

Der Hallwachs-Effekt – Das Tor zur Quantenphysik

Vortrag zur Tagung 2013 in Jena

des Fachverbandes Geschichte der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Texte zu den Folien der PowerPoint-Präsentation – Druck: 06.03.2013 14:32

1. Folie: Titel

Den Namen „Hallwachs-Effekt“ trug der lichtelektrische Effekt, kurz auch Fotoeffekt, zeitweilig zu Ehren Wilhelm Hallwachs' (1859-1922), der diesen Effekt nach seiner Entdeckung 1887 durch Heinrich Hertz (1857-1894) zuerst grundlegend untersuchte. Ich habe diesen Titel gewählt, um für die Schule die historische Dimension zu unterstreichen.

2. Folie: Überblick

Zwei Arten von Wissenstransfer in der Physikgeschichte möchte ich unterscheiden, den Transfer von Begriffen und Methoden

- auf konventionellen Wegen durch jede Art persönlichen Kontakt, mündlich oder schriftlich, oder durch Publikationen (Beispiel Philipp Lenard) und
- den Transfer bei Grenzüberschreitung z.B. von Disziplingrenzen oder auch nur von Grenzen zwischen paradigma-orientierten Gruppierungen (Kuhn) von Fachleuten einer Disziplin (Beispiel Max Planck).
- Zum Schluss möchte ich nach guten Bedingungen für funktionierenden Wissenstransfer fragen.
- Dieses Referat habe ich mitten in der Beschäftigung mit der Vor- und Frühgeschichte der Quantentheorie vorbereitet, so dass ich nur einen kleinen Ausschnitt aus dem Gesamtgeschehen zeigen kann.

3. Folie: Diagramm „Vernetzung – Überblick“

- Dieses Diagramm stellt eine reduzierte Fassung eines Posters zum gleichen Thema dar, das ich im Sommer 2012 für die „*International Conference for History of Science in Science Education*“ in Flensburg anfertigte. Zwei Forschungsbereiche sind farblich unterschieden, gelb der zum lichtelektrischen Effekt und rot der zur Wärmestrahlung. Orange kennzeichnet die Vereinigung der Ergebnisse beider Forschungen, braun hier die Überprüfung. Das Poster war mit den sechs Forschern Hertz, Hallwachs, Lenard, Planck, Einstein und Millikan rechts aber noch unvollständig. Das lag unter anderem daran, dass ich zu der Zeit auf der Suche nach forschungsleitenden

Modellvorstellungen war, die ich in der Unanschaulichkeit der Quantentheorie nicht vermutete. Zum Thema Wissenstransfer kann aber natürlich dieser Teil der Geschichte nicht fehlen, der durch Faraday, Maxwell, Kirchhoff, Boltzmann, Wien und Paschen repräsentiert wird.

- Ich beginne mit Philipp Lenard.

4. Folie: Lennard 1

Nach meinem Empfinden erkennt man hier dreierlei:

- Philipp Lennard arbeitete mit auffallender Sorgfalt. Er wird als „genialer Forscher“ mit einer „glücklichen Verbindung von Intuition und experimentellem Geschick“ charakterisiert.¹ Sehr genau beschreibt er sein Experimentiergerät und die Durchführung seiner Versuche. Außerdem sichert er seine eigenen Ergebnisse so oft wie möglich durch Vergleiche mit den Ergebnissen anderer Autoren ab, weist sogar noch auf eine englische Arbeit hin, die nach Fertigstellung seines Artikels erschienen war.
- Lenard sammelte Ergebnisse von Beobachtungen zum lichtelektrischen Effekt, notierte große Mengen von Messergebnissen und besprach sie. Er beschrieb Phänomene und funktionale Abhängigkeiten zwischen den beobachteten Größen.
- Theoretische Herleitungen solcher Abhängigkeiten aus Grundgleichungen findet man bei ihm aber nicht.

5. Folie: Lenard 2

- Hier sind alle Bezüge zu anderen Autoren aufgelistet, die Lenard in seiner Arbeit von 1902 erwähnt hatte. Bis zu diesem Zeitpunkt waren allein über Lenard außer ihm selber 19 Forscher an der Untersuchung des lichtelektrischen Effekts beteiligt. Insgesamt fand ich etwa 35 Personen, nur diejenigen gezählt, die in Anmerkungen erwähnt waren.

6. Folie: Lenard 3

- Zu den für Laien erstaunlichsten, aber auch überhaupt wichtigsten Ergebnissen der Versuche Lenards gehört die Erkenntnis, dass keine der beteiligten elektrischen Größen von der Intensität des Lichtes abhängt.
- Außerdem löst nur Licht kurzer Wellenlängen den Effekt aus.

¹ Kleinert, Andreas: Verdienste und Verfehlungen. Zum 150. Geburtstag von Philipp Lenard (1862-1947). In: Physik Journal 11 (2012) Nr. 7, 51. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2012.

- Fällt das untersuchte Licht durch durchsichtige Glas- und Glimmerplatten, dann bleibt der Effekt aus.
- Lenard stellte auch fest, dass das Licht von Kohlebogenlampen eine andere Anfangsgeschwindigkeit der ausgelösten Ladungsträger bewirkte als das Licht starker elektrischer Funken.
- Lenard hat als praktischer Experimentator, aber weniger begabter Theoretiker keine Theorie des lichtelektrischen Effekts aufgestellt. Seine Hypothese, dass die Absorption von Licht als Resonanzerscheinung der Wechselwirkung von Lichtschwingung und, wie er es nannte „elektrischem Elementarquantum“ aufzufassen sei, führte ihn auf einen Widerspruch.

7. Folie: Lenard 4

Was geschah nun mit Lenards Wissen?

- Albert Einstein weist in seiner Arbeit von 1905 über die Erzeugung und Verwandlung des Lichts, die ihm später mit dem Nobelpreis belohnt wurde, auf die „bahnbrechende“ Arbeit Lenards hin. Besonders die Frequenz- und Materialabhängigkeit regten ihn zu seinen eigenen Überlegungen an.
- Die von Lenard entworfene Vakuum-Glasröhre, die man rechts oben abgebildet sieht, wurde später modifiziert zur Vakuum-Fotozelle konzipiert. Dabei wurden einige Unzulänglichkeiten vermieden, z.B. der schräge Lichteinfall wurde dadurch unnötig, dass die der Kathode gegenüberliegende Anode als offener Ring ausgebildet wurde.
- Für die Bestimmung der Austrittsenergie der vom Licht ausgelösten Elektronen erfand Lenard die sog. Gegenfeldmethode.² Diese Methode wird auch heute noch verwendet.

8. Folie: Vernetzung – Überblick

- Wir wenden uns nun dem zweiten Transferstrang zu, der die Forscher zur Wärmestrahlung enthält. Robert Kirchhoff prägte den Begriff des Schwarzen Körpers. Zum Energiespektrum sagte er:

² Die Elektronen treten an der lichtbestrahlten Metallplatte aus, die dadurch zur Kathode wird. Ihr gegenüber steht eine zweite Elektrode, die die ausgetretenen Elektronen „einsammeln“ kann, nachdem diese wegen ihrer Austrittsenergie den Raum zwischen den Elektroden durchquert haben. Legt man nun an die Anode gegenüber der Kathode eine negative Spannung U an, dann entsteht zwischen beiden Elektroden ein elektrisches Feld, in dem die bewegten Elektronen abgebremst werden. Regelt man nun die Spannung so ein, dass gerade keine Elektronen mehr die Anode erreichen, was man an dem verschwindenden Anodenstrom erkennt, dann ist die durch das Feld vermittelte Energie eU gleich der Austrittsenergie $\frac{1}{2} m_e v^2$. Dabei ist e die Ladung der Elektronen und m_e ihre Masse.

„Die mit J [Emissionsvermögen des Schwarzen Körpers] bezeichnete Größe ist [...] eine Funktion der Wellenlänge und der Temperatur. Es ist eine Aufgabe von hoher Wichtigkeit, diese Funktion zu finden.“³

9. Folie: James Clerk Maxwell

- Maxwell entwickelte zu dem von Michael Faraday als Gegensatz zur bis dahin vorherrschenden Fernwirkungstheorie als anschauliche Vorstellung als Grundlage seiner Nahewirkungstheorie entwickelten Feldbegriff eine umfassende elektromagnetische Feldtheorie.⁴ Diese Theorie wurde 1891 von Boltzmann und 1896 von Hertz aufgegriffen. Heinrich Hertz experimentierte lange mit den von Maxwell vorhergesagten elektromagnetischen Wellen. Dabei entdeckte er durch Zufall den lichtelektrischen Effekt.
- Ein zweites Arbeitsgebiet Maxwells war die Thermodynamik. Dabei entwickelte er die nach ihm und Ludwig Boltzmann benannte Geschwindigkeitsverteilung von Gasmolekülen. Diese wurde von Wien und Boltzmann aufgegriffen.

10. Folie: Wilhelm (Willy) Wien

- Wien hatte 1896 das nach ihm benannte Verschiebungsgesetz theoretisch hergeleitet.⁵ Es war die erste konkrete Aussage über die Spektren strahlender Körper. Es besagt, wie die Wellenlänge eines strahlenden schwarzen Körpers von dessen absoluter Temperatur abhängt: $\lambda_{\max} = \frac{2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T}$. Die Einordnung des Verschiebungsgesetzes in die Gesamttheorie der Thermodynamik zeigt die Grafik rechts oben. Sie stellt einen dreidimensionalen Graphen des Planckschen Strahlungsgesetzes dar, in der das Wiensche Verschiebungsgesetz durch Kurven auf Ebenen parallel zur T- λ -Ebene grafisch repräsentiert wird.

Mit diesem Gesetz und weiteren Hypothesen leitete Wien das Strahlungsgesetz ab:

$$\phi(\lambda) = \frac{C}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{c}{\lambda T}\right)}}$$

- Solche Hypothesen waren z.B., dass sich Absorption und Emission in einem stationären Gleichgewicht befänden und dass die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung auch für feste Körper gelte. Das Gesetz gab die Beobachtungen für kleine Wellenlängen sehr gut wieder, versagte aber bei großen Wellenlängen bzw. kleinen Frequenzen.

³ Ann. Phys, (185, 275-301) 1860, 292.

⁴ Maxwell, James Clerk: A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. In: Philosophical Transactions of the Royal Society. London. 1. January 1855; 459-512.

⁵ W. Wien: *Über die Energieverteilung im Emissionsspektrum eines schwarzen Körpers*. Annalen der Physik, Band 294, Nr. 8, S. 662–669 (1896); hier: S. 666

11. Folie: Wien 2

- (Texte verlesen und auf den Beziehungspfeil hinweisen. Er hebt hervor, dass Paschen ein allgemeineres Gesetz aufgestellt hat, von dem das Wiensche Gesetz ein Einzelfall ist.)

12. Folie: Planck 1

- Max Planck war reiner Theoretiker, ließ andere aber stets seine Aussagen durch Experimente überprüfen. In Kindheit und Jugend war sein ständiges Streben nach dem „Absoluten“ in den Naturgesetzen entstanden.⁶

13. Folie: Planck 2

- Planck beschäftigte sich von 1895 an mit der Wärmestrahlung. Zu seinem Ausgangspunkt wählte er nach dessen Publikation wie Wien den schwarzen Strahler.
- Da das Wiensche Strahlungsgesetz die Verhältnisse im langwelligen Bereich schlecht wiedergab, suchte Planck nach Verbesserungen. Nachdem ihm Rubens kurz vor dem 19.10.1900 vom Strahlungsgesetz des Engländers Rayleigh berichtet hatte, interpolierte Planck zwischen den bekannten Gesetzen und stellte das Ergebnis am 19.10.1900 in der DPG vor.
- Die Abbildungen links zeigen im linken Bild die Abweichungen der Beobachtungen von den mit dem Wienschen Gesetz berechneten Werten. Im Rechten Bild sieht man gut, dass die nach Planck berechneten Werte genau auf der Kurve der beobachteten Werte des linken Bildes liegen.

14. Folie: Planck 2a

- Die beiden Graphen in vergrößerter Darstellung.

15. Folie: Planck 3

- Hier sind mit Rayleigh's Gesetz alle drei Gesetze grafisch dargestellt. Man erkennt rechts deutlich die interpolierende Funktion des Planckschen Gesetzes.
- Planck selber schreibt in einem 1931 an den amerikanischen Physiker R. W. Wood gerichteten Brief, dass sein Gesetz damals als reine, glücklich erratene Interpretationsformel nur geringen Wert besitze. Er habe sich damals gezwungen gesehen, die „Methode Boltzmann“ anzuwenden. Für ihn sei das Ganze ein Akt der Verzweiflung gewesen.

⁶ Während der Tagung wies mich ein Zuhörer, dessen Namen ich nicht mitbekommen habe, darauf hin, dass mein ursprünglich sichtbarer Eintrag „Ab1912 Beständiger Sekretär der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft“ falsch sei. Ich habe ihn deshalb durch den nun aktuellen ersetzt. Vielen Dank für den Hinweis.

16. und

17. Folie: Ludwig Boltzmann ()

- Boltzmann vereinte hohe Kunst des Experimentierens mit ausgezeichneten theoretischen Fähigkeiten. Er konnte erfolgreich den physikalischen Sinn des zweiten Hauptsatzes anschaulich dadurch deuten, dass er ihn auf statistische Betrachtungen an Gasen zurückführte. Grundlage dafür waren seine von Planck abgelehnten „atomistischen“ Vorstellungen. So erklärte sich die Entropie als mikroskopische Größe.
- Deshalb wurde seine Gastheorie außer von Planck auch von anderen Wissenschaftlern teilweise heftig bekämpft, so z.B. von den „Energetikern“ um Ostwald.⁷
- Interessant im Hinblick auf die Bedeutung, die der Planckschen Idee der diskreten Energiezustände der Hohlraumresonatoren beigemessen wird, halte ich die Idee Boltzmanns, bei der Herleitung der Verteilungsfunktion der Molekülgeschwindigkeiten bereits 1872 oder davor den „Trick“ der Einführung diskreter Energiezustände der Gasmoleküle anzuwenden.⁸

18. Folie: Albert Einstein ()

- 1905 veröffentlichte Albert Einstein vier bedeutende Arbeiten. Deren erste trägt die Überschrift: ***Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.***

⁷ Boltzmann im Zusammenhang mit einem Hinweis auf „Die Fülle mit der Erfahrung übereinstimmender Resultate [...]“ im Vorwort zu Vorlesungen über Gastheorie, II. Teil. Leipzig 1898: „Ich habe nun die Ueberzeugung, dass diese Angriffe lediglich auf Missverständnissen beruhen, und dass die Rolle der Gastheorie in der Wissenschaft noch lange nicht ausgespielt ist.“

⁸ Eine stark verkürzte Darstellung auf der letzten, ausgeblendeten Folie der Präsentation:

Zu Ludwig Boltzmann nach Boltzmann/Broda.1979: Broda, Engelbert: Einleitung. In: Boltzmann, Ludwig: Populäre Schriften. Eingeleitet und ausgewählt von Engelbert Broda. Braunschweig/Wiesbaden, 1979.

Die „Methode Boltzmann“ (in stark verkürzter Form): Die Integration einer sehr komplexen, kontinuierlichen Funktion bei der Lösung einer partiellen Differentialgleichung löste Boltzmann so:

1. Das Integral wird durch eine Summe ersetzt: $\int_0^\infty f(x, t) dx = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \epsilon [f(\epsilon, t) + f(2\epsilon, t) + f(3\epsilon, t) + \dots + f(p\epsilon, t)]$,
für $\lim_{\epsilon \rightarrow 0} p\epsilon = \infty$, ϵ und ∞ seien endlich.
2. „Wir müssen [...] annehmen, daß unsere Moleküle nicht imstande sind, eine kontinuierliche Reihe lebendiger Kräfte anzunehmen, sondern bloß solche, welche Vielfache einer [...] Größe ϵ sind.“
3. Man führt zunächst die Summenbildung durch.
4. Durch die abschließende Grenzwertbildung wird erreicht, dass die über den diskreten Energieintervallen stückweise definierte Funktion f sich zu der kontinuierlichen Funktion f zusammenfügt.

- Die stichwortartige Aufzählung der Paragrafentitel zeigt, dass sich Einstein durch die Publikationen von Planck und Lenard mit dem gesamten Wissensmaterial zu Wärmestrahlung und lichtelektrischen Effekt befasst, dass sich in den Jahren vor 1900 angesammelt hatte.⁹

19. Folie: Einstein 2

- Das rechts dargestellte Experiment zum Fotoeffekt mit der Ergebnisgrafik zur Einsteingeraden ist im Physikunterricht der Sekundarstufe II der typische Einführungsversuch im Kurs „Elemente der Quantentheorie“. Ganz ausgezeichnet lässt sich am Fotoeffekt die Unfähigkeit der klassischen physikalischen Vorstellungen zur Erklärung der Widersprüche zwischen Vermutungen und Beobachtungen zeigen. Moderne Kurse bleiben aber bei der formalen Einführung der Energiequanten nicht stehen und geben den abstrakten quantentheoretischen Begriffen weitgehend anschauliche physikalische Bedeutungen.¹⁰

20. Folie: Robert Andrews Millikan ()

- Millikan wurde durch seine Öltröpfchen-Versuche zur Bestimmung der elektrischen Ladung von Ionen und des Elektrons, der Elementarladung, bekannt. Rechts oben ist eine schematische Abbildung seiner Versuchsanordnung zu sehen.¹¹ In einer Veröffentlichung in der Physikalischen Zeitschrift von 1916 macht er drei bemerkenswerte Aussagen:¹²

⁹ Die Bezeichnung heuristisch (aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie: Heuristik (altgr. εὐρίσκω heurísko, ich finde, zu heuriskein, (auf)finden, entdecken) bezeichnet die Kunst, mit begrenztem Wissen ("unvollständige Informationen") und wenig Zeit zu guten Lösungen zu kommen. Es bezeichnet ein analytisches Vorgehen, bei dem mit begrenztem Wissen über ein System mit Hilfe von Mutmaßungen Schlussfolgerungen über das System getroffen werden. Die damit gefolgerten Aussagen können von der optimalen Lösung abweichen. Durch Vergleich mit einer optimalen Lösung kann die Güte der Heuristik bestimmt werden. Bekannte Heuristiken sind zum Beispiel Versuch und Irrtum (= 'Trial and Error') und das Ausschlussverfahren. Heuristische Verfahren basieren auf Erfahrungen; sie können auch auf falschen Erfahrungen basieren (z.B. verzerrte Wahrnehmung, Scheinkorrelation) oder solchen, die "damals" richtig waren, heute aber falsch sind.) für die Einführung der Energiequanten des Lichts und deren Begründung damit, dass gewisse Beobachtungen „über die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes besser verständlich erscheinen unter der Annahme, dass die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei.“, erinnert mich an die vorsichtige Formulierung von Nikolaus Kopernikus im Vorwort seiner Schrift *De Revolutionibus*, so sei alles leichter zu berechnen. Erfolg hatten sie beide damit, jedenfalls auf lange Sicht.

Einsteins Energiequanten des Lichts sollten nicht mit Plancks Energiequanten verwechselt werden. Nachweislich war Planck bis etwa 1911 nicht damit einverstanden, dass seine Quanten irgendeine physikalische Realität besäßen. Einen physikalischen Sinn hatten sie für ihn, den Theoretiker, aber schon, nämlich den des mathematischen Hilfsmittels bei der Ableitung seines Strahlungsgesetzes. Sonst nichts! Einsteins Quanten bewegten sich aber durch den Raum, „[...] ohne sich zu teilen oder als Ganzes absorbiert oder erzeugt werden zu können.“ Diese „[...] in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten [...] hatten aber für Einstein die gleiche physikalische Realität wie beispielsweise Gasmoleküle.

¹⁰ Dabei werden die Theorien z.B. von Dirac und Schrödinger verwendet, die aber erst sehr viel später entwickelt wurden.

¹¹ Vgl. den Vortrag von Martin Panusch, GP 6.2 am Mi., 27.2.13, 10:15 Uhr.

¹² Physikalische Zeitschrift 17 (11), 1916; 220.

- Millikan hat sich 10 Jahre mit der experimentellen Bestätigung von Einsteins Theorie des Fotoeffekts beschäftigt.¹³
- Einsteins Gleichung gibt die Energie der Elektronenemission bei Lichtbestrahlung exakt wieder.
- „Nichtsdestoweniger erscheint mir die physikalische Theorie, auf der sich die Gleichung aufbaut, gänzlich unhaltbar.“

Wenn man dann noch davon erfährt, dass Millikans Messwerte in seinen ersten Veröffentlichungen dadurch geschönt waren, dass er die nicht passenden Werte einfach unterschlug, dann werden möglicherweise seine inneren Widersprüchlichkeiten verständlich. Entschuldbar sind sie innerhalb des Wissenschaftsbetriebs zweifellos nicht.

21. Folie

- **Folie: Bedingungen für funktionierenden Wissenstransfer**
- Die Texte beider Folien werden vorgelesen. Gewicht liegt auf der Vermeidung von exklusiv wirkender Fachsprache bei trans- oder interdisziplinärer Zusammenarbeit mit Fachleuten anderer Disziplinen und der Rücksichtnahme auf Mehrfachdefinitionen auf verschiedenen Fachhintergründen.

¹³ Andere Quellen berichten davon, dass Millikan sich erst ab 1909 überhaupt direkt mit dieser Überprüfung beschäftigt habe.