

Einführung in die Quantenphysik - Vorlesung 14

JOCHEN GEPPERT / DIDAKTIK DER PHYSIK

Sommersemester

1. DER ÄUSSERE LICHELEKTRISCHE EFFEKT

HALLWACHS belichtete 1887 eine mit einem Elektrometer verbundene, isoliert aufgestellte negativ geladene Metallplatte mit kurzwelligem ultraviolettem Licht. Er entdeckte, dass die Metallplatte negative elektrische Ladungen abgibt. Diese Entdeckung wird *äußerer lichtelektrischer Effekt* genannt. Man kann ihn experimentell nachweisen, indem man auf den Teller eines Elektrometers eine Metallplatte stellt und diese mit ultraviolettem Licht bestrahlt. Diese Bestrahlung führt zur Herauslösung von Elektronen aus dem Metall und zur positiven Aufladung des Elektrometers, dessen Plättchen sich infolgedessen durch ihre gegenseitige Abstossung spreizen¹. LENARD untersuchte diesen Effekt weiter und kam bis 1902 zu den folgenden experimentellen Ergebnissen:

1. Die Auslösung der Elektronen aus dem Metall erfolgt unabhängig von der Intensität des eingestrahnten Lichts erst oberhalb einer Grenzfrequenz ν_{gr} .
2. Die kinetische Energie der austretenden Elektronen wächst linear mit der Frequenz des eingestrahnten Lichtes und ist unabhängig von seiner Intensität

$$E_{kin} = a\nu + b \quad (1)$$

Die Konstante a ist unabhängig vom verwendeten Metall, die Konstante b dagegen ist vom verwendeten Metall abhängig.

3. Die Anzahl N der pro Zeit austretenden Elektronen ist der Intensität des eingestrahnten Lichts proportional.
4. Der Fotostrom stellt sich praktisch sofort mit Beginn der Lichtbestrahlung des Metalles ein.

2. DAS VERSAGEN DER MAXWELL-WELLENTHEORIE DES LICHTS ZUR BESCHREIBUNG DES LICHELEKTRISCHEN EFFEKTS

Die oben aufgeführten experimentellen Resultate lassen sich mit dem Wellenbild des Lichts nicht erklären. Die soll im Folgenden zumindest qualitativ erläutert werden.

¹Das keine positiven Ladungen herausgelöst werden, kann man ebenfalls experimentell leicht nachweisen. Dazu lädt man die Metallplatte auf dem Elektroskop - z.B. durch blankschmiegeln - positiv auf. Die Plättchen des Elektroskops spreizen sich. Bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht nimmt diese Spreizung nicht ab, was jedoch zu erwarten wäre, wenn positive Ladungen herausgelöst würden.

Die Energiedichte einer elektromagnetischen Welle teilt sich auf in einen elektrischen und einen magnetischen Anteil²:

$$\bar{w}_e = \frac{1}{4} \varepsilon_r \varepsilon_0 |\mathbf{E}_0|^2 \quad (2)$$

$$\bar{w}_m = \frac{1}{4} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} |\mathbf{B}_0|^2 \quad (3)$$

Beide Anteile sind gleich groß, so dass man

$$\bar{w} = \bar{w}_e + \bar{w}_m = \frac{1}{2} \varepsilon_r \varepsilon_0 |\mathbf{E}_0|^2 \quad (4)$$

erhält. Unter der Intensität I einer Strahlung an einem bestimmten Ort des Raumes versteht man den Quotienten aus der Energie, die in einem Zeitintervall Δt auf eine Fläche ΔA an diesem Ort fällt und dem Produkt aus der Zeit und der Fläche:

$$I = \frac{E}{\Delta t \cdot \Delta A} \quad (5)$$

Die Fläche ΔA wird dabei so gewählt, dass sie senkrecht zur Strahlrichtung steht. Aus beiden Formeln (4) und (5) kann man sofort erkennen, dass die Energie bzw. die Intensität einer elektromagnetischen Welle unabhängig von ihrer Frequenz ist!

Eine durch die Wellentheorie des Lichts als elektromagnetische Welle naheliegende Annahme ist die, dass die elektrische Feldstärke des Lichts auf die Elektronen wirkt und diese zum Mitschwingen anregt. Wenn die dadurch erzeugten Schwingungsamplituden groß genug werden, können die Elektronen aus dem Metall ausgelöst werden. Man muss sich hierbei diesen Vorgang so denken, dass das einzelne Elektron von der auffallenden Strahlung immer mehr Energie aufnimmt. Ist seine Energie schließlich groß genug ist, dass es die normalerweise sein Austreten aus dem Metall verhindernden Kräfte überwindet, so fliegt es mit einer bestimmten Geschwindigkeit heraus. Es ist dann weiter zu erwarten, dass die nach dem Austritt noch vorhandene kinetische Energie bzw. die Geschwindigkeit der Elektronen umso größer ausfällt, je größer die Intensität und damit die Energie der einfallenden Welle ist. Man erwartet somit im Wellenbild, dass Licht jeder Frequenz Elektronen auslöst, wobei die Zeit, die vergeht, bis der Prozess einsetzt nur von der Intensität des Lichts abhängig ist³. Die erste aufgeführte experimentelle Beobachtung steht im krassen Widerspruch zu dieser theoretischen Erwartung. Bestrahlt man die Metallplatte mit einer Lichtfrequenz unterhalb der für das Metall spezifischen Grenzfrequenz, so kann man die Intensität so stark wählen, wie es experimentell möglich ist, es werden keine Elektronen ausgelöst!

Weiter sollte man erwarten, dass eine gewisse Zeit vergehen muss, bis das Elektron

²Die beiden Vektoren $\mathbf{E}_0, \mathbf{B}_0$ seien die Amplituden des elektrischen bzw. magnetischen Anteils der elektromagnetischen Welle. Es gilt:

$$\mathbf{k} \times \mathbf{B}_0 = -\frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E}_0$$

wie aus Vorlesung 5, Gleichung (66) bekannt ist.

³Mit anderen Worten, je schwächer das eingestrahlte Licht ist, umso länger dauert es, bis die Elektronen genügend Energie aufgenommen haben, um schließlich das Metall verlassen zu können.

genügend Energie von der Strahlung aufgenommen hat. Mit anderen Worten dass also der Auslöseprozess der Elektronen umso später einsetzt, je schwächer die Strahlung ist. Auch diese theoretische Vorhersage steht im Widerspruch zu den experimentellen Ergebnissen!

Ebenso unverständlich ist die beobachtete Abhängigkeit der Elektronengeschwindigkeit von der Frequenz der einfallenden Strahlung, sowie die Existenz einer Grenzfrequenz. Ist die Frequenz der einfallenden Welle kleiner, so dauert der Auslöseprozess eben länger, denn Energie führt die Welle ja in jedem Fall mit sich.

Nach klassischer Auffassung könnte man eher den umgekehrten Effekt erwarten, dass nämlich das Elektron mit zunehmender Frequenz wegen seiner Trägheit immer weniger Energie aufnimmt. Die Auffassung, dass die Energie der Elektronen aus der einfallenden Lichtstrahlung stamme - da sie frequenzabhängig ist - ist also nach der klassischen Theorie unhaltbar. Sie widerspricht den experimentellen Ergebnissen.

Es bleibt als zweite Möglichkeit zu erörtern, dass die Energie der Photoelektronen aus dem Wärmehalt des Metalls - verursacht durch das einfallende Licht, das ihn erwärmt - stammt, wobei der Strahlung dann nur auslösende Wirkung zukäme. Aber dann ist ein gesetzmäßiger Zusammenhang mit der Frequenz des einfallenden Lichts nicht zu verstehen, und andererseits sollte man eine Erhöhung der Geschwindigkeit erwarten, wenn das Material hoch erhitzt wird. Auch dieser Effekt tritt experimentell nicht ein. Damit scheidet auch diese Möglichkeit der Erklärung des Photoeffekts aus. Da aber die Energie dann nur aus der Strahlung oder aus dem Material kommen kann, war ein Verständnis der Erscheinungen durch die klassische Wellentheorie des Lichts unmöglich. Ein Zahlenbeispiel soll die Schwierigkeiten einer klassischen Erklärung verdeutlichen.

Beispiel:

Eine Glühlampe von 100 W elektrischer Leistung liefert im Abstand von 1m eine Bestrahlungsstärke von ungefähr $7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Dieses Licht soll auf ein lichtelektrisch besonders wirksames Metall, z. B. Na fallen. Wegen der hohen Reflexion dringen nur etwa 10 % des Lichts in das Metall ein, wo es innerhalb einer Strecke von etwa $1.5 \cdot 10^{-6} \text{m}$ vollständig absorbiert wird.

Betrachten wir ein Volumen $V = 1.5 \cdot 10^{-6} \text{cm}^3$. Na hat das Atomgewicht 23 und die Dichte $1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, d. h.

$$\begin{aligned} 6.023 \cdot 10^{23} \text{ Na - Atome} &\stackrel{!}{=} 23 \text{ g} \\ 2.62 \cdot 10^{22} \text{ Na - Atome} &\stackrel{!}{=} 1 \text{ g} \\ 2.62 \cdot 10^{16} \text{ Na - Atome} &\stackrel{!}{=} 10^{-6} \text{ g} \end{aligned}$$

$$\rho = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 10^{-6} \frac{\text{g}}{10^{-6} \cdot \text{cm}^3} = 1.5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{g}}{1.5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{cm}^3}$$

In dem Volumen befinden sich etwa $4 \cdot 10^{16}$ Atome und etwa ebenso viele "freie" Elektronen. Die Energie kann als an diese $4 \cdot 10^{16}$ Elektronen abgegeben werden. Von der absorbierten Energie ist aber nur der Teil wirksam, dessen Wellenlänge unterhalb $0.543 \mu\text{m}$, der langwelligen Grenze für Na liegt. Das reduziert die für den lichtelektrischen Effekt zur Verfügung stehende Energie der Elektronen auf $5 \cdot 10^{-23} \text{ W}$. Dem Haltepotenzial von 2V entspricht eine maximale kinetische Energie der Elektronen von $2eV = 3.2 \cdot 10^{-19} \text{Ws}$.

Zur Aufbringung dieser Energie aus der oben berechneten Leistung brauchte also jedes Elektron die Zeit von rund $6 \cdot 10^3$ s, also nicht ganz zwei Stunden, ein Ergebnis, welches in krassem Widerspruch zum Experiment steht.

Dieses unsinnige Ergebnis ergibt sich unter der Voraussetzung, dass die Energie des Strahlungsfeldes gleichmäßig auf die ganze Wellenfläche verteilt ist. Lässt man diese an sich für Wellen vollkommen plausible Annahme fallen, so kann der lichtelektrische Effekt ganz zwanglos erklärt werden.

Man müsste annehmen, dass sich die Energie des Strahlungsfeldes kurzzeitig auf sehr kleine Bereiche mit atomaren Abmessungen konzentrieren kann, was bereits ein Widerspruch zur klassischen Wellentheorie ist. Nach dieser muss ein Strahlungsfeld mindestens Abmessungen von der Größenordnung der Wellenlänge besitzen. In einer neuartigen Beschreibung besteht das Licht also nicht aus einem örtlich und zeitlich konstanten Energiestrom, sondern schwankt statistisch um den Mittelwert. Das Licht besteht also aus einer Art "Körnigkeit". Die Energie wird in "Klumpen" oder "Korpuskeln" transportiert. Diese Energiepakete werden Photonen oder Lichtquanten genannt. Eine Korpuskulartheorie im klassischen Sinne erklärt zwar zwanglos den lichtelektrischen Effekt, führt jedoch zu Schwierigkeiten bei der Erklärung von Beugung und Interferenz.

3. EINSTEINS KORPUSKULARE THEORIE DES LICHTS UND DEREN EXPERIMENTELLE PRÜFUNG

Wenn nun wieder eine Korpuskulartheorie des Lichts eingeführt werden muss, so ist damit natürlich keine Rückkehr zur Korpuskulartheorie NEWTONs⁴ gemeint, diese würde nichts nützen.

EINSTEIN hat vielmehr die Lichtkorpuskeln mit den Energiequanten PLANCKs identifiziert. Er machte 1905 die folgenden Annahmen:

1. Monochromatisches Licht der Frequenz ν besteht aus einzelnen Lichtquanten oder Photonen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit c bewegen, wobei jedes Photon als Korpuskel seine Energie $h\nu$ beibehält.
2. Ein Photon teilt seine Energie momentan dem getroffenen Elektron mit. Die Energie $h\nu$ wird benötigt, um das Elektron aus dem Metall zu lösen (Austrittsarbeit A), überschüssige Energie wird in kinetische Energie des Elektrons umgewandelt.

h ist dabei das Wirkungsquantum:

$$h = (6.626176 \pm 0.000036) \cdot 10^{-34} \text{ Js} \quad (6)$$

Diese Konstante wurde von PLANCK bei der Beschreibung der Strahlung eines erhitzten schwarzen Hohlraums gefunden. Er ersetzte dabei die durch die Temperatur

⁴Für NEWTON bestand Licht aus winzigen elastischen Teilchen, die aus einer Lichtquelle ausgestrahlt werden.

in Schwingungen versetzten Elektronen der Hohlraumwand durch mechanische harmonische Oszillatoren und kam dabei zu dem Ergebnis, dass ein harmonischer Oszillator nur diskrete Energiezustände einzunehmen vermag, die sich um ganzzahlige Vielfache $h\nu$ unterscheiden⁵.

Die Austrittsarbeit A ist eine feste, für das betreffende Material charakteristische Größe. Wenn man

$$A = e\Phi$$

setzt, so bezeichnet Φ das "Austrittspotenzial". Als übliche Energieeinheit wird das Elektronenvolt (eV) verwendet. Aus der Theorie EINSTEINs ergab sich für die Energiebilanz des lichtelektrischen Effekts:

$$h\nu = \frac{1}{2}m_e v^2 + A, \quad h = 6.6256 \cdot 10^{-34} \text{Js} \quad (7)$$

⁵In diesem Hohlraum entstehen stehende elektromagnetische Wellen, die dann mit ihrer charakteristischen Frequenz ν Energie nach außen - durch ein Loch im Hohlraum - abgeben.

4. PRÜFUNG DER EINSTEIN-THEORIE MIT LICHT

4.1. Die Gegenspannungsmethode. Experimentell geht man so vor, dass man z.B. Licht einer Quecksilberdampflampe durch ein Prisma spektral - und damit in verschiedene Frequenzen - zerlegt. Mit dem Licht einer bestimmten Frequenz wird eine Fotozelle bestrahlt. Zwischen den beiden Elektroden der Fotozelle liegt eine veränderliche Spannung, die so gepolt ist, dass man zwischen den Elektroden ein elektrisches Feld aufbauen kann, dass die ausgelösten Elektronen abbremst, also ihr Auftreffen auf die Anode gegebenenfalls verhindert. Die Stromstärke der ausgelösten Elektronen wird über einen Messverstärker in Abhängigkeit von der Gegenspannung gemessen.

Den Photoeffekt kann man gut mit sichtbarem Licht demonstrieren, wenn man als Kathode Alkalimetalle benutzt (z. B. Kalium), betrachte die folgende schematische Darstellung:

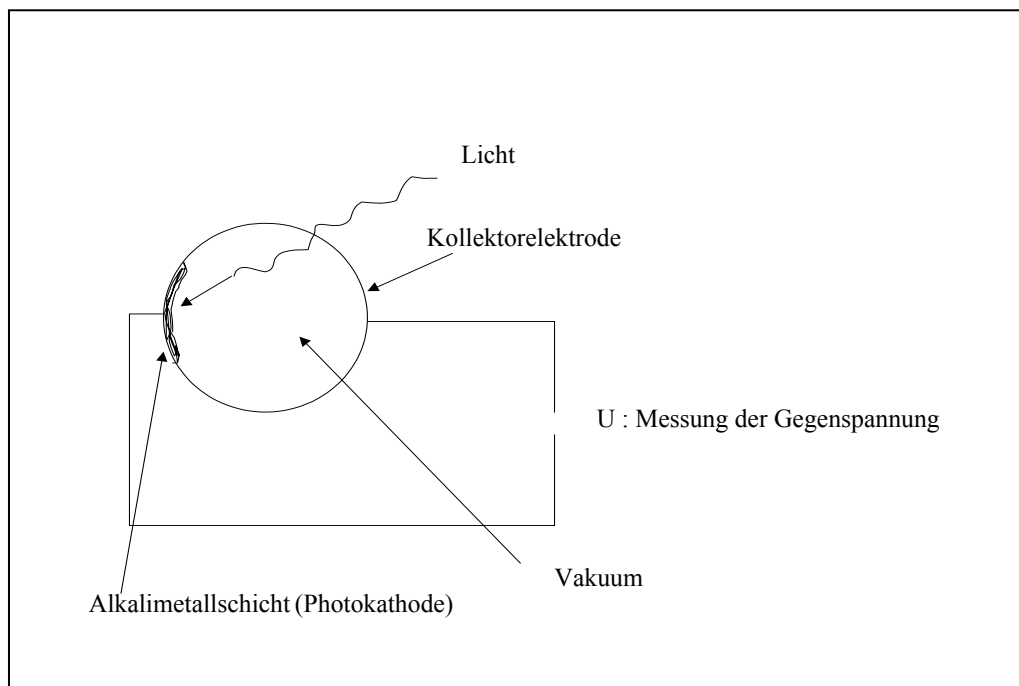


Figure 1: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus zur Untersuchung des lichtelektrischen Effekts.

Man beobachtet, dass der Fotostrom mit wachsender Gegenspannung bis auf Null abnimmt. Bei weiter zunehmender Spannung tritt sogar eine Richtungsumkehr des Fotostromes ein⁶. Man erklärt diese Beobachtung dadurch, dass die ausgelösten Elek-

⁶Diese Richtungsumkehr des elektrischen Stromes entsteht dadurch, dass aus der Anode durch Streulicht ebenfalls Elektronen ausgelöst werden. Dies ist dadurch möglich, da aus dem Material der Fotokathode Atome abgelöst werden und sich auf der Anode niederschlagen. Aus der Anode treten ständig Elektronen aus, fließen unter dem Einfluss der Gegenspannung zur Fotokathode und kompensieren dort einen Teil des Elektronenstroms, der von der Kathode zur Anode fließt. Dieser

tronen im elektrischen Gegenfeld abgebremst werden. Mit zunehmender Spannung erreichen immer weniger Elektronen die Anode, der Strom nimmt ab. Wenn bei der Gegenspannung U_0 die Stromstärke Null ist, werden offenbar auch die schnellsten Elektronen, also die mit der größten kinetischen Energie, so stark gebremst, dass sie nicht mehr die Anode erreichen. Aus der Größe dieser Gegenspannung U_0 kann man die maximale kinetische Energie der Elektronen bestimmen: Bewegen sich die Elektronen der Ladung e in einem elektrischen Feld gegen die Spannung U an, so wird ihre kinetische Energie in potenzielle Energie umgewandelt. Die maximale kinetische Energie und somit die maximale Geschwindigkeit der austretenden Elektronen erhält man dann aus:

$$E_{kin,max} = \frac{1}{2} m_e v_{max}^2 = e \cdot U_0 \Leftrightarrow v_{max} = \sqrt{\frac{2e \cdot U_0}{m_e}} \quad (8)$$

Damit erhält man die folgende Gleichung aus der Hypothese EINSTEINS (7):

$$h\nu = e \cdot U_0 + e\Phi \quad (9)$$

Bestrahlt man nun die Photozelle mit Licht unterschiedlicher Frequenzen und misst man zu jeder Frequenz die Gegenspannung U_0 , so erhält man folgendes Ergebnis: Die graphische Darstellung der Gegenspannung in Abhängigkeit von Frequenz zeigt, dass die zu den verschiedenen Wertepaaren gehörenden Punkte auf einer Geraden liegen. Die Gerade schneidet die Frequenzachse im Wert der Grenzfrequenz ν_{gr} . Versuche mit Licht, dessen Frequenz kleiner ist als diese Grenzfrequenz zeigen, dass von diesem Licht keine Elektronen mehr ausgelöst werden.

Die folgende Abbildung⁷ zeigt einen typischen Verlauf:

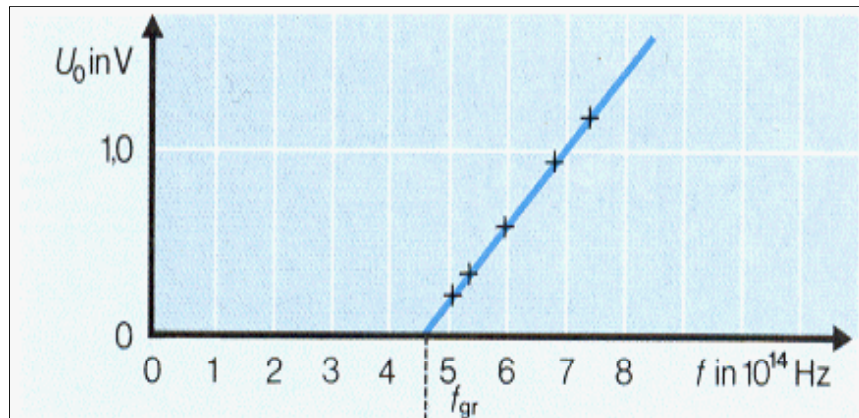


Figure 2: Darstellung der Gegenspannung in Abhängigkeit von der eingestrahnten Lichtfrequenz.

Effekt wird bei geringen Gegenspannungen durch den Strom der viel zahlreicheren Elektronen aus der Fotokathode überdeckt.

⁷Sie wurde entnommen aus Metzler Physik, Schroedel-Verlag 1992, S. 362.

Beispiel :Kalium-Photodiode⁸

Gegenspannung / V	Frequenz / 10^{14}Hz
0.29	5.19
0.37	5.49
0.95	6.88

Eine grafische Darstellung ergibt den folgenden Zusammenhang:

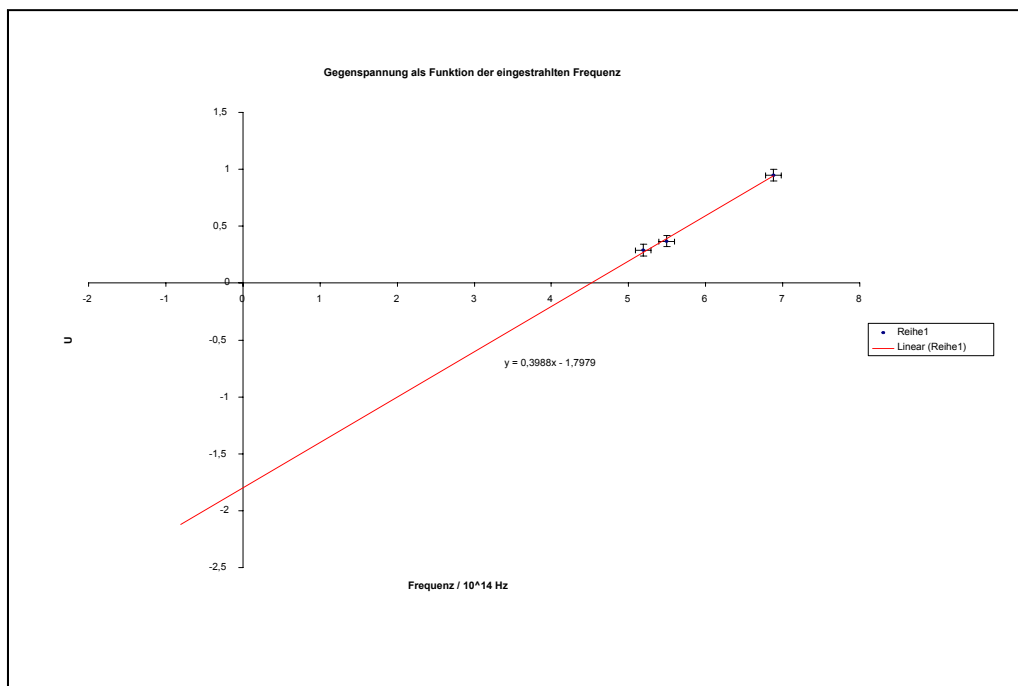


Figure 3: Graphische Darstellung der Gegenspannung in Abhängigkeit von Lichtfrequenz.

Aus:

$$h\nu = eU_0 + e\Phi \quad (10)$$

Aus dieser Gleichung folgt, dass die Gegenspannung U_0 eine lineare Funktion der Frequenz ν des einfallenden Lichts ist:

$$U_0 = \frac{h}{e}\nu - \Phi \quad (11)$$

so erkennt man eine Gerade mit:

$$U_0 = \frac{h}{e}\nu - \Phi, \quad [\nu] = 10^{-14} \text{ Hz}$$

⁸Diese Werte wurden aus Kuhn, W.: Handbuch der experimentellen Schulphysik, Bd.8, Aulis-Verlag 1996 übernommen.

Eine Auswertung mit Excel liefert

$$\begin{aligned}
 0.3988 \cdot 10^{-14} \text{Vs} &= \frac{h}{e} \\
 e &= 1.602 \cdot 10^{-19} \text{C} \\
 &= 1.602 \cdot 10^{-19} \text{As} \\
 1V &= 1 \frac{W}{A} = 1 \frac{J}{As} \\
 \implies h &= 6.39 \cdot 10^{-34} \text{Js}, h_{Lit} = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{Js}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Aus dem Schnittpunkt der Geraden mit der Abszisse ergibt sich aus:

$$h\nu = e \cdot U_m + e\Phi$$

für $U_0 = 0$ die Grenzfrequenz ν_{gr} :

$$\nu_{gr} = \frac{e}{h}\Phi \tag{13}$$

Ersetzt man nun in:

$$h\nu = \frac{1}{2}m_e v_{\max}^2 + A$$

die Austrittsarbeit A durch die Grenzfrequenz ν_{gr} , so ergibt sich für die kinetische Energie der Elektronen:

$$\frac{1}{2}m_e v_{\max}^2 = h(\nu - \nu_{gr}) \tag{14}$$

Das bedeutet, dass für $\nu = \nu_{gr}$ die Austrittsgeschwindigkeit v_{\max} der Elektronen gleichfalls Null wird. ν_0 ist also die Frequenzgrenze, bei der keine lichtelektrische Emission mehr stattfindet. Die zugehörige Wellenlänge $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$ ist die langwellige Grenze des lichtelektrischen Effekts, die man auch direkt beobachten kann. Aus der gemessenen Grenzfrequenz ν_0 kann man mittels:

$$\nu_0 = \frac{e}{h}\Phi$$

direkt das Austrittspotenzial bestimmt werden.

Die Bestimmung von h aus der Neigung der Geraden hat Werte geliefert, die sehr genau mit denen aus anderen Methoden zur Bestimmung von h übereinstimmen. Diese Übereinstimmung ist die stärkste Stütze für die EINSTEIN-Theorie der Lichtquanten.

5. FAZIT

EINSTEIN geht nun einen wesentlichen Schritt weiter als PLANCK, für den $h\nu$ mehr eine Rechenhilfe war. EINSTEIN interpretiert den Term $h\nu$ als Repräsentant real existierender Teilchen, die man später "**Photonen**" genannt hat. Man kann sich also nach dieser Idee elektromagnetische Strahlung der Frequenz ν als eine Art Geschossgarbe vorstellen. Das Ungewöhnliche, ja Widersprüchliche an dieser Vorstellung zeigt schon der Umstand, dass das teilchenhafte Gebilde Photon begrifflich mit dem Charakteristikum einer Welle, nämlich Frequenz ν verbunden wird. Die Multiplikation mit der PLANCK-Konstanten h soll dann jene mysteriöse Manifestation des Teilchenhaften der elektromagnetischen Strahlung hervorbringen. PLANCK hielt diese Spekulation für abwegig⁹.

EINSTEINs Motivation für seine Lichtquantenhypothese ist vor dem Hintergrund seiner Auffassung zu sehen, dass PLANCKs Herleitung des Strahlungsgesetzes keine theoretische Fundierung in dem Sinne zukam, dass sie von der klassischen Elektrodynamik ableitbar wäre, sondern nur in der Weise, dass der klassischen Theorie uneinsichtige Postulate aufgepfropft waren.

In der Physik sind Hypothesen gleichsam ein nicht eingelöster Scheck. Aber die Lichtquantenhypothese EINSTEINs schien ein gedeckter Scheck zu sein, denn mit dieser ungewöhnlichen Vorstellung war es möglich, die Energiebilanz beim Photoeffekt, deren Erklärung im Rahmen der klassischen Wellentheorie des Lichts Schwierigkeiten bereitete, richtig zu beschreiben.

Es handelt sich aber auch nicht etwa um einen Beweis zur Widerlegung der Wellentheorie des Lichts. Denn wenn man den Photoeffekt an freien Atomen (Molekülen) misst, dann ergibt sich, dass die meisten Elektronen gerade nicht in Richtung des einfallenden Photonenstromes emittiert werden. Sie werden dagegen senkrecht dazu emittiert, d.h. in Richtung des Vektors der el. Feldstärke, genauso wie es die Wellentheorie verlangt.

Führt man den Photoeffekt mit LASER-Licht¹⁰ hoher Intensität aus, dann erweist sich die kinetische Energie der Photoelektronen im Einklang mit der Wellentheorie des Lichts als proportional zur Intensität des eingestrahnten Lichts, welche durch die Wellenamplitude bestimmt ist.

In der Quantenelektrodynamik wird dann dieser Dualismus - Welle, Teilchen - des Lichts nicht als Widerspruch klassischer Vorstellungen beschrieben. In ihrer Beschreibung tritt der "teilchenhafte" Aspekt der Mikroprozesse als Quantisierung des elektromagnetischen Feldes unter ausdrücklicher Wahrung des Wellencharakters und keineswegs im Widerspruch dazu in Erscheinung. Photonen werden dann nicht als "Teilchen", sondern als Anregungszustände des elektromagnetischen Feldes angesehen.

⁹Damit war PLANCK nicht allein, auch SOMMERFELD bemerkte in dem von PLANCK formulierten Antrag zur Aufnahme EINSTEINs in die Preußische Akademie einschränkend: „Dass er in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie z.B. in seiner Hypothese über die Lichtquanten, wird man ihm nicht allzu sehr anrechnen dürfen. Denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, lässt sich auch in der exaktesten Wissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.“ Planck, M. Antrag zur Aufnahme Einsteins in die preußische Akademie der Wissenschaften.

¹⁰Also mit Licht einer bestimmten Frequenz, normales Sonnenlicht ist eine Überlagerung verschiedener Frequenzen.

Durch die Feldquantisierung wird also der Wellencharakter nicht zerstört. Der Wellencharakter der Feldstärke und der Quantencharakter der Energie geraten nicht in Konflikt. Als weitere Bestätigung für die Notwendigkeit, im System der Grundannahmen der Elektrodynamik gewisse Veränderungen notwendig werden zu lassen, betrachten wir im Folgenden den COMPTON-Effekt.