

## 6. Licht als Teilchen: Das Photon

Mit dieser Vorlesung öffnen wir ein Kapitel der Physik, das Physiker und Philosophen während des gesamten 20. Jahrhunderts beschäftigt hat und auch heute noch beschäftigt. Durch das Interferenzexperiment von Young am Anfang des 19. Jahrhunderts und durch die Untersuchungen von Maxwell und Hertz zu den elektromagnetischen Wellen war ganz klar bewiesen worden, dass Licht ein Wellenphänomen ist, d.h. eine Art "Erregungsphänomen". Kein Physiker zweifelte daran, auch Max Planck nicht. Dennoch wurde er um 1900 bei seinen Untersuchungen zum Spektrum der sog. Schwarzkörper-Strahlung, das ist Strahlung, die von einem speziellen heißen Körper emittiert wird, zu folgender Annahme gezwungen: Licht wird von einer Lichtquelle in kleinen "Paketen" mit der Energie  $E = h \cdot f$  ausgesandt, ähnlich wie Schrotkugeln aus einem Gewehrlauf. Planck musste diese Hypothese machen, um die gemessene Intensitätsverteilung der Schwarzkörperstrahlung abzuleiten. Aber als ein durch und durch konservativer Mensch konnte er sich nicht damit abfinden und verkündete: Auch wenn er bei der mathematischen Ableitung diese merkwürdige Annahme der Lichtpakete machen müsse, so könne es ja doch sein, dass sich die Intensitätsverteilung auch unter anderen, weniger revolutionären Annahmen ableiten ließe. So blieb die Situation fünf Jahre lang bis zu dem annus mirabilis 1905, in dem Einstein die Bühne der Physik betrat.

### 6.1 Photoeffekt

Wie wir heute wissen, besteht ein Atom aus einem Kern und der Elektronenhülle. Moleküle und auch größere Materiestücke wie z.B. Metalle sind aus Atomen aufgebaut. Alle Materie enthält also auch Elektronen. Das war am Anfang des 20. Jahrhunderts noch nicht so klar. Viele Wissenschaftler arbeiteten daran, Elektronen aus Metallen freizusetzen und damit zu experimentieren. Dies kann z.B. dadurch geschehen, dass man das Metall erhitzt. Ferner lassen sich Elektronen aus gewissen Metallen, z.B. Alkalimetallen, auslösen, wenn man deren Oberfläche mit Licht bestrahlt. Dieses Phänomen, der sog. Photoeffekt (Phos - το φως - gr. Licht), wurde von Hertz und Hallwachs entdeckt. In sehr schwierigen Experimenten untersuchten Lenard, Elster und Geitel den Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Lichtes (seiner Intensität und Farbe) und den Eigenschaften der abgelösten Elektronen (ihrer Zahl und Energie). Ihre Erwartungen für diesen Zusammenhang wurden durch die Wellenvorstellung bestimmt. Danach sollte intensiveres Licht, d.h. eine Lichtwelle mit höherer Amplitude, höherenergetische Elektronen auslösen. Dies entspricht der Erfahrung, dass in einer Meereswelle mit größerer Amplitude auch mehr Zerstörungskraft, d.h. mehr Energie steckt.

## Experimente zum Photoeffekt.

### Qualitative Experimente:

Es werden zwei Elektroskope mit aufgesetzter Metallplatte aufgeladen, eines positiv, das andere negativ.

- Werden sie mit normalem Glühlicht bestrahlt, so findet keine Entladung statt.
- Bestrahlt man sie mit dem Licht einer Höhensonne oder Bogenlampe, so entlädt sich die negativ aufgeladene Platte, die positiv aufgeladene jedoch nicht.
- Hält man zwischen Lampe und negativ aufgeladene Platte eine Glas- oder Plexiglasscheibe, so entlädt sich die negativ geladene Platte auch bei Bestrahlung mit der Bogenlampe nicht.
- Die Intensität des Lichts beeinflusst die Geschwindigkeit der Entladung, aber hat keinen Einfluss darauf, ob sie stattfindet oder nicht. Dies kann durch eine Irisblende oder durch Variation der Entfernung zwischen Lampe und Platte gezeigt werden.

### Quantitatives Experiment:

Es wird eine Fozelle benutzt, die aus einer Metallschicht, der sog. Fotokathode und einem Drahring (siehe Abb. 6.1) besteht. Beide Elektroden sind isoliert gegeneinander im Vakuum untergebracht.

Bestrahlt man nun die Fozelle nacheinander mit Licht verschiedener Wellenlänge, so

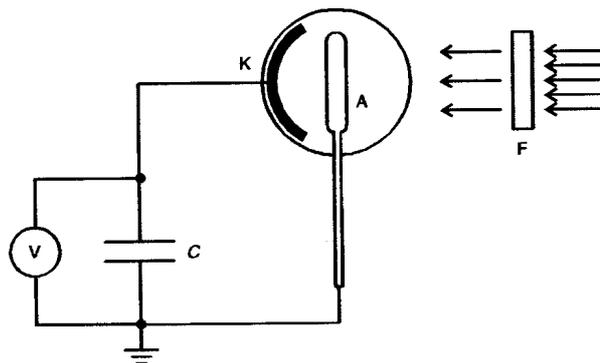


Abb. 6.1: Schematische Anordnung zur Messung der Energien der beim Photoeffekt freigesetzten Elektronen. (Kathode K, Anode A, FarbfILTER F, Kondensator C und Spannungsmessgerät V)

misst man zwischen Kathode und Drahring verschiedene Spannungen. Die verschiedenen Farben des Lichts erhält man durch schmalbandige Filter.

Die angezeigte Spannung ist ein Maß für die maximale Energie der ausgelösten Elektronen, bei 1 V Spannung haben die Elektronen eine kinetische Energie von 1 Elektronvolt (eV).

Es wird zweierlei gezeigt:

1. Die sich einstellende Spannung hängt nicht von der Intensität des einfallenden Lichts ab.
2. Zwischen der Frequenz des einfallenden Lichts und der Energie der ausgelösten Elektronen besteht ein linearer Zusammenhang ( siehe Abb. 6.2).

Das Ergebnis des Experiments widersprach den Erwartung, die sich aus dem Wellenbild ergeben, in jeder Hinsicht:

1. Die **Intensität** des Lichtes beeinflusst nur die **Zahl** der herausgeschlagenen Elektronen, aber nicht ihre Energie.
2. Die **Farbe** des Lichtes, genauer die Wellenlänge  $\lambda$  bzw. die Frequenz  $f$ , bestimmt die **Energie**  $E_{\text{kin}}$  der Elektronen.

Eine Analyse der Experimente durch Einstein brachte folgenden einfachen Zusammenhang zwischen Energie und Frequenz zutage:

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

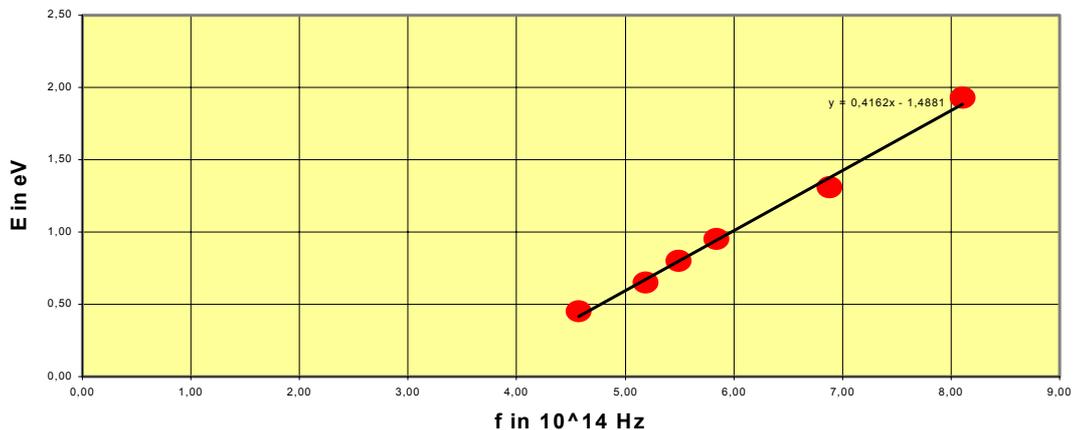


Abb. 6.2: Abhängigkeit der Elektronenenergie von der Frequenz des eingestrahlten Lichts

Die Konstante  $W_A$  ist die sog. Ablösearbeit, die für das Metall, aus dem die Elektronen abgelöst werden, charakteristisch ist. Die kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  der Elektronen hängt linear von der Frequenz  $f$  des Lichtes ab. Der Wert der Konstanten  $h$  ist identisch mit dem Wirkungsquantum, das Planck eingeführt hatte.

Stellt man die obige Gleichung um,  $h \cdot f = E_{\text{kin}} + W_A$ , dann steht auf der linken Seite eine Energie, die von der Lichtfrequenz abhängt und auf der rechten die Summe aus Ablösearbeit und Bewegungsenergie des Elektrons. Einstein, der von Plancks Hypothese wusste, hat diese Gleichung folgendermaßen interpretiert: Licht besteht aus Energiepaketen, wobei jedes Paket die Energie  $h \cdot f$  enthält. Ein Teil  $W_A$  dieser Energie wird benutzt, um das Elektron aus dem Metall herauszulösen, und der Rest wird dem Elektron als kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  mitgegeben. Falls die Energie der Pakete kleiner als die Ablösearbeit ist, können keine Elektronen aus dem Metall ausgelöst werden.

Damit wurde die Plancksche Hypothese experimentell bestätigt. Erst mit dieser Erklärung des Photoeffektes begann der Siegeszug der Quantentheorie. Und deshalb hat wohl mit einem gewissen Recht Einstein für diese Leistung - und nicht für die Relativitätstheorien - den Nobelpreis erhalten.

## 6.2 Das Dilemma: Welle oder Teilchen und das Doppelspalt-Experiment

Die kleinen Energiepakete des Lichts nennt man auch "Lichtquanten" oder "Photonen". Auch wenn mit der Hypothese der Lichtquanten die beiden Experimente, die Schwarzkörperstrahlung (durch Planck) und der Photoeffekt (durch Einstein), erklärt werden konnten, tat sich ein neues Problem auf.

Das Interferenzbild, das Licht beim Durchgang durch einen Doppelspalt erzeugt, war als klares Indiz für den Wellencharakter des Lichtes angesehen worden. Denn wenn man das Doppelspalt-Experiment von Young mit klassischen Teilchen, z.B. Schrotkugeln oder Farbtröpfchen ausführt, erhält man kein Interferenzmuster, sondern einen "Doppelhöcker". Das wurde in einer Simulation mit Schrotkugeln gezeigt, die im Internet unter

<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/doppelspalt.htm> zu finden ist.

Damit ist man an einem klassischen Widerspruch angelangt. Das Licht verhält sich inkonsistent, manche Experimente lassen sich nur verstehen, wenn das Licht durch eine Welle beschrieben wird, andere nur, wenn es aus Teilchen, aus Photonen, besteht.

### Photon, was bist Du nun, Welle oder Teilchen?

Um eine Antwort auf diese Frage zu finden, führten wir in der Simulation das Doppelspaltexperiment nun mit Photonen aus. Hierbei stellten wir für die Wellenlänge, die Spaltbreite und den Spaltabstand die gleichen Werte ein, die wir im Realexperiment benutzt hatten. Der einzige Unterschied zum damaligen Experiment ist die Intensität der Lichtquelle. Hier kann man sie so schwach wählen, dass sich jeweils nur ein Photon in der Apparatur befindet. Beim Auftreffen dieses Photons auf dem Schirm wird jeweils ein Punkt erzeugt, genauso wie bei der Simulation mit den Schrotkugeln. Beim Auftreffen verhalten sich die Photonen also wie Teilchen. Nachdem viele Photonen auf dem Schirm aufgetroffen sind, bildet sich ein Interferenzmuster heraus, das dem im Realexperiment erhaltenen entspricht.



Abb. 6.3: Der nicht-klassische Skiläufer

Das bedeutet, dass jedes Photon sich beim Durchgang durch den Doppelspalt wie eine Welle verhalten hat. Das darf man sich allerdings nicht so vorstellen, dass sich ein Photon in zwei Anteile aufspaltet, die durch die beiden Spalte laufen und dahinter miteinander interferieren. Es ist inzwischen experimentell gezeigt, dass diese Möglichkeit ausgeschlossen ist. Damit müssen wir annehmen, dass das Photon am Doppelspalt mit sich selbst interferiert. Die Abbildung 6.3 zeigt dieses paradoxe Phänomen in einer humoristischen Weise.

Später wurde die Situation noch konfuser, oder vielleicht auch eindeutiger. Wenn man nämlich Objekte nimmt, die ganz eindeutig Teilchen mit Ruhemasse sind, z.B. Elektronen - heute nimmt man sogar große Moleküle wie das Fulleren  $C_{60}$  - und mit ihnen ein Doppelspaltexperiment durchführt, erhält man auch eine Interferenzstruktur. Also auch hier diese Doppelnatur: Welle oder Teilchen?

Damit ergibt sich die Frage, warum der Wellencharakter der Teilchen nicht schon früher entdeckt wurde. Bei unserem Doppelspaltexperiment mit Laserlicht (siehe

Vorlesung 4) war der Abstand der beiden Spalte 0,6 mm und damit ca. 1000 mal größer als die Wellenlänge des Lichts. Wir wissen heute, dass die Wellenlängen von Materieteilchen von ihrer Masse und ihrer Energie abhängen und um mindestens einen Faktor  $10^4$  kleiner sind als die des sichtbaren Lichts. Wenn man z.B. ein entsprechendes Experiment mit Elektronen durchführen möchte, so braucht man einen Doppelspalt, dessen Öffnungen etwa um diesen Faktor näher beieinander sind. Entsprechende Apparaturen sind erst in neuerer Zeit entwickelt worden.

### 6.3 Die philosophische Lösung: Komplementarität und Quantentheorie

Mit dem oben geschilderten konzeptionellen Widerspruch hat sich besonders Niels Bohr beschäftigt. Für ihn können alle Objekte der Mikrowelt, z.B. Elektronen oder Licht, nicht in den Begriffen der Makrowelt, der Welt unseres täglichen Lebens, verstanden werden. Da wir jedoch nur gelernt haben, in diesen zu denken, kommen wir in Schwierigkeiten, wenn wir damit Phänomene der Mikrowelt verstehen wollen. Ein Elektron oder ein Photon **ist** eben weder ein Teilchen noch eine Welle, sondern ist etwas, das wir nicht so einfach begreifen können, weil uns die Bilder fehlen. Wir können nicht sagen, was es **ist**, sondern nur, wie sich ein solches Objekt **verhält**. Licht z.B. verhält sich in manchen Situationen wie ein Teilchen - z.B. beim Photoeffekt - und in anderen wie eine Welle - z.B. beim Doppelspaltexperiment. Bohr schloss daraus, dass wir die uns unbegreifbaren Objekte der Mikrowelt nur in einander ergänzenden (komplementären) Bildern verstehen können. Das ist mit dem Begriff der Komplementarität in der Physik gemeint.

Man könnte einwenden, damit sei ja der Willkür Tür und Tor geöffnet. Denn woher weiß man, in welcher Situation sich der Teilchen- bzw. der Wellencharakter offenbart. Glücklicherweise ist es aber gelungen, das gesamte Verhalten von mikroskopischen Objekten durch einen **einheitlichen** mathematischen Formalismus der sog. Quantentheorie zu beschreiben, in dem nicht mehr auf das Teilchen- oder Wellenbild Bezug genommen wird. Hierin wird das Verhalten der Mikroobjekte durch sog. Wellenfunktionen wiedergegeben. Diese beschreiben nicht mehr die Bewegung von Mikroobjekten im Raum, sondern nur noch die Wahrscheinlichkeiten für das Auftauchen an bestimmten Orten. Der mathematische Formalismus beschreibt die Ergebnisse aller Experimente mit Mikroobjekten quantitativ. Die Deutung der Ergebnisse im Rahmen der Komplementarität ist hilfreich und befriedigend, aber nicht notwendig. Die Wellenfunktionen sind Lösungen gewisser Gleichungen, von denen die bekannteste die Schrödingergleichung ist.

Bohr hat in seinem späteren Leben versucht, das Prinzip der Komplementarität auch auf andere Bereiche des Denkens auszudehnen.

### 6.4 Biographie: Philipp Lenard (1862 –1947)

Lenard wurde als Sohn eines Weingroßhändlers und Sektfabrikanten im damals österreich-ungarischen Pressburg, das ist die heutige Hauptstadt der Slowakei Bratislava, geboren.

Als Schüler entdeckte er in einem Buchladen seiner Heimatstadt in der Auslage eines Buchhändlers eine Schrift von William Crookes "Strahlende Materie oder der vierte Aggregatzustand", die die Phantasie des Achtzehnjährigen beschäftigte. Er kannte die 3 Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig und wollte es auf keinen Fall versäumen,

auch den vierten kennen zu lernen. Also kaufte er die Schrift und verschlang sie. Dabei faszinierten den jungen Lenard besonders die an Hand schöner Abbildungen beschriebenen Gasentladungen. Das Verlangen, solche Entladungen wirklich zu sehen, wurde in ihm immer größer. Doch der Vater erlaubte ihm nach dem Ende der Schulzeit nur das Studium der Technischen Chemie. Er sollte mit den dabei erworbenen Kenntnissen das Unternehmen des Vaters in die Höhe bringen. So studierte er an den technischen Hochschulen in Budapest und Wien und arbeitete im Geschäft des Vaters mit.



Als Lenard jedoch auf einer Reise durch Deutschland in Heidelberg Robert Bunsen persönlich kennen lernte, stand sein Entschluss felsenfest: Er wollte Naturforscher werden. Ab 1883 studierte er in Heidelberg bei Quincke und Bunsen, setzte sein Studium in Berlin bei Hermann von Helmholtz fort und vollendete es mit einer Dissertation "Über die Schwingungen fallender Tropfen".

Nach einer dreijährigen Assistentenzeit (1886-1889) bei Quincke in Heidelberg, einem kurzen Aufenthalt in England und einer Assistentenstelle in Breslau wechselte er 1891 zu Heinrich Hertz nach Bonn. Ein Jahr später habilitierte er sich dort mit einer Arbeit "Über die Elektrizität der Wasserfälle". Bald darauf entwickelte er eine Gasentladungsröhre mit einem Fenster aus einer dünnen Aluminiumfolie, einem sogenannten "Lenard-Fenster". Hierdurch konnten die Kathodenstrahlen austreten und - unabhängig vom Entladungsvorgang im Vakuum – in Luft oder anderen Materialien untersucht werden.

Nach dem Tode von Hertz betreute er die Herausgabe von dessen Gesammelten Werken. Nach einer kurzen Zeit als außerordentlicher Professor in Breslau wechselte er 1895 an die Technische Hochschule in Aachen, wo er seine Kathodenstrahlexperimente fortführte. Die Entdeckung der Röntgenstrahlen wurde von Lenard mit Überraschung und Ärger aufgenommen. Schließlich hatte doch Röntgen von ihm Rat erhalten und seine Experimente nur nachvollziehen wollen.

Nach einem Aufenthalt als außerordentlicher Professor für theoretische Physik in Heidelberg wurde Lenard 1898 Professor und Leiter des Physikalischen Instituts in Kiel, wo er ein neues Institut und somit optimale Forschungsbedingungen erhielt. Im gleichen Jahr kam es zu einer Auseinandersetzung mit dem englischen Physiker J.J. Thomson, dem Entdecker des Elektrons. Thomson hatte sich mit Lenards Methoden beschäftigt und so seine eigenen Untersuchungen vorangetrieben. Lenard fühlte sich nicht genügend erwähnt und hielt Thomsons Vorgehensweise für unzulässig. Dies war wohl die Keimzelle für Lenards sich stetig vergrößernden Englandhass. Seine Reaktionen auf Röntgens und Thomsons Entdeckungen entsprachen nicht den Regeln der wissenschaftlichen Fairness, sondern offenbarten seinen überehrgeizigen und schwierigen Charakter.

Im Jahre 1900 entdeckte Lenard die wichtigsten Gesetzmäßigkeiten des Photoeffekts. Die Erklärung seiner Ergebnisse durch Einsteins Lichtquantenhypothese im Jahre 1905 war für ihn ebenfalls nicht leicht zu ertragen, wurde aber abgemildert durch die Verleihung des Nobelpreises für Physik für seine Arbeiten über die Kathodenstrahlen.

Zwei Jahre später wurde er Direktor des Instituts für Physik und Radiologie in Heidelberg, wo unter seiner Leitung im Jahre 1913 das heutige Physikalische Institut fertiggestellt wurde, das zwischen 1935 und 1945 seinen Namen trug.

Den ersten Weltkrieg sah er als einen Kampf zwischen "deutscher Kultur" und "westlicher Zivilisation", die Niederlage und die weitere politische Entwicklung nach 1918 verschärften Lenards mit Antisemitismus gepaarte nationalistische Ansichten.

In diesen Jahren kam es auch zu einer Eskalation in der Auseinandersetzung zwischen Lenard und Einstein. Während beide vor dem ersten Weltkrieg von gegenseitiger Anerkennung und z.T. sogar von Bewunderung geprägt waren (1910 nennt Einstein Lenard in einem Brief "einen großen Meister, ein wirkliches Genie". 1913 würde Lenard gern eine Persönlichkeit wie Einstein als Nachfolger von Pockels haben), änderte sich das Verhältnis, nachdem Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie veröffentlicht hatte. Einen Höhepunkt erlebte diese Auseinandersetzung 1920 auf der Tagung der Naturforscher und Ärzte in Bad Nauheim, auf der die beiden das einzige Mal zusammenkamen. Lenard lehnte Einsteins Theorie zunächst aus physiktheoretischen Überlegungen, dann aber auch aufgrund antisemitischer Vorurteile ab. Er fand als Experimentalphysiker immer schwerer Zugang zu den neuen Ansätzen. So versuchte er die experimentelle Physik zu einer "nordischen Wissenschaft" zu stilisieren, die sich von der theoretischen Physik - in seinen Augen "jüdischer Weltbluff" - abhob.

Zusammen mit dem Nobelpreisträger Johannes Stark verfasste Lenard 1924 den Aufruf "Hitlergeist und Wissenschaft". Nach diesem öffentlichen Bekenntnis zu Adolf Hitler wurde Lenards Institut zum Zentrum rechtsgerichteter Kreise. Das historische Werk "Große Naturforscher", das er 5 Jahre später herausgab, enthält ausschließlich Wissenschaftler "arisch-germanischen" Ursprungs. Nachdem er 1931 in den Ruhestand getreten war, schrieb er ein vierbändiges Lehrbuch für Experimentalphysik, das den Titel "Deutsche Physik" erhielt. Darin vertritt er u.a. die Meinung, dass die wahre Naturkenntnis nur von der "arischen Rasse" gewonnen werden kann, Einsteins Arbeiten hingegen werden als "Jahrmarktslärm" und "Judenbetrug" bezeichnet.

Ab 1937 zog sich Lenard mehr und mehr aus dem öffentlichen Leben zurück. Nach dem Zweiten Weltkrieg schützte ihn sein hohes Alter vor einer Internierung durch die Alliierten. Er verließ jedoch Heidelberg und zog nach Messelhausen bei Tauberbischofsheim in Baden, wo er 1947 starb.