

Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums mithilfe von farbigen Leuchtdioden als Schulversuch

28.12.2018

Zusammenfassung

Der Einsatz von Leuchtdioden zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums im Schulversuch oder Schülerpraktikum wird untersucht. Leuchtdioden sind mittlerweile in vielen Farben preisgünstig zu haben. Das legt nahe, sie im Schülerversuch einzusetzen. Es werden verschiedene Messmethoden und der notwendige experimentelle Aufwand diskutiert.

1 Vorüberlegungen

“Die magische Formel, aus der sich die ganze Quantenmechanik herauswickeln läßt stiftet einen universellen Zusammenhang zwischen der Frequenz f eines Schwingungsvorgangs und der damit verknüpften Energie: $E = hf$ “ [1]. Nachdem die Quantenmechanik nun schon seit Jahrzehnten einen bedeutenden Anteil an der Schulphysik einnimmt, und eine der wichtigsten Grundlagen zum Verständnis unserer geistigen und technischen Entwicklung darstellt, halte ich es für geboten, den Schülern die Bedeutung dieser Universalkonstanten nahezubringen. Nur die Kenntnis der Naturkonstanten ermöglicht physikalische Erkenntnisse, weil nur durch sie die Zusammenhänge hergestellt werden können. Diese Tatsache den Schülern zu vermitteln, sollte das Ziel der Oberstufenphysik sein. Und womit ließe sich dies besser bewerkstelligen, als mit einer Konstanten, die unseren Alltag und auch unsere Einstellungen durch Entwicklungen in den Kommunikationstechnologien in einem Maße verändert hat, wie es vor wenigen Jahren noch unvorstellbar gewesen wäre. Dazu gehört insbesondere ihre experimentelle Bestimmung.

Die klassischen Methoden zur Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums sind die Gegenfeldmethode und die Grenzfrequenz im Röntgenbremsspektrum. Beide Methoden sind für den Schulunterricht nur begrenzt geeignet.

Der Versuch von Hallwachs und seine Weiterentwicklung, die Gegenfeldmethode sind als qualitative Versuche mit Sicherheit auch weiter eine sinnvolle Grundlage zur Einführung in die quantenmechanische Denkweise. Die quantitative Variante bringt die Schulphysik allerdings schnell in mehrfacher Weise an ihre Grenzen. So darf die Bestrahlung nicht zu intensiv, aber auch nicht zu schwach sein. Das Eine führt zu einem Gegenstrom, das Andere zu zu geringer Stromstärke, was die Messgenauigkeit der hochempfindlichen Messverstärker beeinträchtigt. Fremdlicht muss in jedem Fall vermieden werden; sonst muss man sich mit undefinierten Wellenlängen herumschlagen. Das heißt, entweder ist der Raum abzudunkeln, oder das Experiment findet in einer Black Box statt, beides die Beobachtung durch die Schüler behindernd. Die Ergebnisse liegen in einem Genauigkeitsbereich von ca. 10 - 20 %. Die Schulbücher vermeiden nach meiner Erfahrung wirkliche, im Unterricht erzielte Messergebnisse anzugeben.

Die Bestimmung mit Hilfe der Röntgenbremsstrahlung erfordert ein zugelassenes Röntgengerät und die Aufnahme des Spektrums. Diese Ausstattung ist nach meiner Kenntnis in vielen Schulen aus strahlenschutztechnischen Gründen nicht mehr vorhanden, bzw. der Versuch wird nicht mehr durchgeführt. Dies auch deshalb, weil der experimentelle Aufwand erheblich und die Anordnung für die Schüler schwer durchschaubar ist. Hinzu kommt die komplexe Auswertung mithilfe der Bragg-Reflexion.

Die Firma NEVA hat schon vor Jahrzehnten eine Versuchsanordnung auf dem Markt gebracht, die LEDs verschiedener Wellenlänge einsetzte, um h zu bestimmen. Eine Durchführung und Auswertung ist auf der Homepage von LEIFI realisiert (ELWE-Modell) [2].

Die Entwicklung auf dem Halbleitermarkt hat mich dazu veranlasst, mir Gedanken darüber zu machen, wie diese elegante Methode verbessert werden könnte, und ob aufgrund der unglaublichen Preisentwicklung eine realisierbare und nicht zu fehlerhafte Versuchsanordnung für Schülerversuche entwickelt werden könnte. Im Folgenden werde ich meine Versuche darstellen und diskutieren.

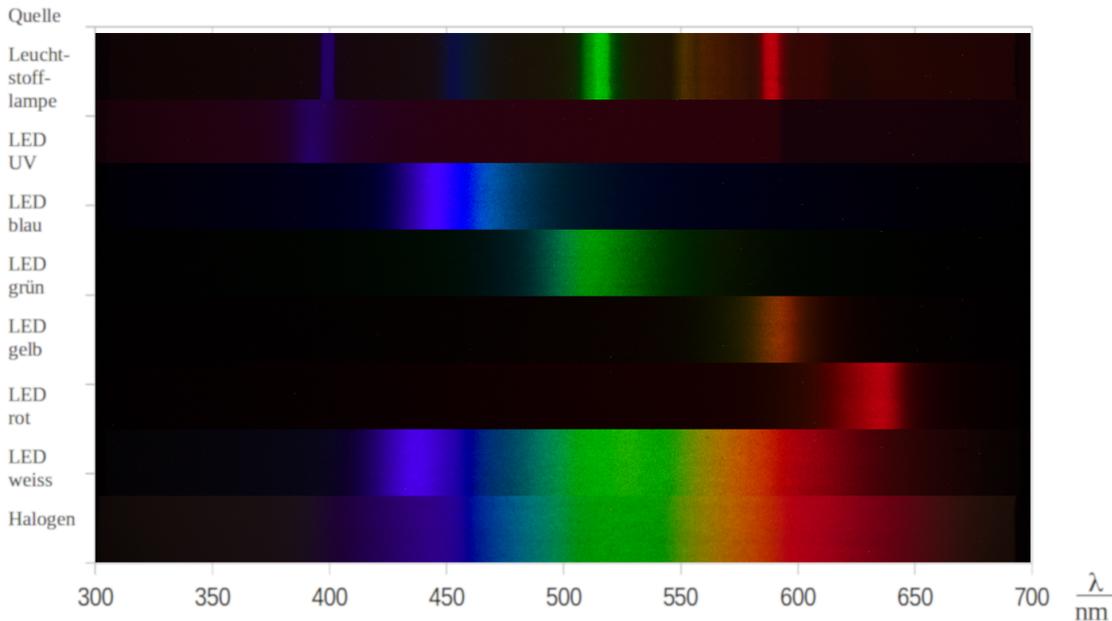


Abbildung 1: Spektren der verwendeten LEDs und weiterer Lichtquellen

2 Grundlagen und Fragestellung

Die beiden oben erwähnten Methoden - Gegenfeldmethode mit Hilfe des Quecksilberspektrums oder mit monochromatischen Farbfiltern und Röntgenbremsspektrum - sind LED-basierten Versuchsanordnungen deshalb überlegen, weil es sich im einen Fall um sehr scharfe Maxima und im anderen Fall um einen eindeutig festgelegten Punkt handelt. Der Nachteil der LEDs liegt in der Tatsache, dass es sich hier um festkörperspezifische Bänder (Abb. 1) handelt, so dass die Frage nach der relevanten Frequenz das entscheidende Entscheidungskriterium ist.

Die Leuchtstofflampe basiert im Wesentlichen auf dem Quecksilberspektrum, allerdings mit etwas verbreiterten und zusätzlichen Linien aufgrund ihrer Beschichtung. Die LEDs sind dieselben, die ich in meinen Versuchen eingesetzt habe. Die weiße LED und die Halogenlampe habe ich als Referenz dazugenommen. Alle Spektren sind unter exakt gleichen Bedingungen (Abstände und Fotoeinstellungen, Spaltbreite) aufgenommen worden. Die Gitterkonstante betrug $n = 500 \text{ mm}^{-1}$.

Trotzdem offenbart das Bild den Unterschied zwischen den Spektren der Leuchtstofflampe und der LEDs sehr deutlich. Je schmaler die Linien sind, umso genauer sind die Wellenlängen zu ermitteln. Und daraus ergibt sich auch die entscheidende Fragestellung: *Wie treffe ich die vom Hersteller angegebene Wellenlänge der LED am besten?*

Eine andere Möglichkeit wäre natürlich, die aus den Spektren ermittelte Wellenlänge zu nutzen, wobei sich die obige Fragestellung aufgrund der Bänderbreite nicht ändern würde. Ich bin deshalb vor allem aus didaktischen Gründen von den Herstellerangaben ausgegangen.

Grundsätzlich werde ich zwischen zwei Methoden unterscheiden, einen Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Spannung einer Diode zu untersuchen:

1. Spannungsmessung an der emittierenden Diode (passiv).
Hier ist ein großes Spektrum an Möglichkeiten für Messverfahren möglich z.B.:
 - a) Aufnahme der Kennlinien und Ermittlung der Durchbruchspannung (bei Leifi verwendet);
 - b) minimale Stromstärke;
 - c) Spannungsmessung bei der ersten wahrnehmbaren Lichterscheinung der Diode.
2. Spannungsmessung an der absorbierenden Diode (aktiv, Diode als Spannungsquelle).
Diode wird als Photodiode verwendet und die Spannung gemessen. Im Rahmen dieser Messreihen bietet es sich an, unterschiedliche Lichtquellen zu untersuchen

Die Begriffe "aktiv" und "passiv" sind auf die Spannung bezogen.

3 Untersuchungen, Ergebnisse, Bewertung

Die fünf zu untersuchten Farbdioden haben lt. Hersteller die Wellenlängen:

- rot 625 nm
- gelb 590 nm
- grün 525 nm
- blau 470 nm
- violett 403 nm

3.1 Spannungsmessung an der emittierenden Diode (passiv)

3.1.1 Durchbruchspannung

Um die Durchbruchspannung zu ermitteln müssen zunächst die Kennlinien der Dioden gemessen werden (siehe unter Elektrizitätslehre/Kennlinien). Dann wird der stark ansteigende Teil der Kurve auf $I = 0$ extrapoliert. Der Schnitt mit der Spannungsachse ist die Durchbruchspannung. In Abb. 2a) ist das Ergebnis dargestellt.

Bis auf den Punkt der grünen Diode liegen die Punkte auf einer Geraden, wobei der grüne Ausreißer nur geringen Einfluss auf die Geradensteigung als Ergebnis für das Plancksche Wirkungsquantum (Einheit Elektronenvoltsekunden) hat. Allerdings ist der Wert mit einer Abweichung von ca. 17 % ganz erheblich. Wiederholte Messungen mit dieser Methode lieferten nahezu konstant dieses Ergebnis.

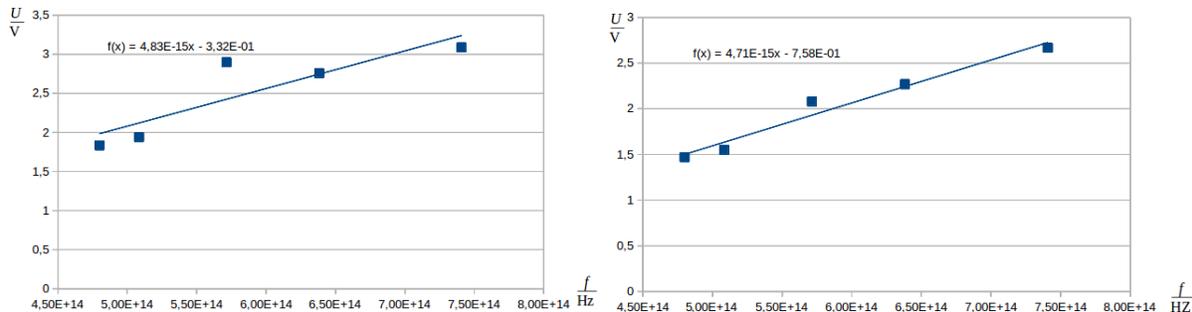


Abbildung 2: a) U - f -Diagramm Durchbruchspannung und b) U - f -Diagramm minimale Stromstärke

3.1.2 Minimale Stromstärke

Dieses Verfahren ist dem vorhergehenden Verfahren sehr ähnlich, nur dass nicht die Kennlinie aufgenommen wird, sondern der Punkt des Beginns des Anstieges durch Beobachtung der Stromstärke festgestellt wird. Die Ergebnisse sind in Abb. 2b) dargestellt. Der Vergleich beider Punkteverteilungen zeigt, dass beim Stromstärkeverfahren die Spannungswerte generell etwas tiefer liegen; der grüne Ausreißer ist deutlich geringer; das Ergebnis einer Geraden als vernünftige Näherung steht auch hier außer Zweifel. Der Ergebniswert für die Steigung kommt dem Literaturwert für h geringfügig näher, ohne aber wirklich überzeugend zu sein.

3.1.3 Minimale Lichterscheinung

Rein gefühlsmäßig scheint dieses Verfahren zu einer großen Streuung zu führen. Die Tatsache, dass verschiedene Farben in ihrer Intensität unterschiedlich wahrgenommen werden, sollte zu hohen Fehlerquoten führen. Dies war bei meinen Versuchen aber durchaus nicht der Fall. Die Ergebnisse lagen im Bereich der anderen beiden passiven Verfahren (12 - 20 % zu hoch siehe Abb. 3a).

Was allerdings hier sehr schön zur Geltung kommt, ist, dass es sich um eine Gerade handelt. Darin haben alle meine Versuche zu dieser Methode übereingestimmt.

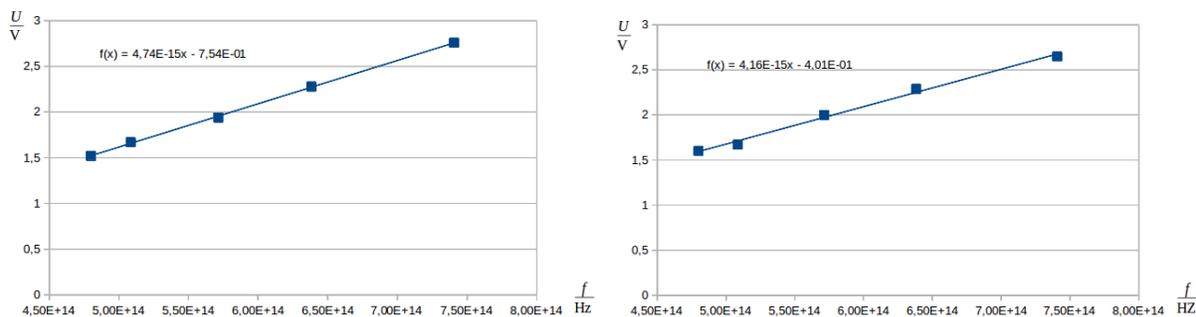


Abbildung 3: a) U - f -Diagramm minimales Leuchten und b) Diode beleuchtet (aktiv)

3.2 Spannungsmessung an der beleuchteten Diode (aktiv)

Im Rahmen meiner Messungen habe ich festgestellt, dass die Ergebnisse erheblich von der Lichtquelle abhängen. Die Ergebnisse sind nachfolgen dargestellt. Die Werte bei waren intensiver Sonneneinstrahlung $4,65 \cdot 10^{-15}$ eVs und $4,33 \cdot 10^{-15}$ eVs; mit der im Spektrum dargestellten Halogenlampe lagen sie zwischen $4,31 \cdot 10^{-15}$ eVs und $4,42 \cdot 10^{-15}$ eVs. Die in der Testreihe verwandte UV-LED reagierte auf keine andere Lichtquelle, als auf eine gleiche UV-LED. Die anderen LEDs wurden alle mit derselben weißen LED (siehe Spektrum) bestrahlt. In einer Testreihe mit 11 Versuchen habe ich als Mittelwert $h = 4,15 \cdot 10^{-15} \pm 3,34 \cdot 10^{-17}$ eVs erhalten. Der kleinste Wert lag bei $4,10 \cdot 10^{-15}$ eVs, der größte bei $4,18 \cdot 10^{-15}$ eVs. In Bild 3b) habe ich ein Diagramm aus dieser Messreihe dargestellt. Die Ergebnisse aller aktiven Varianten waren besser, als die der passiven. Dabei schnitten die mit LEDs erzielten Ergebnisse a, besten ab.

4 Folgerungen aus den Ergebnissen der Messreihen

4.1 Ergebnisse

Alle oben beschriebenen Methoden führen zu aussagekräftigen und brauchbaren Ergebnissen. Insbesondere interessant finde ich, dass

1. alle Versuche mit einfachen Mitteln, bei Tageslicht und damit für die Schüler nachvollziehbar durchgeführt werden können;
sie eignen sich deshalb auch hervorragend zu Schülerübungen;
2. die Linearität des Zusammenhangs zwischen f und W_{Photon} bei allen Versuchen sehr gut herauskommt;
3. der Literaturwert von h mit einer Genauigkeit von deutlich unter 20% gemessen werden kann.

4.2 Folgerungen

Es lässt sich jede diese Methoden als Schülerversuch ausführen. Die Netz- und Messgeräte sind an jeder Schule mit Oberstufe vorhanden, die Dioden sind handelsüblich und lassen sich mit geringen Kosten in ausreichender Anzahl beschaffen. Zusätzlich lassen sich diese Dioden (mit etwas größerem Aufwand) auch zu Spektralversuchen in Schülerübungen einsetzen. Die Messungen können im Rahmen unterschiedlichster Organisationsformen durchgeführt werden.

Nun stellt sich die Frage, welche Methode angewandt werden soll. Aus pädagogischen und didaktischen Gründen steht für mich die Methode minimaler Helligkeit an erster Stelle, obwohl sie nicht diejenige ist, die zu den besten Ergebnissen führt. Trotzdem bin ich der Auffassung, dass sie die Schüler am meisten zu Zusatzüberlegungen und Diskussionen anregt, weil hier das physiologische Moment mit einfließt, was bei einem Präzisionsversuch in dieser Größenordnung nicht erwartet wird. Ich könnte mir vorstellen, dass durch solche Diskussionen auch Schüler mit geringerem Interesse an der Physik aktiviert werden können.

5 Die Ausstattung

Um die Versuche in Form eines Schülerpraktikums durchführen zu können, sind entsprechend viele Gleichspannungsnetzgeräte, Spannungsmesser, Messeinrichtungen und natürlich Dioden vorzuhalten. Nach meiner Auffassung muss aber nicht jede Gruppe den kompletten Diodensatz zur Verfügung haben. Drei von jeder Sorte reichen. Will man die aktive Methode anwenden, benötigt man als Lichtquellen zusätzlich drei UV-Dioden und für jede Gruppe eine weiße Diode. Jede aktiv betriebene Diode sollte durch einen Vorwiderstand geschützt sein.

Literatur

- [1] Hermann Weyl, Gruppentheorie und Quantenmechanik, unveränderter reprografischer Nachdruck der 2. umgearbeiteten Auflage, Leipzig 1931, c 1967 by S. Hirzel, Stuttgart.
- [2] <http://www.leifphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/versuche/h-bestimmung-mit-leds>.