

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Physikalische Grundlagen	2
2.1	Dualismus des Lichts	2
2.2	Energie eines Photons	3
2.3	Der Photoeffekt	3
2.4	Austrittsarbeit und Kontaktspannung	3
2.5	Spektralzerlegung am Geradsichtprisma	4
3	Versuchsdurchführung	4
3.1	Die Photozelle	4
3.2	Prinzip der Kompensationsmessung	5
3.3	Versuchsaufbau und Messergebnisse	6
3.4	Versuchsauswertung	6
3.5	Fehlerdiskussion	7
4	Fragen und Antworten	8
5	Verzeichnisse	9
5.1	Abbildungsverzeichnis	9
5.2	Tabellenverzeichnis	10
5.3	Literaturverzeichnis	10

Anhang A: Messprotokoll aus dem Praktikum

1 Einleitung

Das sichtbare Licht zieht seit jeher die Aufmerksamkeit der Wissenschaft auf sich. Im 17. Jahrhundert entwickelte Isaac Newton die Grundlagen der geometrischen Optik unter der Annahme, Licht bestehe aus unendlich feinen, von einer Lichtquelle ausgesandten Teilchen, den Korpuskeln. Seine Theorie stand im Widerspruch mit der von Huygens aufgestellten Wellennatur des Lichts, die Anfang des 19. Jahrhunderts nach Experimenten von Young und Fresnel und durch Formulierung der Maxwell-Gleichungen für elektromagnetische Wellen allgemein anerkannt wurde.

Ende des 19. Jahrhunderts führte der von Hertz beobachtete photoelektrische Effekt zu einem mit dem Wellencharakter von Licht (elektromagnetischen Wellen) nicht erklärbar Ergebnis. Aufgrund der Ergebnisse des Photoeffekts postulierte Einstein 1905 die Quantisierung von elektromagnetischen Wellen. Elektromagnetische Wellen bestehen demnach aus Quanten, den Photonen. Die klassische Quantenmechanik erklärt den Wellen-Teilchen-Dualismus von elektromagnetischen Wellen.

In diesem Versuch soll anhand des Photoeffekts das Plancksche Wirkungsquantum, das den Zusammenhang zwischen Wellen- und Teilchencharakter von Strahlungen quantitativ beschreibt und somit eine grundlegende Bedeutung in der Quantenphysik hat, bestimmt werden.

2 Physikalische Grundlagen

Im Folgenden werden die für den Versuch wichtigen physikalischen Grundlagen beschrieben.

2.1 Dualismus des Lichts

In der Elektrodynamik werden die grundlegenden Eigenschaften von elektrischen und magnetischen Feldern durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben. Periodische Änderungen von elektrischen und magnetischen Feldern können als elektromagnetische Schwingungen beschrieben werden. Betrachtet man nun die räumliche Ausbreitung von elektromagnetischen Schwingungen, führt dies zu elektromagnetischen Wellen und der elektromagnetischen Strahlung. Der bekannteste Vertreter aus dem Spektrum der elektromagnetischen Wellen ist das sichtbare Licht. Viele Phänomene der Optik wie die Beugung, Brechung oder Interferenz von Licht können durch den Wellencharakter von Lichtstrahlen beschrieben werden.

Mit zunehmender Frequenz der elektromagnetischen Wellen treten aber immer mehr Phänomene auf, die nicht durch den Wellencharakter beschrieben werden können. Die Energieübertragung von einer elektromagnetischen Welle auf beispielsweise ein Elektron ist einer Quantisierung unterworfen, das heißt die von einer monochromatischen elektromagnetischen Strahlung übertragene Energie ist immer ein Vielfaches einer diskreten Energiemenge. Diese diskrete Energiemenge hängt nur von der Frequenz der elektromagnetischen Strahlung ab. Dies rechtfertigt eine Beschreibung einer elektromagnetischen Strahlung als einen „Strom“ von Quanten (Photonen), die jeweils eine diskrete Energiemenge tragen. Die Energie einer Strahlung kann nun als die Energie eines Photons verstanden werden, während die Intensität einer „Stromstärke“ (Teilchenanzahl pro Flächeneinheit pro Zeit) entspricht.

2.2 Energie eines Photons

Photonen tragen einen von der Wellenlänge bzw. Frequenz abhängigen Energiebetrag. Die Energie eines Photons ist mit dem Planckschen Wirkungsquantum h mit den Charakteristika der zu Grunde liegenden elektromagnetischen Wellen verknüpft. Es ist:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

Obwohl Photonen keine klassischen Teilchen sind, eignet sich doch das Modell eines Teilchens um Phänomene bei der Interaktion von Photonen und anderen Teilchen zu erklären. So kann beispielsweise beim Zusammentreffen einer elektromagnetischen Welle mit einem Elektron die Übertragung von Energie als elastischer Stoß zwischen Elektron und Photon angesehen werden. Ein Photon besteht nur aufgrund der Energie, die es trägt. Über die Energie kann einem Photon ebenfalls ein Impuls zugeordnet werden. Dies ist möglich obgleich ein Photon aller Wahrscheinlichkeit nach keine Ruhemasse besitzt. Dies liegt daran, dass sich ein Photon nur mit Lichtgeschwindigkeit bewegt und die spezielle Relativitätstheorie einem massenhaften Körper, sprich einem Teilchen mit Ruhemasse, das Erreichen der Lichtgeschwindigkeit verbietet.

2.3 Der Photoeffekt

Wechselwirkungen zwischen elektromagnetischen Wellen und Festkörpern sind mit Hilfe von Photonen relativ einfach zu erklären. Photonen können mit anderen Teilchen interagieren. Je nach Energie der Photonen treten verschiedene Phänomene auf. Der Photoeffekt tritt bereits im Bereich von $1eV$ bis $100keV$ auf. Im höheren Energiebereich ist der Compton-Effekt (bis ca $1MeV$), eine Streuung von Photonen mit gleichzeitiger Energieabgabe an Festkörpern, die Paarbildung (ab $1.022MeV$ bis ca. $6MeV$), das Erzeugen eines Teilchen-Antiteilchen-Paars aus einem Photon, und hochenergetische Kernprozesse (ab $2.18MeV$) zu beobachten.

Unter dem Photoeffekt versteht man das Freisetzen von Elektronen aus einem Leiter, der von Photonen getroffen wird. Elektronen im Valenzband von Leitern können aufgrund der Konfiguration von Leitern mit einem geringen Energieaufwand aus dem Leiter herausgelöst werden. Dieser Energieaufwand wird als Auslösearbeit W_A bezeichnet. Bei einem elastischen Stoß zwischen Photon und Elektron findet eine Energieübertragung der Photonenenergie auf das Elektron statt. Ist die übertragene Energiemenge groß genug, um die Auslösearbeit zu verrichten, wird das Elektron aus dem Leiter gelöst. Bei einem zentralen elastischen Stoß zwischen Elektron und Photon wird die gesamte Energie an das Elektron übertragen. Das Photon wird dabei vernichtet. Ist die übertragene Energie größer als die Auslösearbeit, wird die zusätzliche Energie in kinetische Energie des Elektrons umgesetzt. Dies entspricht der Energieerhaltung:

$$h \cdot \nu = E_{Photon} = W_a + E_{kin}^{e^-} \quad (2)$$

2.4 Austrittsarbeit und Kontaktspannung

Die Austrittsarbeit hängt von der Elektronenaffinität eines Stoffes (und natürlich auch von der Konfiguration des herausgelösten Elektrons) ab. Generell kann aber gesagt werden, dass Elektronen im Valenzband von Leitern geringe Austrittsarbeiten benötigen als die

Elektronen von Nichtleitern. Auch für die Austrittsarbeiten gilt die Energieerhaltung, so dass die Austrittsarbeit beim Herauslösen eines Elektrons aufgewendet werden muss und beim zurückführen des Elektrons wieder frei wird.

Werden zwei Leiter mit unterschiedlicher Elektronenaffinität leitend verbunden, so entsteht zwischen den Leiteroberflächen die nicht verbunden sind eine geringe Potentialdifferenz, die Kontaktspannung. Die Kontaktspannung kann durch die Auslösearbeiten der verschiedenen Leiter errechnet werden. Wird ein Elektron aus einem der Leiter ausgelöst und in den andern Leiter eingefügt, ergibt sich die Kontaktspannung aus der aufgewendeten Energie pro Ladungseinheit. Für ein einzelnes Elektron gilt:

$$U_{Kontakt} \cdot e = \Delta W_A \quad (3)$$

2.5 Spektralzerlegung am Geradsichtprisma

Licht unterschiedlicher Wellenlänge wird an einem Prisma aufgrund der Dispersion spektral zerlegt. Allerdings wird das Licht auch von der optischen Achse abgelenkt. Soll nun eine Spektralzerlegung mittels Prisma erfolgen und die Spektrallinien nahe der optischen Achse des Versuchsaufbaus liegen, so kann ein Geradsichtprisma eingesetzt werden. Das Geradsichtprisma wird aus drei Prismen mit ähnlichem mittleren Brechungsindex, aber unterschiedlicher Dispersion zusammengesetzt. Das entstehende Spektrum ist damit nahezu symmetrisch zur Optischen Achse und breiter, als bei der Brechung an einem einzelnen Prisma. Abbildung (1) veranschaulicht den Strahlenverlauf einzelner Lichtstrahlen im Geradsichtprisma und die spektrale Zerlegung von polychromatischem Licht.

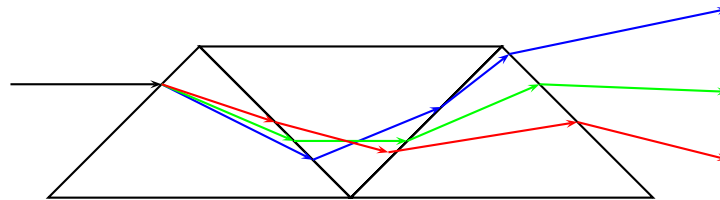


Abbildung 1: Qualitativer Verlauf einzelner Spektrallinien durch ein Geradsichtprisma.

3 Versuchsdurchführung

Ziel des Versuches ist die quantitative Bestimmung der Planck-Konstante h . Hierzu werden Kompensationsmessungen an einer Photozelle, die mit Licht unterschiedlicher Wellenlänge beleuchtet wird, vorgenommen.

3.1 Die Photozelle

Die Photozelle besteht aus einem vakuierten Glaskörper in den zwei Elektroden eingefasst sind. Wird nun die Kathode mit Licht bestrahlt, so werden Elektronen aus dieser durch den Photoeffekt herausgelöst. Einige der herausgelösten treffen auf eine Ringanode,

so dass bei einer Verbindung von Anode und Kathode ein Strom, der Photostrom, gemessen werden kann. Ob überhaupt Elektronen aus der Kathode herausgelöst werden, ist nicht etwa von der Intensität des einfallenden Lichts, sondern von der Wellenlänge des einfallenden Lichts (und natürlich der Auslösearbeit der Kathode) abhängig.

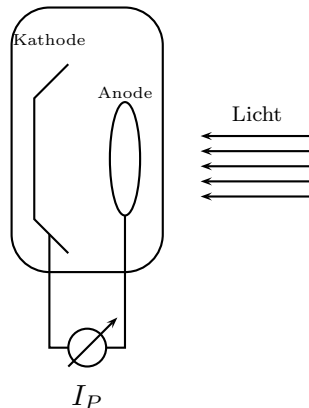


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Photozelle

Abbildung (2) zeigt den schematischen Aufbau einer Photozelle. Elektronen werden durch Lichteinfall aus der Photokathode herausgelöst. Ist die Energie des einfallenden Lichts groß genug um die Auslösearbeit der Kathode zu überwinden, so gelangt ein Teil der ausgelösten Elektronen zur Anode. Schließt man den Stromkreis zwischen Kathode und Anode, so kann ein Photostrom I_P gemessen werden. Ob ein Photostrom zu messen ist, hängt von der Energie des einfallenden Lichts ab. Die Größe des Stromes kann aufgrund der statistischen Verteilung der Richtung der Bewegung herausgelöster Elektronen nicht exakt bestimmt werden, allerdings skaliert der Photostrom mit der Intensität der einfallenden Strahlung.

3.2 Prinzip der Kompensationsmessung

Für eine qualitative Untersuchung von Photonenenergien (und dem Zusammenhang zwischen Frequenz und Energie) eignet sich die in Abbildung (2) gezeigte Beschaltung der Photozelle nicht. Für die Photonenenergie kann lediglich die Aussage getroffen werden, ob diese größer oder kleiner als die Auslösearbeit der Kathode ist. Eine energetische Untersuchung der Photonenenergie wäre über die maximale Geschwindigkeit der herausgelösten Elektronen möglich, aber technisch sehr schwierig zu bewerkstelligen.

Die Kompensationsmessung ist eine Möglichkeit auf die maximale Energie der Elektronen und somit auf die Energie der auslösenden Strahlung zu schließen. Hierbei wird zwischen Kathode und Anode eine variable Spannung angelegt. Die Kathode wird bezüglich der Anode auf positives Potential gelegt, so dass sich ein elektrisches Feld zwischen Kathode und Anode bildet, das ausgelöste Elektronen zur Kathode beschleunigt. Ab einer bestimmten Spannung U_{max} gelangen nun keine Elektronen mehr zur Anode und der Photostrom kommt zum Erliegen. Bei dieser Spannung ist die Arbeit, die die Elektronen gegen das elektrische Feld leisten müssen um zur Anode zu gelangen gerade so groß wie die maximale kinetische Energie der Elektronen. Die Potentialdifferenz zwischen den Elektroden besteht dabei aus der angelegten Spannung und der Kontaktspannung der Elektroden. Es

gilt:

$$(U_{max} + U_{Kontakt}) \cdot e = E_{kin} \quad (4)$$

Die maximale kinetische Energie der Elektronen ergibt sich aus Gleichung (2). Somit ergibt sich für die frequenzabhängige angelegte Kompensationsspannung U_{max} :

$$\begin{aligned} U_{max}(\nu) \cdot e &= E_{kin} - U_{Kontakt} \cdot e \\ &= (h \cdot \nu - W_{A,Kathode}) - (W_{A,Anode} - W_{A,Kathode}) \\ &= h \cdot \nu - W_{A,Anode} \end{aligned} \quad (5)$$

Etwas überraschend ist, dass die Spannung U_{max} nicht von der Auslösearbeit der Kathode abhängt. Unter Berücksichtigung des Phänomens der Kontaktspannung, die entweder die angelegte Spannung verstärkt oder abschwächt und somit auch auf das Feld zwischen den Elektroden wirkt, ist dies allerdings nicht mehr verwunderlich.

3.3 Versuchsaufbau und Messergebnisse

Als Lichtquelle wird in diesem Versuch eine Niederdruckquecksilberdampfampe verwendet. Diese hat den Vorteil, dass das emittierte Spektrum ein Linienpektrum mit bekannten und diskreten Wellenlängen bzw. Frequenzen ist. Licht wird mit Hilfe von Linsen und einem Spalt auf ein Geradsichtprisma abgebildet. Dieses zerlegt das Licht in die Spektrallinien, die mit Hilfe einer Blende und einer weiteren Linse einzeln auf die Kathode der Photozelle fokussiert werden können (vgl. Abb. (4)). Nach dem Einstellen der Photozelle auf eine der Spektrallinien wird nun die Kompensationsspannung U_{max} gemessen indem die Spannung zwischen den Elektroden solange erhöht wird, bis kein Photostrom, gemessen mit einem Messverstärker für Ströme, mehr nachweisbar ist. Im Versuch wurden die Kompensationsspannungen für die gelbe, grüne, blaue und violette Spektrallinie des Quecksilberspektrums mehrfach bestimmt. Tabelle 1 zeigt die für die Kontaktspannung bestimmten Werte.

$\nu/10^{14} Hz$	Farbe	U_{max} in V				
5.19	gelb	0.313	0.330	0.366	0.329	0.315
5.49	grün	0.432	0.424	0.430	0.426	0.438
6.08	blau	0.761	0.786	0.878	0.855	0.871
7.41	violett	0.952	0.995	0.972	0.991	1.008

Tabelle 1: Tabellarische Übersicht der gemessenen Werte für die Kompensationsspannung

3.4 Versuchsauswertung

Für die Kompensationsspannung erwartet man aufgrund von Gleichung (5) einen linearen Zusammenhang zur Frequenz des auslösenden Lichts. Die Bestimmung einer Regressionsgeraden bietet sich somit also als Hilfsmittel zur Auswertung an. Abbildung (3) stellt sowohl die Messwerte aus Tabelle 1 als auch die Gerade, ermittelt mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, dar.

Für die Geradengleichung der Form $x = Ax + C$ ergeben sich die Konstanten A und C zu:

$$A = 0.29(4) \cdot 10^{-14} \quad C = -1.18026(5)$$

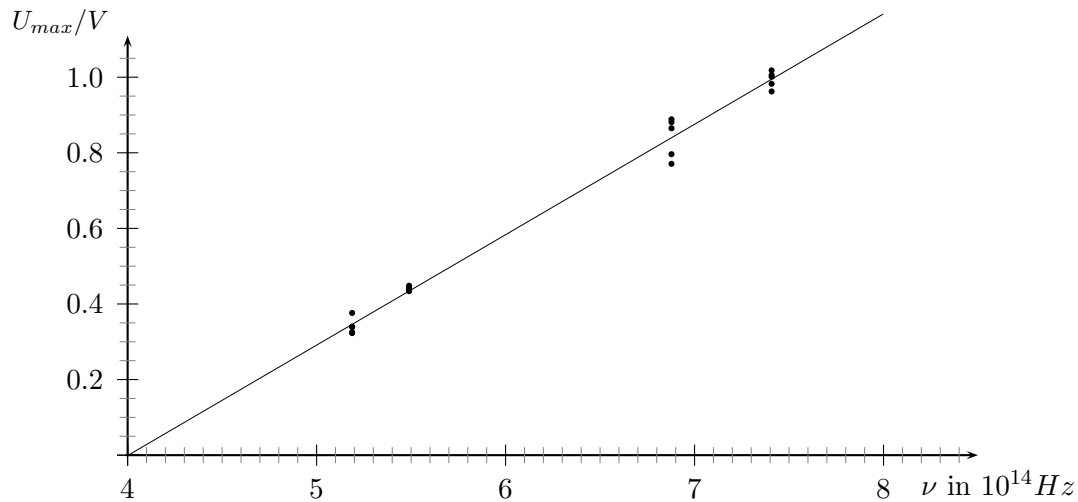


Abbildung 3: Grafische Darstellung der Messergebnisse. Zusätzlich ist die Regressionsgerade dargestellt.

Die Kompensationsspannung U_{max} ist linear mit der Frequenz verknüpft. Soll nun aus den Messwerten die Größe der Korrelation bestimmt werden, bietet es sich an von ν abhängige Kompensationsspannung aus Gleichung (5) nach der Wellenlänge ν abzuleiten. Der so entstehende Faktor entspricht der Steigung A unserer Regressionsgeraden:

$$\frac{d}{d\nu}U_{max}(\nu) = \frac{h}{e} = A \quad (6)$$

Ist nun die Elementarladung e bekannt, kann aus der Steigung der Regressionsgeraden auf die Planckkonstante h geschlossen werden. In unserem Fall ergibt sich mit dem angegebenen Literaturwert von e für das Plancksche Wirkungsquantum:

$$h = A \cdot e = 4.7(6) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Der Literaturwert für die Planckkonstante liegt mit $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ weit außerhalb des Vertrauensbereichs unserer errechneten Konstante.

3.5 Fehlerdiskussion

Der durch den Versuch bestimmte Wert für das Plancksche Wirkungsquantum weist gegenüber dem Literaturwert eine relative Abweichung von knapp 42%. Betrachtet man allerdings die Unsicherheit der Messwerte

$$\sigma_{U_{max}}^2 = 0.029V$$

und die daraus errechneten Varianzen der Koeffizienten der Ausgleichsgeraden

$$\sigma_A^2 = 0.00005 \quad \sigma_B^2 = 0.04$$

lässt dies nicht auf eine so große relative Abweichung schließen, da diese Unsicherheiten nicht zu einer derartig großen relativen Abweichung führen können.

Die Vermutung liegt also nahe, dass die Abweichung nicht durch zufällige Fehler zustande gekommen, sondern durch einen oder mehrere systematische Fehler bedingt ist. Nach dem Ausschlussprinzip können nun Fehlerquellen auf systematische Fehler durchsucht werden:

- Ein *Beschaltungsfehler* könnte eine mögliche Ursache für einen systematischen Fehler in den Messwerten sein, ist aber aufgrund genauer Kontrolle unwahrscheinlich. Ebenso scheiden Probleme mit der Spannungsversorgung der Kompensationsspannung (wurde von einer Batterie bezogen und kontinuierlich gemessen) und Quecksilberdampflampe (hier würde eine Schwankung der Spannung oder falsche Beschaltung lediglich zu einer Intensitätsminderung führen) aus.
- Ein Fehler durch die *Messung des Stroms* über den Messverstärker kann ebenfalls als unwahrscheinlich angenommen werden, da vor jeder Einzelmessung der Verstärker auf Null justiert wurde. Die Justage führt allerdings zu kleinen, aber statistischen Abweichungen.
- Ein Problem mit der *Photozelle* ist ebenfalls nicht ausgeschlossen, aber ebenfalls unwahrscheinlich.
- Fehler in der *optischen Anordnung* sind zwar nicht ausgeschlossen, tragen aber auch nicht zu einer Abweichung der Ausgleichsgeradensteigung bei, scheiden also als Grund für den systematischen Fehler aus.

Die vermutete Ursache für den systematischen Fehler liegt bei der Ausrichtung der Photozelle. Wahrscheinlich wurde die blaugrüne Spektrallinie ($\nu = 6.08 \cdot 10^{14} Hz$) als Blaue ($\nu = 6.88 \cdot 10^{14} Hz$) identifiziert, entsprechend die violette Linie ($\nu = 7.41 \cdot 10^{14} Hz$) mit der Blauen verwechselt.

Die Rechnung zeigt, dass diese Korrektur zwar zu einer größeren Unsicherheit der Regressionskonstanten führt, das Endergebnis, die Bestimmung von h , allerdings weit weniger Abweichung zeigt. So ergibt sich für die Konstanten:

$$A = 0.406 \cdot 10^{-14} \quad C = -1.76 \quad \sigma_A^2 = 0.0007 \quad \sigma_B^2 = 0.5$$

Mit diesen Werten ergibt sich bei der Bestimmung der Planckkonstante:

$$h = 6.512(1) \cdot 10^{-34} Js$$

Im Vergleich zum Literaturwert nur noch eine kleine relative Abweichung von 1.8%.

4 Fragen und Antworten

1. Der Strahlenverlauf im Spektrometer.

Die Erklärung zur Zeichnung kann im Abschnitt 3.3 nachgelesen werden. Die Spektralzerlegung am Gradsichtprisma ist in Abschnitt 2.5 näher erläutert. Der Verlauf ist in Abbildung (4) zu sehen.

2. Welche Rollen spielen die Austrittsarbeiten der Elektroden im Versuch?

Die Austrittsarbeit der Kathode ist der Energiebetrag welcher zum Auslösen der Elektronen aus dem Katodenmaterial aufgebracht werden muss. Die Austrittsarbeit der Anode ist analog dazu der Energiebetrag welcher beim Eintreten der Elektronen in die Anode wieder frei wird. Für das Auftreten eines Photostroms muss die Energie der Strahlung mindestens der Austrittsarbeit der Kathode entsprechen. Bei der Kompensationsmessung ist die Austrittsarbeit der Kathode aufgrund der Kontaktspannung nicht ausschlaggebend, sondern es muss die Austrittsarbeit der Anode „negativ“ berücksichtigt werden.

3. Die Bedeutung des Achsenabschnitts der Ausgleichsgeraden.
Aus Gleichung (5) ist ersichtlich, dass der Wert des y-Achsenabschnitts, die Spannung ist, die multipliziert mit der Elementarladung e gerade dem Energiebetrag der Austrittsarbeit der Anode entspricht. Analog kann durch den Nulldurchgang der Spannung mit der Frequenz der Strahlung und der Planckschen Konstante auf die Austrittsarbeit der Kathode geschlossen werden.
4. Methoden zur Bestimmung von h .
Prinzipiell eignen sich alle Phänomene, in denen eine Quantisierung von elektromagnetischen Strahlungen eine Rolle spielt zur Bestimmung der Planckkonstanten. Mit dem *Compton-Effekt* kann der Impuls von Photonen bestimmt werden. Dieser ist abhängig von der Energie der Photonen, die wiederum mit h mit der Frequenz der Wellenlänge zusammenhängen. Auch denkbar wäre eine Messung von *emittierten Wellenlängen* bei betragsmäßig bekannten und diskreten Energieübergängen. Im Bremsspektrum der Röntgenstrahlen ist die minimale Wellenlänge durch die Energie der gebremsten Elektronen gegeben. Hieraus lässt sich ebenfalls die Plancksche Konstante bestimmen.
5. Haben alle durch den Photoeffekt herausgelösten Elektronen die gleiche kinetische Energie?
Die Energieübertragung zwischen Photonen und Elektronen findet beim elastischen „Stoß“ statt. Dabei ist die übertragene Energiemenge statistisch verteilt. Eine Aussage über die kinetischen Energie von herausgelösten Elektronen ist demnach nur durch eine maximale kinetische Energie und eine mittlere kinetische Energie möglich.
6. Der Impuls eines Photons.
Der Impuls für massenhafte Körper ist in der Mechanik durch das Produkt der Masse und der Geschwindigkeit gegeben. Für ein Photon, welches keine Ruhemasse besitzt, scheidet also diese Definition aus. Hier kann aber über die Masse-Energie-Äquiavalenz argumentiert werden. Es ist:

$$E = mc^2 \quad \Rightarrow \quad p = \frac{E}{c}$$

Ein Photon der Energie $E = h \cdot \nu$ hat also einen Impuls von:

$$p = \frac{h \cdot \nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

1	Strahlenverlauf im Geradsichtprisma	4
2	Schematischer Aufbau einer Photozelle	5
3	Grafische Darstellung der Messergebnisse	7
4	Schematischer Strahlenverlauf im Spektrometer	10

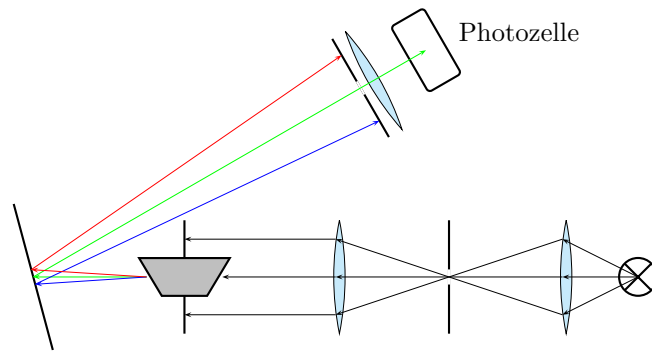


Abbildung 4: Schematischer Strahlenverlauf im Spektrometer

5.2 Tabellenverzeichnis

1	Übersicht der Messwerte	6
---	-----------------------------------	---

5.3 Literaturverzeichnis

[WPEnz] Verschiedene *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie* <http://de.wikipedia.org>

[Hal03] D.HALLIDAY, R.RESNICK, J.WALKER *Physik* WILEY-VCH GmbH&Co. KGaA
1.Auflage 2003

[APScript] B.RUNGE *Versuchsanleitung zur h -Bestimmung mit dem Photoeffekt*