

Altlasten der Physik (115): Der photoelektrische Effekt

R. von Baltz, F. Herrmann u. M. Pohlig

Gegenstand

Der photoelektrische Effekt wird in Vorlesung und Schulunterricht vorgeführt, um die Quantennatur des Lichts nachzuweisen. Er gestattet, auf einfache Art die Planck-Konstante mit recht guter Genauigkeit zu bestimmen.

Abb. 1 zeigt das Experiment schematisch. Man beleuchtet die Kathode, die aus einem Material mit geringer Elektronenaustrittsenergie besteht, typischerweise einem Alkalimetall. Die Spannung wird dann so eingestellt, dass der Photostrom gerade null wird.

Zur Interpretation benutzt man die Einstein-Gleichung, die in moderner Form geschrieben lautet:

$$E_{\text{kin}} = h f - E_{\text{A-Kat}} \quad (1)$$

Hier ist h die Planck-Konstante, f die Frequenz des eingestrahlt Lichts und $E_{\text{A-Kat}}$ die Elektronenaustrittsenergie der Kathode. Die ausgelösten Photoelektronen verlieren einen Teil ihrer Energie noch im Inneren der Photokathode. Die Gleichung bezieht sich auf diejenigen Elektronen, die keinen Energieverlust erfahren, bevor sie zur Oberfläche gelangen und aus der Kathode austreten. E_{kin} stellt diese maximale kinetische Energie dar.

Es wird nun behauptet, dass

$$E_{\text{kin}} = e U_{\text{max}} \quad (2)$$

ist, wo U_{max} diejenige Spannung ist, die man anlegen muss, damit der elektrische Strom gerade null wird, siehe z. B. [1, 2, 3, 4].

Man macht das Experiment mit Licht verschiedener Wellenlängen, trägt $e U_{\text{max}}$ über der Frequenz des verwendeten Lichts auf und erhält eine Gerade, deren Steigung gleich h ist:

$$e U_{\text{max}} = h f - E_{\text{A-Kat}} \quad (3)$$

Der Punkt, in dem die Gerade die Hochachse schneidet, entspräche dann der Austrittsenergie der Elektronen aus dem Kathodenmaterial.

Mängel

1. Gleichung (2) ist nicht richtig. Die Spannung U_{max} , die man im Experiment misst, entspricht nicht der kinetischen Energie von Gleichung (1). Folglich ist auch Gleichung (3) nicht korrekt.

Man macht sich das am besten an einem Modell klar, Abb. 2a. Wir betrachten zwei Wasserbehälter L und R (links und rechts). Die Höhe h_L des Randes von L über dem Wasserspiegel von L ist kleiner als h_R , die Höhe des rechten Randes von R über dem Wasserspiegel von R. Wir nennen den Höhenunterschied der Wasserspiegel Δh . Es soll nun eine Wasserportion der Masse m aus L in R geschöpft werden. Die Energie, die dazu gebraucht wird, ist durch den Höhenunterschied zwischen dem Wasserspiegel von L und der Randhöhe von R gegeben:

$$\text{Minimale Schöpfenergie} = m g (\Delta h + h_R) \quad (4)$$

Die Höhe h_L spielt für diese Energie keine Rolle. Die Übertragung auf den photoelektrischen Effekt ist einfach. In Abb. 2b befindet sich links die Kathode (K) und rechts die Anode (A). Nach oben ist die Energie eines betrachteten Elektrons aufgetragen.

Den Wasserniveaus in Abb. 2a entsprechen in Abb. 2b die Fermienergien (oder elektrochemischen Potentiale) der Elektronen in der Kathode bzw. in der Anode. Dem Abstand vom jeweiligen Wasserspiegel zum oberen Rand entspricht die Austrittsenergie $E_{\text{A-Kat}}$ bzw. $E_{\text{A-An}}$. Der zum Schöpfen mindestens nötigen Energie entspricht die Energie $h f$, die ein Photon mindestens haben muss, damit ein Elektron von der Kathode zur Anode gelangen kann. Man sieht, dass man diese Energie auf zwei Arten ausdrücken kann: Entweder

$$h f = e U_{\text{max}} + E_{\text{A-An}} \quad (5)$$

oder

$$h f = E_{\text{kin}} + E_{\text{A-Kat}} \quad (6)$$

Aus Gleichung (5) folgt

$$e U_{\text{max}} = h f - E_{\text{A-An}}.$$

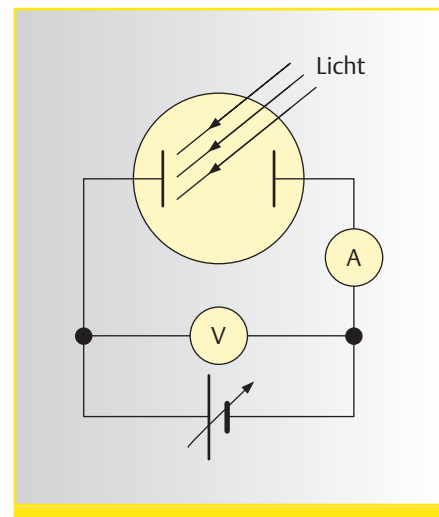


Abb. 1: Die Spannung wird so eingestellt, dass der Photostrom gleich null ist.

Sie ist das Analogon von Gleichung (4). Aus Gleichung (6) folgt

$$E_{\text{kin}} = h f - E_{\text{A-Kat}}$$

Die den beiden letzten Gleichungen entsprechenden Geraden sind in Abb. 3 dargestellt. Damit man überhaupt Elektronen aus dem Kathodenmaterial herausbekommt (damit $E_{\text{kin}} > 0$ ist), muss $h f$ größer als die Austrittsenergie der Kathode sein, oder $f > E_{\text{A-Kat}}/h$.

Die Gerade von Abb. 2a geht aus der von Abb. 2b durch eine Verschiebung in Richtung der Hochachse um $E_{\text{A-An}} - E_{\text{A-Kat}}$ hervor. Diese Differenz der Austrittsenergien von Anode und Kathode entspricht gerade die Kontaktspannung U_K zwischen den beiden Materialien, denn es ist:

$$e U_K = E_{\text{A-An}} - E_{\text{A-Kat}} \quad (7)$$

In den meisten der von uns konsultierten Büchern ist zwar, wie in Abb. 2b, $e U_{\text{max}}$ als Funktion der Frequenz dargestellt, die Achsenbeschriftungen sind aber wie in Abb. 2a. Eine korrekte Darstellung haben wir gefunden im *Schpolski* [5].

Auch wenn man diesen Argumenten folgt, mag man aus dem folgenden Grund noch Bedenken haben: Der Versuch, so wie man

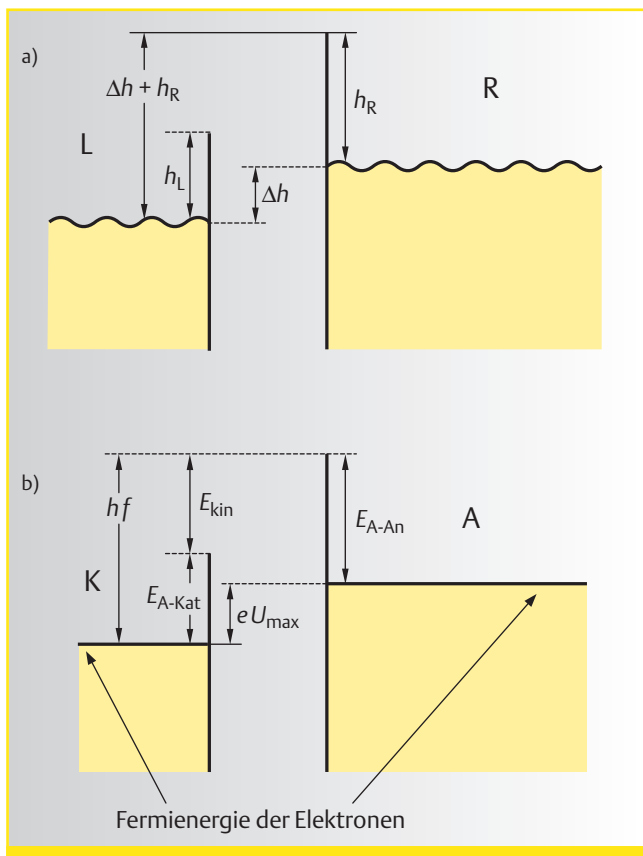


Abb. 2: Es soll eine Wasserportion der Masse m aus dem linken in den rechten Behälter geschöpft werden (a). Dazu wird die Energie $m g (\Delta h + h_R)$ gebraucht. Es soll ein Elektron aus der Kathode (K) in die Anode (A) gebracht werden (b). Dazu wird die Energie $e U_{\max} + E_{A-An}$ gebraucht.

in Durchlassrichtung. Dabei ist eine niedrige Austrittsenergie der Kathode gut, wenn man Licht mit langen Wellenlängen nachweisen will.

Herkunft

Einsteins Arbeit aus dem Jahr 1905 zum photoelektrischen Effekt ist keine experimentelle Arbeit. Genaue Messungen lagen zu dieser Zeit nicht vor. Worauf es Einstein ankam, war auch nur die Deutung der Tatsache, dass die kinetische Energie der einzelnen Elektronen von der Intensität des Lichts unabhängig, und dass die Zahl der emittierten Elektronen proportional zur Lichtintensität ist [6].

Mit großer Sorgfalt und Genauigkeit wurde der Effekt in den folgenden Jahrzehnten durch verschiedene Forscher vermessen. Die wichtigsten Arbeiten stammen von Millikan [7,8] und von Lukirsky und Priležev [9]. Abb. 4 ist der Arbeit von Lukirsky et al. entnommen. Sie zeigt die kinetische Energie E_{kin} der ausgelösten Elektronen als Funktion der Frequenz des einfallenden Lichts. Nach Gleichung (1) ist der Ordinatenachsenabschnitt, bis auf einen Faktor e , gleich der Austrittsenergie der Kathode.

Die kinetische Energie haben die Autoren bekommen, indem sie zur gemessenen Spannung U_{\max} die Kontaktspannung zwischen Anode und Kathode addiert haben. Die Kontaktspannung haben sie (wie vorher auch schon Millikan) unabhängig von U_{\max} gemessen.

Wie schon gesagt wurde, findet man in vielen Büchern eine ähnliche Abbildung, wobei man aber nach oben $e U_{\max}$ (oder U_{\max}) aufträgt und behauptet, dies sei (evtl. bis auf einen Faktor e) die kinetische Energie. In [2] etwa wird sogar der Originalgraph von Lukirsky et al. als Faksimile wiedergegeben, und die Ordinate kurzerhand mit U_{\max} identifiziert.

Wie konnte ein solcher Übertragungsfehler zustande kommen? Die Bremsspannung mit der maximalen kinetischen Energie zu identifizieren ist plausibel. Wenn man sich mit Kontaktspannungen nicht auskennt, mögen sie einem einfach als eine Art Störeffekt erscheinen, den man zunächst vernachlässigen kann. Selbst im Schpol'ski, der den Effekt sehr sorgfältig behandelt, wird der Eindruck erweckt, die Kontaktspannung sei eigentlich nur ein Spielverderber. Selbstverständlich kann man sich auf diesen Standpunkt stellen. Dann muss man aber ganz und gar davon absehen, den Achsenabschnitt zu interpretieren, denn das,

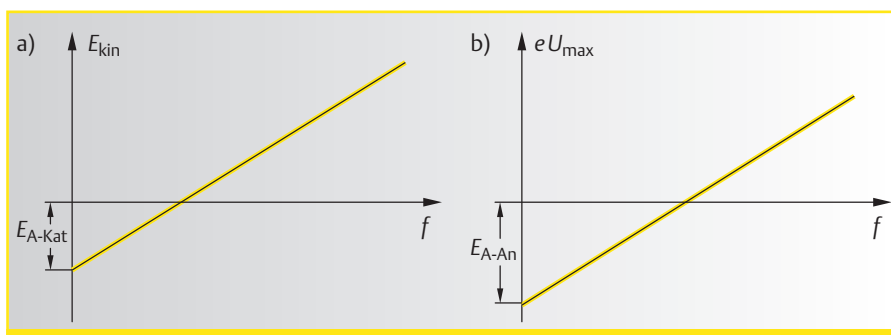


Abb. 3: Kinetische Energie über der Frequenz (a). Der Abschnitt auf der Hochachse ist die Austrittsenergie der Kathode. Maximalspannung mal Elementarladung über der Frequenz (b). Der Achsenabschnitt ist die Austrittsenergie der Anode.

ihn in der Schule vorführt, funktioniert doch schließlich, und er liefert auch in guter Näherung die Austrittsenergie des Kathoden- und nicht des Anodenmaterials, die gewiss viel größer ist als die etwa 2 eV, die man tatsächlich misst. Die Erklärung hierfür kann nur sein, dass von der Kathode geringe Mengen von Caesium – wir nehmen eine Caesiumkathode an – auf die Anode gelangt ist. Darauf wird von den Herstellern auch hingewiesen. Nun genügt schon eine sehr sporadische Oberflächenbelegung der Anode mit Caesium, damit alle Photoelektronen über diese Stellen in das Anodenmaterial hineingelangen, denn jeder kleine Fleck mit einer geringeren Austrittsenergie ist für ein Elektron ein Potenzialminimum, das es bereitwillig aufsucht.

Bei manchen Photozellen muss man auch von Zeit zu Zeit die Ringanode ausheizen, damit das Caesium wieder von der Anodenoberfläche verschwindet. Auch das ist verständlich: Wenn zu viel Caesium die Anodenoberfläche bedeckt, wirkt die Anode schließlich selbst als Quelle von Photoelektronen, die durch das Streulicht aus der Anode herausgelöst werden.

Schließlich könnte man sich noch die Frage stellen, warum die Hersteller technischer Photozellen überhaupt die Kathode aus einem Material mit geringer Austrittsenergie machen. Dazu muss man sich nur daran erinnern, wozu Photozellen normalerweise verwendet werden: Nicht um die Planck-Konstante zu messen, sondern um Licht nachzuweisen – und dazu betreibt man sie

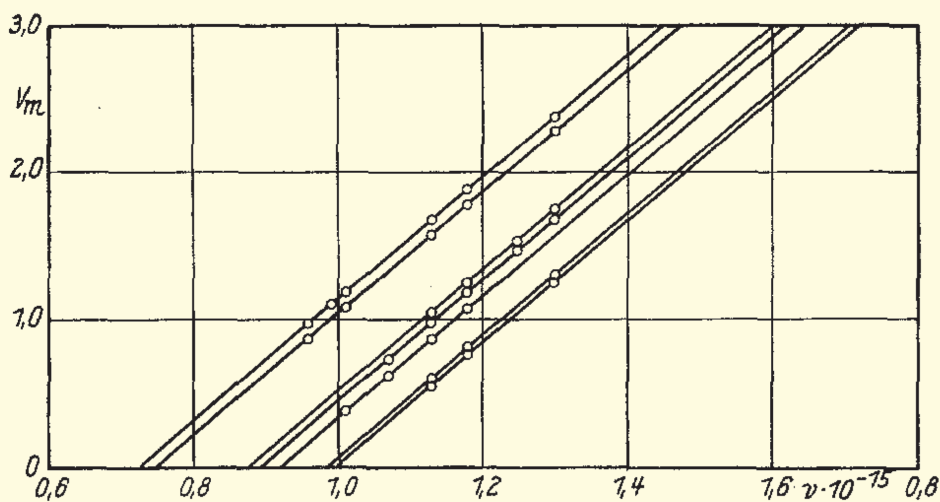


Fig. 10.

Die Geraden entsprechen den Metallen (von links gerechnet):
Al, Zn, Sn, Ni, Cd, Cu, Pt.

Abb. 4: Die Originalergebnisse aus der Arbeit von Lukirsky und Prileveav [9]. Ordinatenachse: $U_{\max} + U_K$, Abszissenachse: Frequenz des Lichts. U_{\max} ist die Spannung, bei der der Photostrom gerade gleich null wird, U_K ist die Kontaktspannung. Der Ordinatenachsenabschnitt (hier nicht zu sehen) entspricht der Austrittsenergie der Kathode. Trägt man auf der Ordinate nur U_{\max} auf, so entspricht der Ordinatenabschnitt der Austrittsenergie der Anode.

was man als Austrittsenergie der Kathode bezeichnet, gehört in dieselbe Kategorie von Störeffekten, wie die Kontaktspannung, siehe Gleichung (7).

Schließlich ist die Kontaktspannung nichts anderes als die Differenz der chemischen Potentiale der Elektronen in den beiden Materialien. Das chemische Potenzial der Elektronen im Material hat aber mit der Oberfläche nichts zu tun, und es ist unabhängig davon, ob die Oberfläche verschmutzt ist oder nicht. Die Austrittsenergie ist daher eine genau so respektable Materialgröße wie Massendichte oder elektrische Leitfähigkeit. Natürlich wirkt sich eine Verschmutzung der Oberfläche auf den photoelektrischen Effekt aus, denn man hat es dann nicht mehr mit dem chemischen Potenzial des eigentlichen Materials der Elektroden zu tun, sondern mit dem des Schmutzes.

Entsorgung

Wir sehen drei Möglichkeiten.

1. Man erklärt das Experiment korrekt, etwa mit dem Wasserbehältermodell.
2. Man sieht davon ab, den Achsenabschnitt zu interpretieren.
3. Man macht das Experiment gar nicht.

Für einen Physiker im Jahr 1910 oder 1920 war das Experiment sehr wichtig, es war eine Art Schlüsselexperiment. Nun müssen sich aber die Lernenden heute ihre Kenntnisse nicht unter den selben schwierigen

Bedingungen beschaffen, wie es unsere Vorfahren mussten, die die entsprechende Physik selbst entwickelt haben. Wir wissen schließlich, wie die Geschichte ausging, wir kennen unzählige andere Experimente, die wir nur deuten können, wenn wir die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie als quantisiert annehmen. Wir kennen die Schrödingergleichung, und wir können uns die Photonen mit billigen Geräten einzeln ansehen. Keinem Schüler oder Studenten wird im Verständnis der Physik etwas fehlen, wenn er das Experiment mit dem lichtelektrischen Effekt nicht gesehen hat.

Schließlich sei noch bemerkt, dass es noch heute berechtigte Zweifel daran gibt, ob der photoelektrische Effekt überhaupt etwas über die Quantisierung des Lichts aussagt [10].

Literatur

- [1] Gerthsen, Kneser und Vogel: Physik, Springer-Verlag, Berlin 1977, S. 308
 - [2] Stierstadt, K.: Physik der Materie, VCH, Weinheim 1989, S. 489
 - [3] Wichmann, E. H.: Quantum Physics, Berkeley Physics Course, Volume 4, McGraw-Hill, New York 1971, S. 28-31
 - [4] Hecht, E.: Optik, Addison-Wesley, Bonn 1989, S. 571-574
 - [5] Schpolski, E. W.: Atomphysik, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1972, S. 315-320
- „Zweitens verschiebt sich die Kurve auch, wie in allen ähnlich gelagerten Fällen, auf Grund des Kontaktpotentials, das einer genauen Messung nur schwer zugänglich ist. Dies sowie eine Reihe anderer experimenteller Schwierigkeiten und Fehlerquellen führten dazu,

daß die Einsteinsche Gleichung zunächst nicht einwandfrei bestätigt werden konnte. Erst Millikan gelang es dann, nach verschiedenen Vorarbeiten, in deren Verlauf Widersprüche aufgedeckt und überwunden wurden, den lange angestrebten experimentellen Beweis zu erbringen und h genau zu bestimmen.“

[6] Einstein, A.: Über einen die Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, Annalen der Physik 322, Nr. 6, 1905, S. 132-148. „Wenn jedes Energiequant des erregenden Lichtes unabhängig von allen übrigen seine Energie an Elektronen abgibt, so wird die Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen, d.h. die Qualität der erzeugten Kathodenstrahlung, von der Intensität des erregenden Lichtes unabhängig sein; andererseits wird die Anzahl der den Körper verlassenden Elektronen der Intensität des erregenden Lichtes unter sonst gleichen Umständen proportional sein.“

[7] Millikan, R. A.: Einstein's Photoelectric Equation and Contact Electromotive Force, Phys. Rev 7, 1916, S. 18-32

[8] Millikan, R. A.: A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h", Phys. Rev 7, 1916, S. 355-388

[9] Lukirsky, P., Prileveav, S.: Über den normalen Photoeffekt, Zeitschrift für Physik 49, 1928, S. 236-258.

„Werden auf der Ordinatenachse die bei Bestrahlung mit Licht von verschiedener Frequenz für ein bestimmtes Metall erhaltenen $V_2 + K$, auf der Abszissenachse die Frequenzen ν aufgetragen, so erhalten wir eine Gerade, deren Tangente gleich h/e ist. Bei bekannten e finden wir daraus den Zahlenwert von h .“ (V_2 steht bei Lukirski für U_{\max} , K für die Kontaktspannung.)

[10] Kidd, R., Ardini, J., Anatol, A.: Evolution of the modern photon, Am. J. Phys. 57, 1989, S. 27-35

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe, 76128 Karlsruhe, E-Mail: f.herrmann@kit.edu