

Anwendung des Maschensatzes bei einer Fotozelle

Axel Donges

Kurzfassung

Es wird mit Hilfe des Maschensatzes gezeigt, dass die Spannung zwischen Anode und Kathode einer Fotozelle i.d.R. kleiner ist als die angelegte Spannung. Die Konsequenzen für den bekannten Gegenspannungsversuch (Bestimmung der Planck-Konstante) werden aufgezeigt

Einleitung

Die experimentelle Bestimmung der Planck-Konstanten h mit Hilfe einer Fotozelle gehört zu den klassischen Versuch der Schul- und Hochschulphysik. Bei diesem Versuch bestrahlt wird die Kathode einer Fotozelle mit Licht unterschiedlicher Frequenzen f bestrahlt und die angelegte Gegenspannung $U < 0$ zwischen Anode und Kathode so lange variiert, bis der Fotostrom I gerade verschwindet [1]. Wird die positive Spannung $-U_{I=0}$, d.h. bis auf das Vorzeichen diejenige Spannung U , bei der der Fotostrom gerade verschwindet, über f aufgetragen, ergibt sich eine Gerade mit der Steigung h/e .

$$-U_{I=0} = (h/e)f - W_A/e \quad (1)$$

Hierbei sind h die Planck-Konstante, e die Elementarladung und W_A die Elektronenaustrittsarbeit des Anodenmaterials. Die Gerade (1) schneidet die Ordinate bei $-W_A/e$ und die Abszisse bei W_A/h [2].

In vielen Lehrbüchern der Schul- und Hochschulphysik wird dieser Sachverhalt falsch dargestellt. In Gleichung (1) wird oft – statt der Austrittsarbeit W_A des Anodenmaterials – die Austrittsarbeit W_K des Kathodenmaterials angegeben. Ursächlich für diesen Fehler ist die Nichtberücksichtigung von Kontaktspannungen.

Kontaktspannung

Werden zwei unterschiedliche Metalle I und II in Kontakt gebracht, so lädt sich das Metall mit der geringeren Elektronenaustrittsarbeit positiv, das andere negativ auf [3]. An der Kontaktfläche zwischen den beiden Metallen tritt daher eine Kontaktspannung $U_{I,II}$ auf. Für sie gilt [4]

$$U_{I,II} = (W_{II} - W_I)/e. \quad (2)$$

Prof. Dr. Axel Donges unterrichtet Physik an der Fachhochschule und Berufskolleg Naturwissenschaftlich-Technische Akademie Isny/Allgäu.

Hierbei sind W_I und W_{II} die Elektronenaustrittsarbeiten der beiden Metalle.

Spannungsabfall zwischen Anode und Kathode

Wir betrachten eine Fotozelle, deren Anode (A) und Kathode (K) aus zwei unterschiedlichen Metallen besteht. Anode und Kathode sind mit Leitungen, die aus einem dritten Metall (L) bestehen, mit einer Konstantspannungsquelle verbunden (siehe Abb. 1). Die angelegte Spannung U teilt sich nach dem Maschensatz wie folgt aus:

$$U = U_{L,A} + U_B + U_{K,L}. \quad (3)$$

Hierbei sind $U_{L,A}$ und $U_{K,L}$ die Kontaktspannungen zwischen dem Leiter- und Anodenmaterial bzw. dem Kathoden- und Leitermaterial. U_B ist die Spannung zwischen Anode und Kathode. Die Kontaktspannungen lassen sich mit Hilfe der Elektronenaustrittsarbeiten (W_L, W_A, W_K) der drei Materialien berechnen.

$$U_{L,A} = (W_A - W_L)/e \quad (4)$$

$$U_{K,L} = (W_L - W_K)/e \quad (5)$$

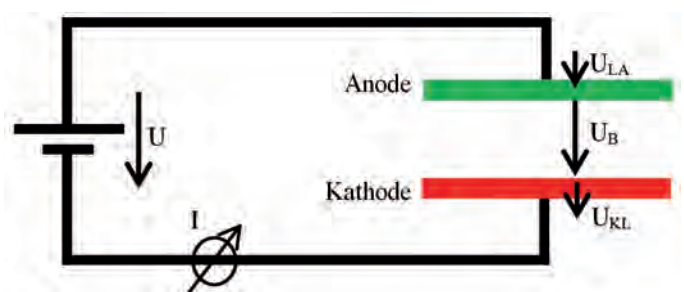


Abb. 1: Schaltbild einer Fotozelle

Aus (3) bis (5) folgt unmittelbar

$$U_B = U + U_{A,K} \quad (6)$$

mit

$$U_{A,K} = (W_K - W_A)/e. \quad (7)$$

$U_{A,K}$ ist die Kontaktspannung, die sich zwischen dem Anoden- und Kathodenmaterial einstellt. Üblicherweise ist bei einer Fotozelle $W_A > W_K$, weshalb $U_{A,K} < 0$ und somit auch

$U_b < U$ sind. Die Spannung U_b zwischen Anode und Kathode ist somit kleiner als die angelegte Spannung U .

Gegenspannungsmethode

Wird nun die Kathode der Fotozelle mit Licht aus-reichend hoher Frequenz f beleuchtet, werden Fotoelektronen ausgelöst. Für die maximale kinetische Energie der Fotoelektronen gilt

$$W_{\text{kin,max}} = hf - W_K \quad (8)$$

Bei dem bekannten Gegenspannungsversuch zur Bestimmung der Planck-Konstanten [1, 5] wird experimentell diejenige Gegenspannung $U < 0$ bestimmt, bei der der Fotostrom I gleich null wird (Abb. 1). In diesem Fall gilt

$$W_{\text{kin,max}} = hf - W_K = -eU_{b,1} = 0 \quad (9)$$

bzw. bei Berücksichtigung von (6)

$$hf - W_K = -e(U_{I=0} + U_{A,K}) \quad (10)$$

Hierbei sind $U_{b,1} = 0$ und $U_{I=0}$ jeweils diejenigen Spannungen U_b und U , bei denen der Fotostrom gerade verschwindet ($I = 0$). Mit (7) folgt aus (10) die bereits in der Einleitung zitierte Formel

$$-U_{I=0} = (h/e)f - W_{A,K}/e \quad (1)$$

Schlussbemerkung

Die Tatsache, dass $U_b \neq U$ ist, bleibt oft unberücksichtigt. In vielen Lehrbüchern findet man daher fälschlicher Weise in (1) statt der Austrittsarbeit des Anodenmaterials die des

Kathodenmaterials, d.h.

$$-U_{I=0} = (h/e)f - W_K/e \quad (\text{falsch}) \quad (11)$$

V. Baltz, Herrmann und Pohlig geben in [2] eine schülergerechte Herleitung der korrekten Formel (1). Die hier alternativ vorgeschlagene Herleitung mit Hilfe des Maschensatzes erachtet der Autor als noch elementarer. Sie setzt allerdings die Kenntnis/Akzeptanz der Gleichung (2) voraus, die den Schülerinnen und Schülern jedoch auf einfache Weise plausibel gemacht werden kann.

Anmerkung

¹ Um eine Fotozelle auch für längere Wellenlängen des sichtbaren Spektrums empfindlich zu machen, wählt man ein Kathodenmaterial mit möglichst geringer Austrittsarbeit. Dies erreicht man, indem man die Kathode z.B. mit Caesium oder einer Caesium-Verbindung beschichtet.

Literatur

- [1] <http://www.ld-didactic.de/ga/5/558/55879/55879.pdf> (Stand: 01.12.2013)
- [2] R. v. Baltz, F. Herrmann, M. Pohlig: Altlasten der Physik (115): Der photoelektrische Effekt. PdN-PhiS 6/58 (2009), S. 47-49
- [3] Bergmann-Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik Bd. II (Elektrizität und Magnetismus). Berlin: Walter de Gruyter (1971), S. 79
- [4] U. Leute: Physik und ihre Anwendungen in Technik und Umwelt. München: Hanser (2004), S. 211
- [5] <http://www.walter-fendt.de/ph14d/photo-effekt.htm> (Stand: 17.07.2013)

Vor 100 Jahren

Robert A. Millikan: A direct photoelectric determination of Planck's "h". Phys. Rev., 7(3):355–388, 1916.

[Robert Millikan begann bereits 1905, Einsteins Lichtquantenhypothese zu überprüfen. Nach 10 Jahren konnte er ihre Gültigkeit nachweisen und h bestimmen. Er zeigte den Konflikt zwischen der Wellenvorstellung vom Licht und der Lichtquantenhypothese auf. Kontaktspannungen und Oberflächenreinheit waren die experimentellen Hürden. Er schreibt:]

"... It was in 1905 that Einstein made the first coupling of photo effects and with any form of quantum theory by bringing forward the bold, not to say the reckless, hypothesis of an electro-magnetic light corpuscle of energy $h\nu$, which energy was transferred upon absorption to an electron. This hypothesis may well be called reckless first because an electromagnetic disturbance which remains localized in space seems a violation of the very conception of an electromagnetic disturbance, and second because it flies in the

face of the thoroughly established facts of interference. The hypothesis was apparently made solely because it furnished a ready explanation of one of the most remarkable facts ... viz., that the energy with which an electron is thrown out of a metal by ultra-violet light or X-rays is independent of the intensity of the light while it depends on its frequency. This fact alone seems to demand some modification of classical theory ..." [S. 355]

"... [the Einstein equation] must certainly be regarded as one of the most fundamental and far reaching of the equations of physics; ... Yet the semi-corpuscular theory by which Einstein arrived at his equation seems at present to be wholly untenable. ... [S. 383]

Anmerkung: Der von Millikan angegebene Wert $h = 6,57 \cdot 10^{-34}$ Js ist etwa 1% kleiner als der heute beste Wert.