

DER PHOTOEFFEKT UND DIE BESTIMMUNG DES PLANCKSCHEN WIRKUNGSQUANTUMS

22. November 2017

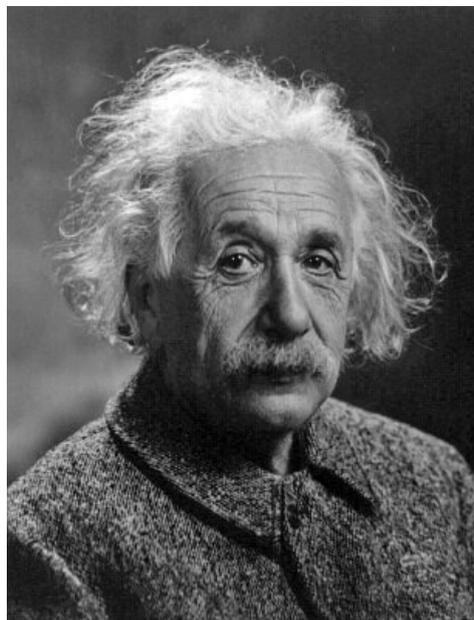


Abbildung 1: Albert Einstein (Physiknobelpreis 1921 für die Deutung des Photoeffekts)

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	2
1.1 Historischer Hintergrund	2
2 Photoeffekt qualitativ	2
2.1 Aufbau und Durchführung	2
2.2 Deutung	3
3 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums mit Hilfe des Photoeffekts	4
3.1 Aufbau und Durchführung	4
3.2 Ergebnisse der Auswertung	7
3.3 Technische Anwendungen des Photoeffekts	8
4 Quellen	8
5 Geräte	8

1 Einführung

1.1 Historischer Hintergrund

Als Geburtsstunde der **Quantenphysik** gilt der 14. Dezember 1900. An diesem Tag stellte **Max Planck** in Berlin sein **Strahlungsgesetz** vor und führte die Naturkonstante h in die Physik ein. Ihm zu Ehren wird diese Konstante heute „**Plancksches Wirkungsquantum**“ genannt. Einer der ersten Effekte, der durch die **Quantenphysik** erklärt werden konnte, war der **Photoeffekt**. Dieser Effekt fiel erstmals **Heinrich Hertz** auf, als er 1887 beobachtete, dass der Funkenüberschlag bei einer **Funkenstrecke** durch **ultraviolettes Licht** beeinflusst wurde.

Daraufhin beschäftigten sich **Wilhelm Hallwachs** (Abbildung 2) und später **Philipp Lenard** intensiver damit. Hallwachs fand heraus, dass eine negativ aufgeladene Zinkplatte durch UV-Strahlung ihre Ladung abgibt. Durch sichtbares Licht hingegen, egal welcher Intensität, konnte die Platte nicht entladen werden. Dieses Phänomen wird als (äußerer) Photoeffekt bezeichnet und konnte im Rahmen der klassischen Physik nicht erklärt werden¹. **Albert Einstein** deutete 1905 dieses Experiment unter Verwendung der Planckschen Quantenhypothese. Für diese Arbeit bekam er **1921 den Physiknobelpreis**. Die **Quantenphysik** beschreibt das Verhalten von **Quantenobjekten**, z.B. von **Atomen** und **Elektronen**. Viele Naturphänomene, insbesondere im mikroskopischen Bereich, werden erst durch sie verständlich. Auch Licht verhält sich wie ein **Quantenobjekt**.



Abbildung 2: **Wilhelm Ludwig Franz Hallwachs**

2 Photoeffekt qualitativ

2.1 Aufbau und Durchführung

Geräte:

- **Elektroskop** mit **Zinkplatte**
- Katzenfell und/oder Tuch
- PVC-Stab und Glasstab
- Quecksilberdampflampe mit **Drossel**
- Glasgefäß

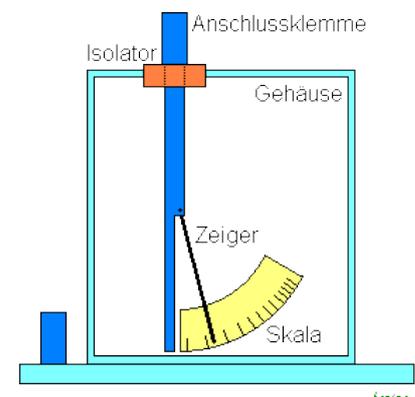


Abbildung 3: **Elektroskop**

Experimentelle physikalische Grundlagen

Als Lichtquelle benutzen wir eine Quecksilberdampflampe, weil sie neben sichtbarem auch **ultraviolettes Licht** emittiert. Um das ultraviolette Licht abzuschalten, bringen wir Glas zwischen die Lampe und die Zinkplatte. Glas lässt nämlich nur das **sichtbare Licht** passieren und absorbiert das ultraviolette. Sichtbares und ultraviolettes Licht unterscheiden sich nur in der Wellenlänge: Ultraviolettes Licht ist kurzwelliger als sichtbares.

Zur **Ladungsmessung** der Zinkplatte benutzen wir ein **Elektroskop**, das an die Zinkplatte angeschlossen ist. Eine elektrische Aufladung der Zinkplatte hat dann einen Zeigerausschlag des Elektroskops zur Folge (Abbildung 3).

Die elektrische Aufladung der Zinkplatte erfolgt durch Reibung eines Glas- oder Gummistabs an einem Tuch oder Fell. Die Reibung zwischen Stab und Tuch/Fell trennt die Ladungen, so dass ein Glasstab positiv und ein Gummistab negativ wird. Diese Ladung kann an die Zinkplatte übertragen werden. In der Zinkplatte und dem damit verbundenen Elektroskop verteilt sich die Ladung gleichmäßig, weil es sich um elektrisch leitendes Material handelt, was bedeutet, dass sich Elektronen darin frei bewegen können.

¹Es treten beispielsweise folgende Widersprüche zwischen der klassischen Wellentheorie und den experimentellen Beobachtungen auf: 1. Auch Licht mit großer Wellenlänge/kleiner Frequenz sollte Elektronen herauslösen können, wenn die Intensität hinreichend hoch gewählt ist. 2. Gemäß der klassischen Theorie sollte das Auslösen der Ladungen erst nach einer kleinen Zeitverzögerung einsetzen.

Durchführung:

Wurde die Zinkplatte nicht erst kürzlich vorher benutzt, dann muss sie zuerst etwas abgeschmirgelt werden, denn Zink oxidiert schnell und eine Oxidschicht auf der Oberfläche verhindert, dass Strahlung das Zink erreicht. Dann wird der jeweilige Stab am Tuch oder Katzenfell gerieben und an der Zinkplatte *abgestrichen*. Dadurch werden die Ladungen des Stabes auf die Zinkplatte des Elektroskops gebracht. Es ist ein Zeigerausschlag zu beobachten. Die Quecksilberdampflampe wird eingeschaltet (und etwas gewartet bis sie ihre volle Helligkeit erreicht hat) und die Zinkplatte damit bestrahlt. Die Ladungsänderung, die der Zeigerausschlag anzeigt, wird interpretiert und in Tabelle 1 notiert. Dies wird für die verschiedenen, in dieser Tabelle angegebenen Lichtsituationen gemacht. Um die **Stahlungsintensität** zu variieren, muss der Abstand zwischen Quecksilberdampflampe und Zinkplatte verändert werden. Das UV-Licht wird mittels des Bodens des Glasgefäßes herausgefiltert.

Aufgabe 1:

Tragen Sie ihre Beobachtungen in Tabelle 1 ein wenn ...

- die Zinkplatte einmal positiv und einmal negativ aufgeladen und mit der Lampe bestrahlt wird. Was können Sie am Elektroskop beobachten?
- zusätzlich die Intensität durch Veränderung des Abstandes zwischen Lampe und Zinkplatte variiert wird! Was können Sie am Elektroskop beobachten?
- außerdem zusätzlich mit dem Glasgefäß die UV-Anteile herausgefiltert werden! Was beobachten Sie? Wie ist das zu erklären?

Zinkplatte	Licht	Beobachtung
negativ geladen	UV + sichtbar	
positiv geladen	UV + sichtbar	
negativ geladen	UV + sichtbar, hohe Intensität	
negativ geladen	nur sichtbar (kein UV)	
negativ geladen	nur sichtbar (kein UV), hohe Intensität	

Tabelle 1: Beobachtungen bei der Bestrahlung der Zinkplatte

2.2 Deutung

Die Entladung von Festkörpern mithilfe von Licht wird „äußerer Photoeffekt“ oder „lichtelektrischer Effekt“ genannt. Durch Licht wird eine negativ geladene Platte entladen, eine Platte mit positiver Ladung jedoch nicht. Man deutet dies so, dass es sich bei den negativen Ladungen um Elektronen handelt, die durch die Bestrahlung aus der Platte herausgelöst werden (Abb. 4). Durch die Erhöhung der Lichtintensität entlädt sich die Platte schneller. Wird jedoch eine Glasscheibe vorgehalten, die die UV-Strahlung abschirmt, so kommt es zu gar keiner Entladung - auch nicht, wenn die Intensität erhöht wird.

Diese Unabhängigkeit von der Intensität widerspricht der klassischen Physik, in der Licht als eine **elektromagnetische Welle** betrachtet wird. Gemäß den klassischen Vorstellungen müssten sich die Elektronen auch durch sichtbares Licht von der Platte ablösen lassen, wenn die **Lichtintensität** genügend groß gewählt wird. Dass dies nicht der Fall ist, ist nur mit Hilfe der Quantenphysik zu erklären.

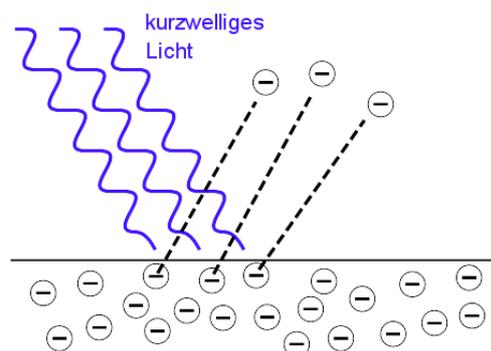


Abbildung 4: Photoeffekt

Bei der Wechselwirkung mit Materie verhält sich Licht so, als ob es aus Teilchen besteht – sogenannte „Lichtquanten“ oder „Photonen“². Die Energie eines Photons nimmt proportional zur **Frequenz** f zu ($E_{\text{Photon}} = h \cdot f$). Weil UV-Licht eine höhere Frequenz als sichtbares Licht hat, besitzen seine Photonen demnach eine größere Energie als die Photonen des sichtbaren Lichtes. Um ein Elektron aus der Zinkplatte herauszulösen, muss ihm eine gewisse Mindestenergiemenge zugefügt werden. Diese zum Herauslösen erforderliche Mindestenergiemenge wird **Austrittsarbeit** (physikalisches Symbol W_A) genannt. Wenn also ein Elektron ein **Photon** genügend hoher Energie absorbiert, löst es sich von der Zinkplatte ab. Wird die Intensität des UV-Lichtes erhöht, so gelangen mehr Photonen an die Zinkplatte, also geschieht die Entladung schneller. Trifft nur sichtbares Licht auf die Zinkplatte, so reicht die (niedrigere) Energie dieser Photonen nicht aus, um Elektronen aus dem Zink herauszulösen. Auch wenn die Intensität erhöht wird, also mehr Photonen pro Zeit auf die Zinkplatte treffen, können keine Elektronen aus der Platte gelöst werden. Die Energieportion eines Photons ist kleiner als die zum Herauslösen notwendige **Austrittsarbeit** und die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron sehr schnell hintereinander zwei Photonen absorbiert, ist extrem gering³. Für ein **Photon** des UV-Lichtes gilt: Es gibt seine Energie an das Elektron ab. Diese Energie ist größer oder gleich der Austrittsarbeit und reicht also aus, um das Elektron aus der Zinkplatte herauszulösen und was darüberhinaus dann noch davon übrig ist, geht über in kinetische Energie des Elektrons: $E_{\text{Photon}} = W_A + E_{\text{kin}}$.

Die Austrittsarbeit W_A , die benötigt wird, um Elektronen aus einem Festkörper herauszulösen, ist **für verschiedenen Materialien** unterschiedlich - sie ist eine Stoffkonstante.

3 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums mit Hilfe des Photoeffekts

3.1 Aufbau und Durchführung

Geräte:

- **Optische Bank** und optische Reiter
- Quecksilberdampf Lampe mit **Drossel**
- **Irisblende**, Linse, Linsenhalter und Farbfilter
- **Photozelle** mit Netzgerät
- Voltmeter

Aufbau:

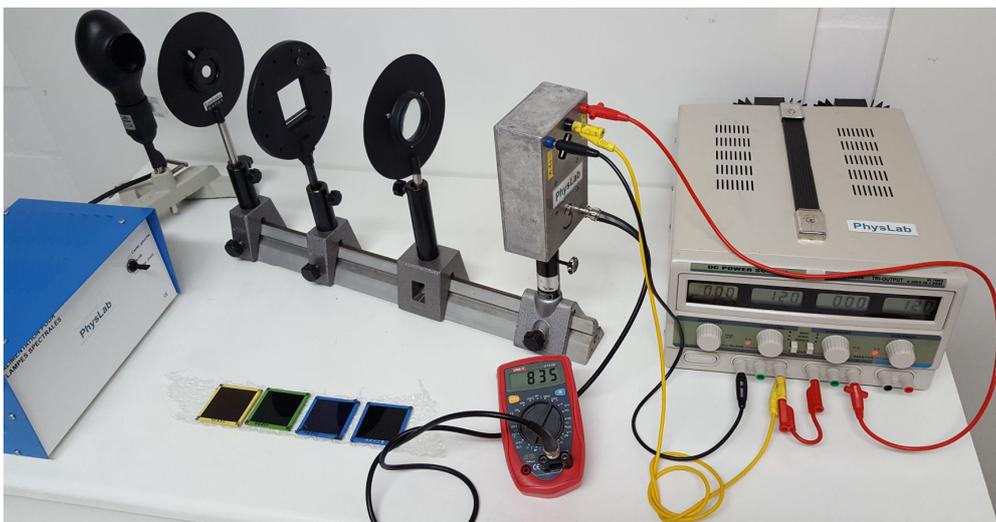


Abbildung 5: Versuchsaufbau

²Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war man fest davon überzeugt, dass Licht eine Welle wäre. Alle bekannten Phänomene, mit Ausnahme des Photoeffekts, waren im Wellenmodell perfekt beschreibbar. Man versuchte den Photoeffekt zu verstehen, aber niemand kam auf die Idee, die zugrunde liegende Modellvorstellung anzuzweifeln. Hier liegt die besondere Leistung Albert Einsteins, der den Mut hatte, sich von der klassischen Vorstellung zu lösen und die damals relativ neue Plancksche Strahlungshypothese aus dem Jahr 1900 auf das Licht zu verallgemeinern. Unsere Vorstellung von der Natur des Lichts wurde hierdurch grundlegend verändert.

³Verwendet man eine Lichtquelle extrem hoher Intensität (z.B. einen Laser), so können auch „Zwei-Photonen-Absorptionen“ beobachtet werden.

Aufgabe 2:

- Verkabeln Sie Fotozelle, Netzgerät und Spannungsmessgerät entsprechend der nachfolgenden Beschreibung. **Lassen Sie die Verkabelung vor dem Einschalten des Netzgeräts und der Lampe abnehmen!**
- Schalten Sie beide Spannungen des Netzgeräts auf 12 V und stellen Sie den Messbereich des Voltmeters auf 2 V ein.
- Arrangieren Sie die optischen Elemente entsprechend der nachfolgenden Beschreibung und justieren Sie den Strahlengang so, dass das Licht auf die Einlassöffnung des Fotozellengehäuses fokussiert wird.

Auf einer optischen Bank werden die Geräte in folgender Reihenfolge montiert: Quecksilberdampflampe, Irisblende (sehr nah an der Lampe!), Farbfilter, Linse, und die Photozelle deren photosensitives Material **Kalium** ist. Die Quecksilberdampflampe wird mit Hilfe einer **Drossel** betrieben. Die Irisblende muss immer geschlossen sein, wenn die empfindliche Photozelle nicht benutzt wird.

Im Photozellengehäuse befindet sich ein eingebauter **Messverstärker**, der durch ein Doppelnetzgerät mit Strom versorgt wird (Abb. 6). Photozelle und Doppelnetzgerät müssen Sie entsprechend der Abbildung 6 verkabeln. Beachten Sie dabei die Beschriftung der Photozelle! **Beide Ausgänge des Doppelnetzgeräts müssen auf eine Spannung von 12 V gestellt werden** (wofür eine Strombegrenzung von 0,1 A ausreicht). Ein an die Photozelle angeschlossenes Voltmeter (**Messbereich auf 2 V einstellen**) zeigt die Grenzspannung (s. u.) an. Der Gesamtaufbau ist in Abbildung 5 zu sehen. Lassen Sie ihren Aufbau bitte vor dem Einschalten des Stroms prüfen!

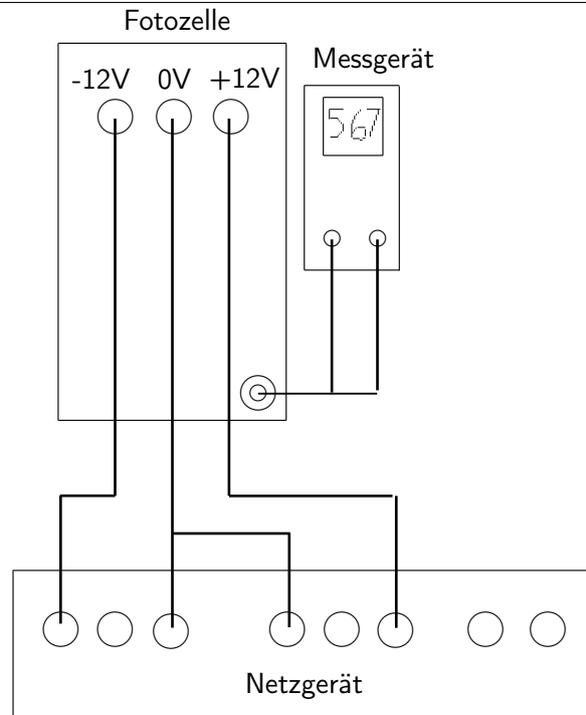


Abbildung 6: Anschluss des Netzgeräts. **Achtung:** Es gibt verschiedene Netzgeräte, die nicht alle Buchsen haben, die hier in dem Verkabelungsbild erscheinen!

Experimentelle physikalische Grundlagen

Fällt Licht genügend kleiner Wellenlänge auf die Kathode der Photozelle, so treten Elektronen aus der Oberfläche aus. Da die Kathode aus **Kalium**⁴ ist, dessen **Austrittsarbeit** geringer ist als die von Zink, reicht bereits sichtbares Licht, um den Photoeffekt hervorzurufen. Ist die **kinetische Energie** der herausgelösten Elektronen groß genug, gelangen sie auf die ringförmige Auffängerelektrode (Abb. 7). Da die Elektronen nicht (bzw. nur schlecht) abfließen können, baut sich zwischen Auffängerelektrode und **Kathode** eine Spannung auf, so dass es für nachfolgende Elektronen immer schwerer wird, die Auffängerelektrode zu erreichen. Nach kurzer Zeit nimmt diese Spannung einen stabilen Wert an, d.h. auch die schnellsten aus der Kathode herausgelösten Elektronen können die Auffängerelektrode nicht mehr erreichen. Diese Grenzspannung wird von uns bei vier verschiedenen Wellenlängen gemessen. Aus den gemessenen Grenzspannungen kann jeweils die maximale **kinetische Energie** der Elektronen bestimmt werden. Sie ist dann:

$$E_{kin}^{max} = e \cdot U \quad (1)$$

Die **Energie** eines **Lichtquants (Photons)** wächst linear mit der **Frequenz** $E_{Photon} = h \cdot f$. Mit Hilfe der Formel $c = f \cdot \lambda$ (c : **Lichtgeschwindigkeit**, $c = 3,00 \cdot 10^8$ m/s) können die entsprechenden Frequenzen aus den Wellenlängen des Lichtes (siehe Tabelle 2) berechnet werden.

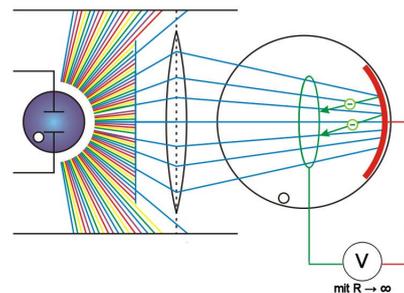


Abbildung 7: Aufbau der Grenzspannung in der Photozelle

⁴Alkalimetalle weisen im Allgemeinen eine relativ geringe **Austrittsarbeit** auf.

Durchführung und Auswertung:

Aufgabe 3:

- Messen Sie, entsprechend der nachfolgenden Anleitung, die Grenzspannung, die sich für die einzelnen Farben ergibt und tragen Sie sie in Tabelle 3 ein!
- Berechnen Sie aus den Angaben in Tabelle 2 die Frequenzen der entsprechenden Farben und tragen Sie sie in Tabelle 3 ein!
- Berechnen Sie dann die **kinetische Energie** der Elektronen und tragen Sie sie in Tabelle 3 ein!
- Stellen Sie den Zusammenhang zwischen der **Frequenz** des Lichts und der Energie der Elektronen grafisch auf Millimeterpapier dar!
- Bestimmen Sie aus dieser Graphik das **Plancksche Wirkungsquantum** sowie die **Austrittsarbeit** für Kalium! Was sagt die Grenzfrequenz aus?

Die Einstellung der Wellenlängen geschieht mit vier Farbfiltern, die jeweils eine Linie aus dem sichtbaren Spektrum der Quecksilberdampf Lampe herausfiltern. Nach der Justierung des Strahlengangs (Irisblende offen, kein Farbfilter eingelegt) schließen Sie die Irisblende und setzen als ersten den gelben Farbfilter ein. Für die Messung der Grenzspannung öffnen Sie die Irisblende so weit wie möglich, warten bis sich ein einigermaßen stabiler Wert für die Grenzspannung eingestellt hat und tragen ihn in Tabelle 3 ein. Zum Wechseln der Farbfilter müssen Sie jeweils die Irisblende schließen und danach für die Messung wieder ganz weit öffnen.

Die kinetische Energie der einzelnen Elektronen kann aus der gemessenen elektrischen (Grenz-)Spannung berechnet werden. Es ist zweckmäßig, als Energieeinheit „**Elektronenvolt**“ (eV) zu benutzen ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Farbe	Filter	Wellenlänge λ/nm
gelb	30/05	578
grün	31	546
blau	32	436
violett	33	405

Tabelle 2: Zuordnung der beiden Endziffern der Filternummer zu Filterfarbe und Wellenlänge.

Farbe	Frequenz / Hz	Grenzspannung / V	Kinetische Energie / eV
gelb			
grün			
blau			
violett			

Tabelle 3: Zum Eintragen der Messdaten. Experimenteller Zusammenhang zwischen Frequenz und Energie.

3.2 Ergebnisse der Auswertung

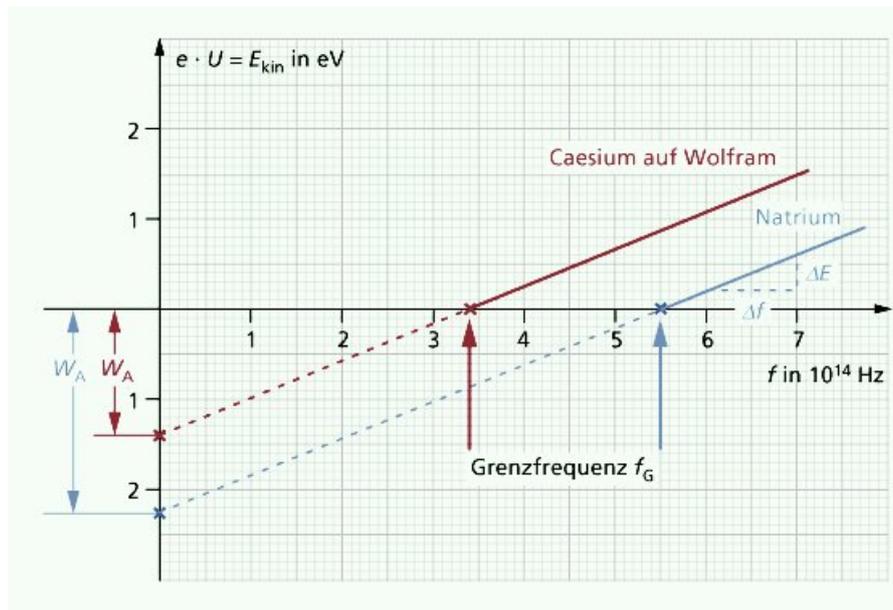


Abbildung 8: Einsteingerade für Cäsium und Natrium

Durch die Messpunkte legt man eine Ausgleichsgerade. Die Gleichung dieser sogenannten *Einsteingeraden* lautet:

$$E_{kin} = h \cdot f - W_A \quad (2)$$

Der Schnittpunkt der Einsteingeraden mit der vertikalen Achse (Ordinate) stellt die **Austrittsarbeit** dar. Die Austrittsarbeit wird von der Energie des **Photons** abgezogen, da sie der kinetischen Energie des Elektrons beim Austreten aus der Metalloberfläche verloren ging. Die Steigung der Gerade entspricht dem Planckschen Wirkungsquantum.

Das Plancksche Wirkungsquantum ist eine Naturkonstante, sie beträgt $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js bzw. $4,14 \cdot 10^{-15}$ eVs. Somit ergeben sich für die unterschiedlichen Materialien Parallelen: Die Geraden haben zwar unterschiedliche Ordinaten-Abschnitte (Austrittsarbeiten), aber stets die gleiche Steigung (h) (Abb. 8). Der Schnittpunkt mit der horizontalen Achse (Abszisse) ist die „Grenzfrequenz“ - nur Licht mit mindestens dieser **Frequenz** kann Elektronen aus der Platte auslösen. Die Energie ist umso größer, je höher die Frequenz des verwendeten Lichtes ist. Die Energie des Lichtquants hf wird auf das Elektron übertragen. Ein Teil dieser Energie wird benötigt, um Austrittsarbeit zu überwinden. Die restliche Energie verbleibt dem Elektron als kinetische Energie.

Der Photoeffekt lässt sich im Wellenbild nicht verstehen, sondern nur im Teilchenbild. Das heißt aber nicht, dass Licht wirklich aus Teilchen besteht! Licht ist etwas Drittes, weder Welle noch Teilchen. Die komplette, mathematische Beschreibung des Verhaltens von Licht erfolgt durch die **Quantenelektrodynamik**, an deren Formulierung RICHARD FEYNMAN (Abb. 9) wesentlichen Anteil hatte. Doch man kann mit Hilfe der nachfolgend aufgeführten „Faustregel“ das Verhalten von **Quantenobjekten** auch ohne **Quantenelektrodynamik** beschreiben, muss dann aber zwei scheinbar zueinander widersprüchliche Modelle (**Wellenbild und Teilchenbild**) verwenden.



Abbildung 9: Richard Feynman (1965)

Zum Verständnis der meisten Phänomene reicht die folgende „Faustregel“ aus:

**Die Ausbreitung von Quantenobjekten im Raum
wird im Wellenbild beschrieben.**

**Die Wechselwirkung von Quantenobjekten mit Materie
wird im Teilchenbild beschrieben.**

3.3 Technische Anwendungen des Photoeffekts

- Lichtschranken
- Restlichtverstärker
- Photomultiplier
- Photoelektronenspektroskopie (→ Untersuchung von Festkörpern)
- Erzeugung freier Elektronen für Teilchenbeschleuniger

4 Quellen

- Meyer, Schmidt (Herausgeber); Basiswissen Schule - Physik Abitur, Paetec 2003
- Wikipedia, <http://de.wikipedia.org>
- Abbildungen (Stand 10.11.2017):
 - Abb. 1: Wikipedia, public domain (copyright not renewed)
 - Abb. 2: Wikipedia, public domain (because of age - published 1905)
 - Abb. 3: Wikipedia, GNU-Lizenz für freie Dokumentation, gezeichnet von Honina
 - Abb. 4: Wikipedia, public domain
 - Abb. 7: Wikipedia, GNU-FDL (Urheber: Stefan-Xp), modifiziert
 - Abb. 8: Meyer, Schmidt (Herausgeber); Basiswissen Schule - Physik Abitur, Paetec 2003
 - Abb. 9: Wikipedia, public domain (created before January 1, 1969),
Quelle: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/feynman-bio.html

5 Geräte

Bezeichnung		Bezeichnung
Photozelle		Optische Bank
Doppel-Labornetzgerät		Optische Reiter
Quecksilberdampf Lampe		Voltmeter
Irisblende		PVC-Stab & Plexiglasstab
Linsenhalter		Katzenfell
Farbfilter (46805, 46830-46833)		Kabel und Adapter
Linse (f=90-120)		Glasgefäß
Elektroskop		Bleistifte und Lineal
Digital-Multimeter		Millimeterpapier
Drossel		Taschenrechner