

Der Fotoeffekt

EXPERIMENT · ABITURTHEMA

In den Jahren 1886 und 1887 saß Heinrich Hertz oft in einem abgedunkelten Raum der Technischen Hochschule Karlsruhe und starrte auf Funken. Er wollte zeigen, dass sich elektrische Wellen durch den Raum ausbreiten, so wie James Clerk Maxwell es vorhergesagt hatte. Dazu ließ er an einem Sender einen Funken überspringen und beobachtete, ob an einem zweiten, kleineren Funkenstrecke ein Stück entfernt ebenfalls ein Funke erschien. Der zweite Funke war winzig, und um ihn besser zu sehen, setzte Hertz ihn in ein dunkles Gehäuse. Da wurde er noch kürzer.

Ein gründlicher Experimentator lässt so etwas nicht auf sich beruhen. Hertz stellte Glasplatten, Quarzplatten und Metallschirme zwischen die beiden Funkenstrecken und fand heraus, dass es am ultravioletten Licht des ersten Funkens lag. Wenn es auf die Elektroden des zweiten fiel, sprang der Funke leichter über^[1]. Er veröffentlichte das 1887 sorgfältig und ohne Erklärung. Die hatte er nicht, und er hatte auch Wichtigeres vor: Die elektromagnetischen Wellen, die er eigentlich suchte, fand er im Jahr darauf.

Was Hertz da nebenbei entdeckt hatte, heißt heute Fotoeffekt, auch Photoeffekt oder lichtelektrischer Effekt: Licht löst Elektronen aus einer Metalloberfläche. Es dauerte achtzehn Jahre, bis jemand verstand, warum das so seltsam abläuft, wie es abläuft, und dieser jemand bekam dafür den Nobelpreis.

Eine Zinkplatte verliert ihre Ladung

Wilhelm Hallwachs machte 1888 aus der Beobachtung ein sauberes Experiment, das bis heute in vielen Schulen vorgeführt wird^[2]. Eine blank geschmirgelte Zinkplatte wird auf ein Elektroskop gesetzt und negativ aufgeladen, der Zeiger schlägt aus. Beleuchtet man die Platte mit dem Licht einer Quecksilberdampflampe, fällt der Zeiger innerhalb von Sekunden zurück. Die Platte entlädt sich.

Drei Details machen den Versuch aufschlussreich. Ist die Platte positiv geladen, passiert nichts. Hält man eine Glasscheibe in den Lichtweg, passiert ebenfalls nichts, weil Glas das Ultraviolett schluckt. Und eine noch so helle gewöhnliche Lampe ohne UV-Anteil bewirkt auch nach Minuten nichts, während das schwache UV-Licht sofort wirkt. Offenbar verlassen negative Ladungen die Platte, und offenbar kommt es nicht darauf an, wie viel Licht man einstrahlt, sondern welches.

Dass es Elektronen sind, die da herausfliegen, wusste Hallwachs 1888 noch nicht. Das Elektron wurde erst 1897 von Joseph John Thomson als Teilchen nachgewiesen.

Lenards Messungen passen nicht ins Bild

Philipp Lenard, der 1905 für seine Arbeiten über Kathodenstrahlen den Nobelpreis bekam ^[3], untersuchte den Effekt um 1900 mit Vakuumröhren und konnte nun messen, wie schnell die ausgelösten Elektronen sind. Dazu legte er eine Gegenspannung an, die die Elektronen abbremst, und erhöhte sie so lange, bis kein Strom mehr floss. Aus dieser Spannung folgt die größte Bewegungsenergie der Elektronen. Seine Ergebnisse von 1902 waren eindeutig und für die damalige Physik ein Rätsel ^[4].

Machte er das Licht heller, kamen mehr Elektronen heraus, aber keines davon schneller. Die Höchstenergie hing allein von der Art des Lichts ab, also von seiner Farbe. Nach der Wellentheorie des Lichts, die seit Thomas Young und Augustin Fresnel als gesichert galt, hätte es umgekehrt sein müssen. Eine stärkere Welle schüttelt die Elektronen heftiger durch und sollte sie auch schneller herauswerfen. Außerdem hätte es bei sehr schwachem Licht eine Weile dauern müssen, bis sich in einem Elektron genug Energie angesammelt hat. Auch davon war nichts zu sehen, der Strom setzte praktisch sofort ein.

Einsteins Lichtquanten

Im März 1905 reichte ein 26-jähriger technischer Experte dritter Klasse am Berner Patentamt bei den Annalen der Physik einen Aufsatz ein, dessen Titel vorsichtig klingt: „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ ^[5]. Der Inhalt war es nicht. Albert Einstein schlug vor, dass Licht nicht nur in Portionen ausgesandt und aufgenommen wird, wie Max Planck es 1900 für die Wärmestrahlung angenommen hatte, sondern dass es tatsächlich aus Portionen besteht. Jedes dieser Lichtquanten, heute Photonen genannt, trägt die Energie hf , wobei f die Frequenz des Lichts ist und h das Plancksche Wirkungsquantum.

Mit dieser Annahme löst sich Lenards Rätsel auf. Ein Photon gibt seine ganze Energie an ein einziges Elektron ab. Einen Teil davon braucht das Elektron, um sich aus dem Metall zu befreien, das ist die Austrittsarbeit W_A , eine Eigenschaft des Metalls. Der Rest bleibt als Bewegungsenergie übrig:

$$E_{\text{kin,max}} = hf - W_A \quad (1)$$

Helleres Licht bedeutet mehr Photonen, also mehr Elektronen, aber jedes einzelne Photon hat dieselbe Energie wie vorher. Und wenn hf kleiner ist als W_A , kann kein einziges Elektron entkommen, egal wie viele Photonen ankommen. Rotes Licht kann das Zinkblech von Hallwachs bestrahlen, solange es will.

Misst man wie Lenard mit einer Gegenspannung U_0 , bei der der Strom gerade verschwindet, wird daraus mit der Elementarladung e

$$eU_0 = hf - W_A \quad (2)$$

Das ist eine Geradengleichung. Trägt man U_0 über der Frequenz auf, muss für jedes Metall eine Gerade herauskommen, und alle diese Geraden müssen dieselbe Steigung haben, nämlich h/e . Nur der Schnittpunkt mit der Frequenzachse, die Grenzfrequenz, verschiebt sich je nach Austrittsarbeit (Abb. 1). Eine so scharfe, nachprüfbare Vorhersage hatte damals niemand gemessen, auch Lenard nicht.

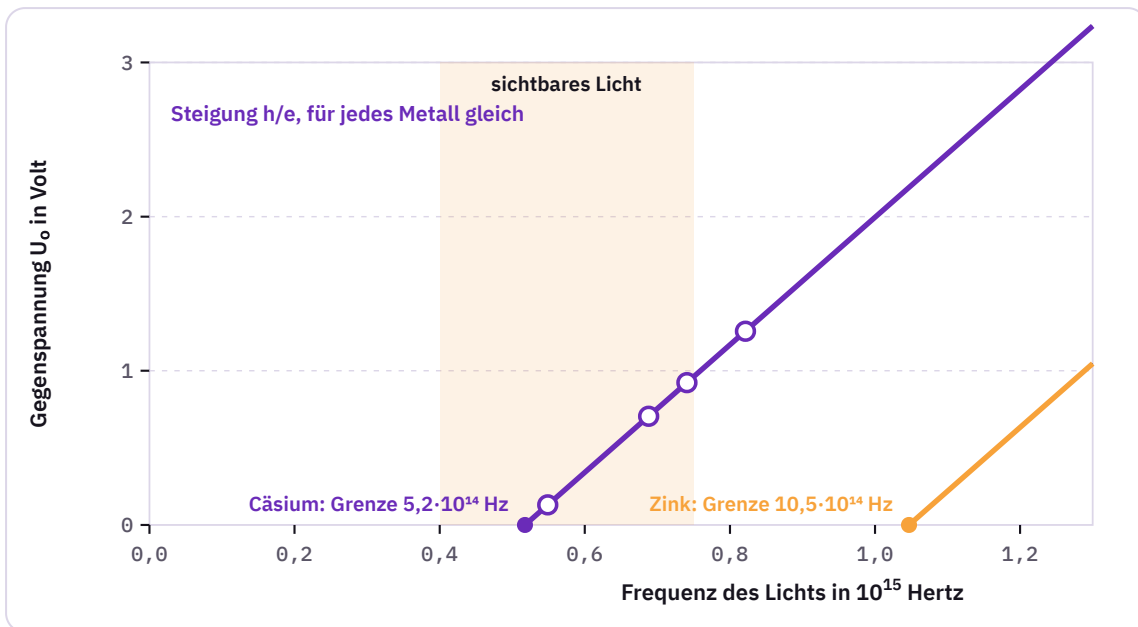


Abb. 1: Gegenspannung über der Frequenz für Cäsium ($W_A = 2,14$ eV) und Zink ($4,33$ eV) [6]. Die Kreise markieren die Quecksilberlinien aus der Tabelle unten. Eigene Berechnung nach Gleichung (2).

Ein Skeptiker liefert den Beweis

Der Amerikaner Robert Millikan glaubte kein Wort davon. Licht war eine Welle, das zeigten Interferenz und Beugung, und daran wollte er nicht rütteln. Zehn Jahre lang verbesserte er in Chicago die Messung, schnitt die Metalloberflächen im Vakuum frisch an, damit keine Oxidschicht das Ergebnis verfälschte, und bestimmte die Gegenspannung für verschiedene Quecksilberlinien an Natrium und Lithium. 1916 veröffentlichte er das Ergebnis [7]. Die Messpunkte lagen auf einer Geraden, die Steigung ergab einen Wert für h , der innerhalb von etwa einem halben Prozent mit dem aus Plancks Strahlungsformel übereinstimmte.

Einsteins Gleichung war damit bestätigt. Seine Deutung nannte Millikan in derselben Arbeit allerdings eine „kühne, um nicht zu sagen leichtsinnige Hypothese“, und er hielt sie noch eine Weile für unhaltbar [7]. Das ist keine Schwäche, sondern gute Wissenschaft: Er hat gemessen, was die Natur sagt, auch als es ihm nicht gefiel. 1923 bekam er selbst den Nobelpreis, unter anderem für genau diese Messung.

Einstein erhielt den Physik-Nobelpreis für das Jahr 1921 „für seine Verdienste um die theoretische Physik und besonders für seine Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effekts“ [8]. Die Relativitätstheorie kommt in der Begründung nicht vor.

Was man mit einer Quecksilberlampe messen würde

Wer den Versuch im Praktikum macht, hat meist eine Quecksilberdampf Lampe, weil sie Licht bei wenigen scharfen Wellenlängen aussendet. Die Energie eines Photons bekommt man aus der Wellenlänge λ mit $E = hc/\lambda$. Mit den exakten Werten von h und c [9] ergibt das eine handliche Faustregel: Energie in Elektronenvolt gleich 1240 geteilt durch die Wellenlänge in Nanometern. Für die grüne Quecksilberlinie bei 546,1 nm sind das 2,27 eV. Davon zieht man die Austrittsarbeit ab, für Cäsium 2,14 eV, und erhält eine Gegenspannung von nur 0,13 Volt.

Hg-Linie	Farbe	Photonenenergie	U ₀ bei Cäsium	U ₀ bei Zink
577,0 nm	gelb	2,15 eV	0,01 V	keine
546,1 nm	grün	2,27 eV	0,13 V	keine
435,8 nm	blau	2,84 eV	0,70 V	keine
404,7 nm	violett	3,06 eV	0,92 V	keine
365,0 nm	ultraviolett	3,40 eV	1,26 V	keine
253,7 nm	ultraviolett	4,89 eV	2,75 V	0,56 V

Die Tabelle zeigt, warum Hallwachs ultraviolettes Licht brauchte. Zink hat eine hohe Austrittsarbeit, erst unterhalb der Grenzwellenlänge

$$\lambda_G = \frac{hc}{W_A} \quad (3)$$

von rund 286 nm kommen Elektronen heraus, und die starke Quecksilberlinie bei 253,7 nm liegt gerade darunter. Cäsium dagegen reagiert schon auf gelbgrünes Licht, seine Grenzwellenlänge liegt bei etwa 580 nm. Deshalb verwendete man Cäsium und seine Verbindungen jahrzehntelang für Fotozellen, die auf sichtbares Licht ansprechen sollen. Ein Hinweis aus der Praxis: Die Austrittsarbeit hängt stark vom Zustand der Oberfläche ab, schon eine dünne Oxidschicht verschiebt sie. Tabellenwerte sind deshalb Richtwerte, und eigene Messungen weichen fast immer etwas ab [6].

Wo der Fotoeffekt heute arbeitet

In Fotozellen und Lichtschranken ist der äußere Fotoeffekt, bei dem Elektronen das Material verlassen, inzwischen weitgehend von Halbleitern abgelöst. Dort bleibt das Elektron im Material und wird nur aus seiner Bindung gelöst, man spricht vom inneren Fotoeffekt. So funktionieren die Sensoren in jeder Handykamera und die [Solarzellen](#) auf dem Dach. Das Prinzip ist dasselbe: Ein Photon muss genug Energie mitbringen, sonst passiert nichts.

Der äußere Fotoeffekt hat seine Nischen behalten. Fotomultiplier, die einzelne Photonen nachweisen können, beginnen mit einer Fotokathode, aus der ein Photon ein Elektron schlägt, das dann lawinenartig vervielfacht wird. Solche Detektoren hängen zu Tausenden in Neutrino-Observatorien und in medizinischen Geräten wie dem PET-Scanner. Und in der Materialforschung nutzt man den Fotoeffekt umgekehrt: Man bestrahlt eine Probe mit Röntgen- oder UV-Licht bekannter Energie, misst die Energie der herausfliegenden Elektronen und rechnet mit Gleichung (1) zurück, wie stark sie gebunden waren. Daraus lässt sich ablesen, welche Elemente in der Oberfläche stecken und in welchem chemischen Zustand. Kai Siegbahn bekam für die Entwicklung dieser Elektronenspektroskopie 1981 den Nobelpreis ^[10].

Ganz am Rande: Einstein und Lenard, deren Namen an diesem Effekt hängen, wurden später erbitterte Gegner. Lenard wurde einer der Wortführer der sogenannten „Deutschen Physik“, die die Relativitätstheorie als „jüdisch“ bekämpfte. Wie sich das auf die Physik in Deutschland auswirkte, beschreibt unser Porträt von [Werner Heisenberg](#).

Zum Weiterlesen

QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie

Richard P. Feynman · Piper, 2018 · ISBN 978-3-492-31316-2

Feynman erklärt ohne Formeln, wie Photonen und Elektronen miteinander umgehen. Wer nach dem Fotoeffekt wissen will, wie es weitergeht, ist hier richtig.

Bei Amazon ansehen*

Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper

Wolfgang Demtröder · Springer, 2016 · ISBN 978-3-662-49093-8

Das Lehrbuch für alle, die die Versuche im Studium nachrechnen müssen, mit Fotoeffekt, Compton-Effekt und Atomspektren.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite [Bücher zur Quantenphysik](#).

Quellen

1. H. Hertz: *Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electrische Entladung*. In: Annalen der Physik 267 (1887), S. 983–1000, [doi:10.1002/andp.18872670827](https://doi.org/10.1002/andp.18872670827).
2. W. Hallwachs: *Ueber den Einfluss des Lichtes auf electrostatisch geladene Körper*. In: Annalen der Physik 269 (1888), S. 301–312, [doi:10.1002/andp.18882690206](https://doi.org/10.1002/andp.18882690206).
3. Nobel Prize Outreach: *Philipp Lenard – Facts*. nobelprize.org/prizes/physics/1905/lenard.
4. P. Lenard: *Ueber die lichtelektrische Wirkung*. In: Annalen der Physik 313 (1902), S. 149–198, [doi:10.1002/andp.19023130510](https://doi.org/10.1002/andp.19023130510).
5. A. Einstein: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. In: Annalen der Physik 17 (1905), S. 132–148, [doi:10.1002/andp.19053220607](https://doi.org/10.1002/andp.19053220607).
6. H. B. Michaelson: *The work function of the elements and its periodicity*. In: Journal of Applied Physics 48 (1977), S. 4729–4733, [doi:10.1063/1.323539](https://doi.org/10.1063/1.323539).
7. R. A. Millikan: *A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h"*. In: Physical Review 7 (1916), S. 355–388, [doi:10.1103/PhysRev.7.355](https://doi.org/10.1103/PhysRev.7.355).
8. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1921*. nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary.
9. Bureau International des Poids et Mesures: *The International System of Units (SI)*. 9. Auflage, 2019. bipm.org/en/publications/si-brochure.
10. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1981*. nobelprize.org/prizes/physics/1981/summary.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Der Fotoeffekt*. Stand: Oktober 2026. URL:
<https://quanten.de/fotoeffekt.html> (PDF:
<https://quanten.de/pdf/fotoeffekt.pdf>)

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: [Welle-Teilchen-Dualismus](#) · [Was sind Quanten?](#) · [Fotovoltaik](#) · [100 Jahre Quantenmechanik](#)

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: <https://quanten.de/fotoeffekt.html>