz abhängig.

Nach der Quantentheorie ist elektromagnetische Strahlung weder eine Welle noch ein Teilchen. In manchen Experimenten (Beugung, Reflexion, Brechung) weist sie Welleneigenschaften auf und in anderen (z.B.: Photoeffekt, Comptoneffekt) weist sie Teilcheneigenschaften auf. Dies nennt man den Welle-Teilchendualismus. Die mathematische Beschreibung dieses Dualismus liefert die Quantenmechanik. Einstein erhielt im Jahr 1922 für die quantenmechanische Erklärung des Photoeffekts, und nicht für die Aufstellung der Relativitätstheorie den Nobelpreis für Physik.

Der US-amerikanische Physiker Millikan, der von der Erklärung Einsteins nicht überzeugt war, versuchte experimentell nachzuweisen dass seine Quantentheorie des Lichtes nicht richtig ist. Zu seiner Enttäuschung musste er jedoch nach mehrjährigen Experimenten feststellen, dass Einsteins Theorie doch richtig war. Dabei konnte er die Planksche-Konstante h mit einem Fehler von 0,5% experimentell bestimmen. Für seinen Beitrag zur Erforschung des photoelektrischen Effekts, aber vor allem für die Bestimmung der Elementarladung $e = 1,6021 \cdot 10^{-19}$ C, mit seiner berühmten Öltröpfchenmethode erhielt er 1923 den Nobelpreis für Physik.

Das Planksche Wirkungsquantum ist eine fundamentale Naturkonstante und hat den genauen Wert $h = 6,62606896 \cdot 10^{-34}$ Js. Es hat die Dimension einer Wirkung [Wirkung]=[Energie]*[Zeit]. In der Physik wird häufig auch das reduzierte Planksche

Wirkungsquantum verwendet, das als $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ definiert ist.

Datum:	Schülername:	Klasse:	Seite:
--------	--------------	---------	--------

In unserem Experiment wollen wir das Planksche Wirkungsquantum h bestimmen. Der Effekt der bei unserem Experiment auftritt ist der so genannte äußere Photoeffekt, bei diesem werden Elektronen aus einer Metalloberfläche durch elektromagnetische Strahlung herausgelöst. Neben dem äußeren photoelektrischen Effekt gibt es noch zwei Arten des inneren Photoelektrischen Effekts, der in Halbleitern einerseits dazu führt, dass sie leitend werden (Photoleitung), bzw. ebenfalls in Halbleitern die Umwandlung von Strahlungsenergie in elektrische Energie bewirkt (photovoltaischer Effekt). Es existiert auch noch eine vierte Art des Photoeffekts und zwar die Photoionisation, bei der Elektronen durch elektromagnetische Strahlung aus Atomen herausgelöst werden. Der äußere Photoeffekt kann ohne Vereinfachungen erklärt und demonstriert werden, während die komplizierten Verhältnisse in Halbleitern wesentliche vereinfachende Annahmen erfordern, bei denen man leicht Fehler machen kann. Der äußere Photoeffekt ist also leichter nachvollziehbar und man kann dabei auch den wichtigen Begriff der Austrittsarbeit kennen lernen. Beim inneren Photoeffekt spielt das Bändermodell und die so genannte Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband eine wichtige Rolle.

2.) Theorie des Experimentes:

Unter der zylinderförmigen Abdeckung des Gerätes befindet sich eine Photodiode, die im Wesentlichen aus einer Kathode und einer ringförmigen Anode besteht. (Es handelt sich hierbei um eine Photodiode des Typs 1P39.) Die Oberfläche der Kathode besteht aus Cäsium das aufgedampft wurde. Bei eingeschaltetem Gerät liegt zwischen den beiden Elektroden eine Spannung, die über die beiden Regler (grob, fein) eingestellt werden kann.

Zur Bestimmung des Plankschen Wirkungsquantums verwenden wir LEDs mit verschiedenen Wellenlängen. Das ausgesendete Licht tritt durch die Öffnung der ringförmigen Anode und trifft auf die Oberfläche der Kathode. Wird ein Elektron von einem Photon getroffen, gibt das Photon beim Photoeffekt seine gesamte Energie ($E = h \cdot f$) an dieses ab. Ein Teil der Energie wird dazu benötigt das Elektron aus der Metalloberfläche herauszuschlagen (Austrittsarbeit). Der Rest der Energie steht dem Elektron als kinetische Energie zur Verfügung.

$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - \Phi$$

Dabei ist Φ die Austrittsarbeit für die Kathode. Dies ist die minimale Energie die ein Photon braucht um ein Elektron aus der Kathode herauszulösen. Die Austrittsarbeit ist eine materialspezifische Größe und somit für jedes Metall anders. Sie hängt außerdem noch von der Temperatur ab. Cäsium eignet sich als Kathodenoberflächenmaterial weil es eine niedrige Austrittsarbeit aufweist und sich leicht verarbeiten lässt. Die Austrittsarbeit für Cäsium ist 2,14 eV bei 0 K und ca. 2 eV bei Zimmertemperatur. Durch die elektromagnetische Strahlung werden also Elektronen aus der Metalloberfläche herausgeschlagen und es fließt ein Elektronenstrom von der Kathode zur Anode, dieser kann über das integrierte Nano-Amperemeter nachgewiesen werden.

Zwischen Anode und Kathode liegt eine veränderliche Gegenspannung. Durch diese werden die herausgeschlagenen Elektronen abgebremst. Die Bremsspannung kann so eingestellt werden, dass kein Strom mehr fließt. Ist dies der Fall verlieren die Elektronen ihre gesamte Energie durch die Bremsspannung. Diese Grenzspannung nennen wir U_0 .

Datum:	Schülername:	Klasse:	Seite:
--------	--------------	---------	--------

Aus ihr ergibt sich die Energie $E_0 = e \cdot U_0$. Dabei ist $e = 1,6021 \cdot 10^{-19}$ C die Elementarladung. Wenn keine Elektronen mehr die Anode erreichen, der Strom also 0 A wird, entspricht $e \cdot U_0$ genau der kinetischen Energie der Elektronen. Also:

$$e \cdot U_0 = E_{\text{kin}} = h \cdot f - \Phi$$

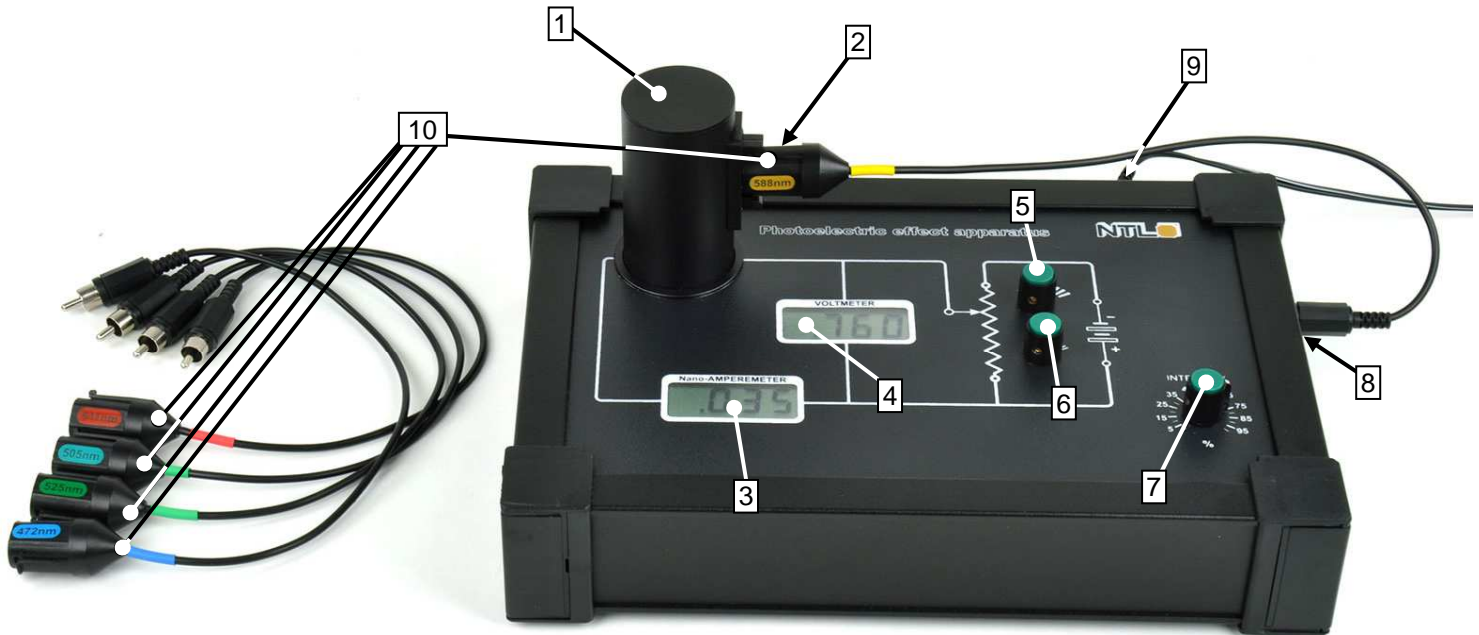
Da sowohl h als auch Φ konstant und somit von f unabhängig sind kann man die Energie $e \cdot U_0$ gegen die Frequenz f in ein Diagramm eintragen. Die verschiedenen Energie-Frequenz Paare müssen auf einer Gerade mit Steigung h und dem y-Achsenabschnitt Φ liegen. Für jedes Kathodenmaterial ist der y-Achsenabschnitt der entsprechenden Gerade anders. Der Anstieg der Gerade ist vom Kathodenmaterial unabhängig.

WICHTIGE HINWEISE FÜR DIE INBETRIEBNAHME DES GERÄTES:

- **Lesen Sie vor Inbetriebnahme sorgfältig die Bedienungsanleitung**
- **Das Gerät soll vor Erschütterungen geschützt werden**
- **Entfernen Sie nicht die Schutzbedeckung der Vakuum-Photozelle. Starke Belichtung lässt die Photozelle rasch altern und hat einen negativen Einfluss auf ihre Funktion.**
- **Setzen sie das Gerät keinen extremen Temperaturen, hoher Luftfeuchtigkeit, Nässe oder direkter Sonneneinstrahlung aus.**
- **Schalten Sie das Gerät nach dem Experiment aus und verschließen Sie das LED Zuführungsrohr mit der vorgesehenen Schutzkappe, um die Photozelle vor unnötiger Abnutzung zu schützen.**
- **Defekte Sicherung gegebenenfalls nur mit einer dem Original entsprechenden ersetzen.**

Datum:	Schülername:	Klasse:	Seite:
--------	--------------	---------	--------

3.) Beschreibung der Bedienelemente des Gerätes:



- (1) Schutzabdeckung für die Photozelle
- (2) LED Aufnehmerrohr
- (3) Nano-Amperemeter. Empfindliches Instrument zur Messung des Photostromes
- (4) Voltmeter zur Messung der Grenzspannung U_0
- (5) Drehknopf zur groben Einstellung der Grenzspannung
- (6) Drehknopf zur feinen Einstellung der Grenzspannung
- (7) Drehknopf zur Einstellung der Intensität der Lichtquellen
- (8) Buchse für die Lichtquellen
- (9) Buchse für die Stromversorgung
- (10) LEDs mit Verbindungskabel

Datum:	Schülername:	Klasse:	Seite:
--------	--------------	---------	--------

4.) Durchführung des Experiments:

Beim Experiment wird die Grenzspannung für die 5 zur Verfügung stehenden Wellenlängen (611 nm, 588 nm, 525 nm, 505 nm, 472 nm) gemessen. Die verwendeten Lichtquellen sollen möglichst monochromatisch sein um Fehler bei der Spannungsmessung und der weiteren Berechnung zu vermeiden. Das bedeutet dass die angegebene Wellenlänge möglichst scharf sein soll und nicht über einen weiten Bereich streuen soll. Dies ist bei LEDs nicht automatisch gewährleistet kann aber technisch erreicht werden.

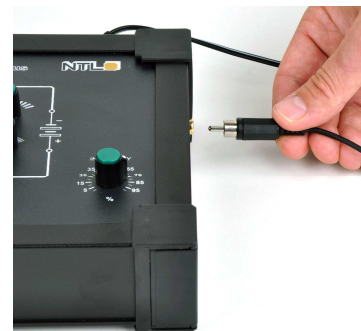
Aus den zu messenden Grenzspannungen wird alles weitere berechnet.

- 1.) Steckernetzgerät an Netzspannung (230 V / 50 Hz) anschließen und anschließend den Ausgangsstecker des Netzgerätes in die Eingangsbuchse (9) auf der Rückseite des Hauptgerätes einstecken! Das Gerät ist nun betriebsbereit.



- 2.) Intensität der Lichtquelle mit (7) auf 75% einstellen!

- 3.) Die erste LED in die Buchse für die Spannungsversorgung (8) der Lichtquellen einstecken!



- 4.) Klemmstifte der Schutzabdeckung zusammendrücken und Schutzabdeckung herunterziehen. Die Lichtquelle an das Aufnahmerohr der Photozelle (2) ganz aufschieben (deutliches Klickgeräusch)!



- 5.) Den Feineinstellknopf (6) in die Mittelstellung drehen!

Hinweis: Es ist empfehlenswert bei der ersten Messung, ein paar Minuten zu warten, bevor man mit der Einstellung der Grenzspannung beginnt.

Datum:	Schülername:	Klasse:	Seite:
--------	--------------	---------	--------

- 6.) Den Grobeinstellknopf (5) langsam drehen, bis der Photostrom im Nano-Amperemeter ungefähr Null wird!
- 7.) Den Feineinstellknopf (6) drehen bis der Photostrom Null wird und die Anzeige zwischen 0 und -0 wechselt.
- 8.) Die am Voltmeter (4) angezeigte Spannung ist die Grenzspannung und wird in der Tabelle 1 des Excel Programms bei der entsprechenden Frequenz eingetragen.
- 9.) Wiederholung der Schritte 4-8 mit den restlichen vier LEDs. Beim Abnehmen der LEDs Klemmstifte zusammendrücken und dann erst LEDs vom Aufnahmerohr abziehen.

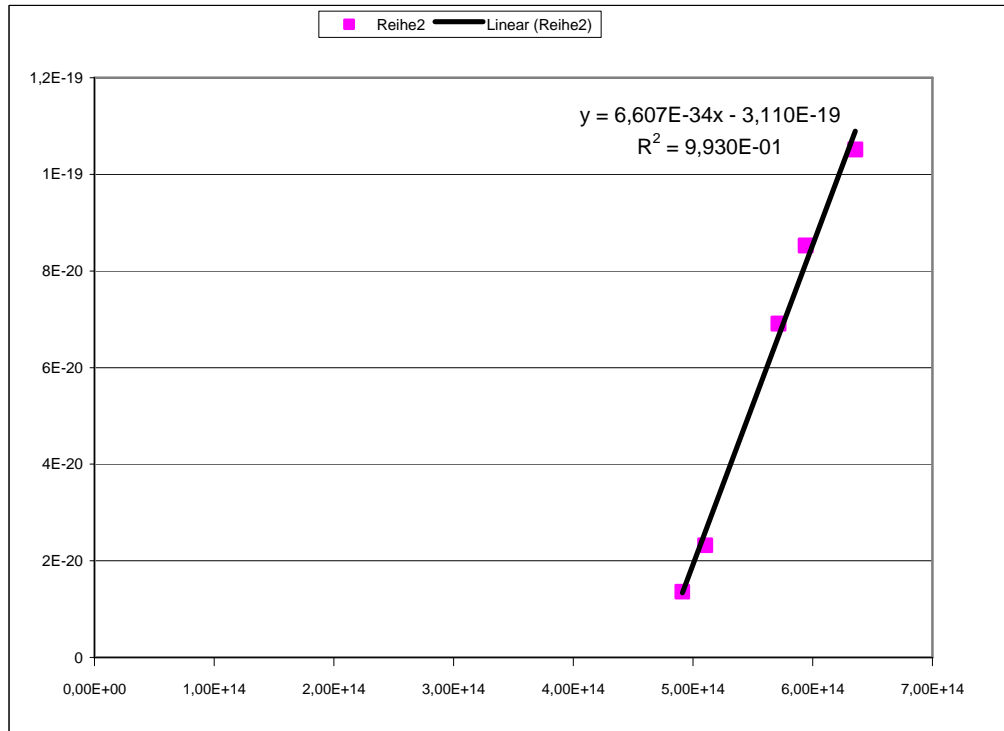
Hinweis: Nach dem Experiment sollte die Plastikschutzhaube wieder über das LED Aufnahmerohr geschoben werden.

5.) Auswertung:

Am einfachsten ist die Auswertung, vor allem in Bezug auf die Ausgleichsgerade, mit dem mitgelieferten Excel-Programm, da man nur die gemessenen Werte für die Grenzspannung in die entsprechende Tabelle eintragen muss. Danach kann man die Steigung h und den y-Achsenabschnitt Φ im Graphen ablesen und den Fehler zum Literaturwert berechnen lassen, indem man diese Werte an der entsprechenden Stelle in der zweiten Tabelle einträgt.

NAME	λ [m]	U_0 [V]	f [Hz]	$E_0 = U_0 \times e$ [J]	$E = h \times f - \Phi$ [J]
FRUHMANN	6,11E-07	0,085	4,91E+14	1,36E-20	1,334E-20
	5,88E-07	0,145	5,10E+14	2,32E-20	2,606E-20
	5,25E-07	0,432	5,71E+14	6,912E-20	6,663E-20
	5,05E-07	0,533	5,94E+14	8,528E-20	8,162E-20
	4,72E-07	0,657	6,36E+14	1,0512E-19	1,091E-19

Datum:	Schülername:	Klasse:	Seite:
--------	--------------	---------	--------



EXPERIMENTIER- ERGEBNISSE	PLANCKSCHE - KONSTANTE [J.s]	ELEKTRONEN AUSTRITTSARBEIT [J]
THEORETISCH	6,626E-34	3,120E-19
MESSERGEBNIS	6,607E-34	3,110E-19
FEHLER [%]	-0,29%	-0,32%

Eine schnelle Abschätzung des Planckschen Wirkungsquantums erhält wenn man sich die Gleichungen für zwei Frequenzen f_1 und f_2 und den entsprechenden Grenzspannungen U_{01} und U_{02} anschaut:

$$e * U_{01} = h * f_1 - \Phi$$

$$e * U_{02} = h * f_2 - \Phi$$

Die Frequenzen erhält man aus den Wellenlängen und der Gleichung $f = c/\lambda$, wobei λ die Wellenlänge und $c \approx 3 * 10^8$ m/s die Lichtgeschwindigkeit ist. (Achtung: Die Wellenlängen in Meter einsetzen $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$.)

Das ist ein Gleichungssystem von 2 Gleichungen mit zwei Variablen. Wenn man nach h und Φ auflöst erhält man:

$$h = e * \frac{\Delta U_0}{\Delta f} = \frac{e * (U_{02} - U_{01})}{f_2 - f_1}$$

Datum:	Schülername:	Klasse:	Seite:
--------	--------------	---------	--------

$$\Phi = h * f_1 - e * U_{01} = h * f_2 - e * U_{02}$$

Diese Methode ist nur eine Abschätzung und kann zu erheblichen Abweichungen führen wenn ein Wert falsch gemessen wurde.

Man kann sich den Anstieg und den y-Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden natürlich auch händisch mit der Methode der kleinsten Quadrate ausrechnen (Lineare Regression). Dies kann man mit folgenden Formeln machen:

$$h = \frac{(\sum_{i=1}^5 f_i * e * U_i) - 5 * \bar{f} * e * \bar{U}}{(\sum_{i=1}^5 f_i^2) - 5 * \bar{f}^2}$$

$$\Phi = h * \bar{f} - e * \bar{U}$$

Dabei ist $\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^5 f_i}{5}$ der Mittelwert der Frequenz und $\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^5 U_i}{5}$ der Mittelwert der Grenzspannung. Der Fünfer der in den Formeln überall auftritt, kommt daher, dass wir fünf Messungen gemacht haben (fünf Wellenlängen). Diese Methode der Linearen Regression ist auch die Methode nach der das Excel-Programm vorgeht.

6.) Reinigung des Gerätes:

Vor dem Reinigen Steckernetzteil aus der Steckdose ziehen um das Gerät auszuschalten. Gerät mit einem leicht befeuchtet fusselfreien Tuch reinigen. Nur handelsübliche milde Spülmittel verwenden. Benutzen Sie keine ätzenden Scheuermittel. Beim Reinigen unbedingt darauf achten dass keine Flüssigkeit ins inneren des Gerätes gelangt. Dies könnte die Funktion des Gerätes beträchtlich beeinflussen.

7.) Experimentiergrenzen des Gerätes:

Wir haben am Anfang der Beschreibung über die Experimente von Lenard gesprochen. Kann man nun auch diese Experimente nachvollziehen? Die Antwort ist Jein! Wenn man z.B. das Experiment wonach die Grenzspannung von der Intensität der Lichtstrahlung unabhängig ist, nachstellen möchte, wird man feststellen dass es nur bedingt richtig ist, weil doch eine (kleine) Abhängigkeit existiert. Es gibt einige Gründe weswegen das so ist. Der wichtigste ist, dass die Frequenz des LED-Lichtes (nach Angaben von allen Herstellern) von dem durch die LED fließenden Strom abhängig ist. Trotzdem lässt sich auch dieses Experiment näherungsweise durchführen, wenn man den Intensitäts-Knopf nur wenig um die empfohlene Lage von 75% dreht.

Datum:	Schülername:	Klasse:	Seite:
--------	--------------	---------	--------

8.) Technische Spezifikationen des Gerätes:

TECHNISCHE SPEZIFIKATIONEN		
Photozelle	Material	Caesium (Cs)
Voltmeter	Anzeige	3 1/2 Digit, LCD
	Genauigkeit	0,5% (typisch)
Amperemeter	Anzeige	3 1/2 Digit, LCD
	Genauigkeit	1% (typisch)
Abmessungen	BxHxT = 280 mm x 120 mm x 160 mm	
Gewicht	ca. 1kg	

Datum:	Schülername:	Klasse:	Seite:
--------	--------------	---------	--------