

Probleme der Theorie vom Licht als elektromagnetische Welle.

Die *Intensität* I einer Strahlung ist gleich der pro Zeit Δt und (zur Strahlung senkrechten) Fläche ΔA übertragene Energie ΔW . Es gilt also $I = \Delta W / (\Delta t \cdot \Delta A)$ bzw. $I = P / \Delta A$, wobei $P = \Delta W / \Delta t$ die Strahlungsleistung ist. Während die Strahlungsintensität einer mechanischen Welle von ihrer Amplitude und ihrer Frequenz abhängt, hängt die Strahlungsintensität der elektromagnetischen Welle nur von der Amplitude ab. Das zeigt die Formel $I_{EM} = \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \cdot \hat{E}^2$, in welcher *nur* die Amplitude \hat{E} , *nicht* aber die Frequenz f vorkommt. Weil sich auch Licht letztlich als EM-Welle entpuppt hat, müssten Energieübertragung bzw. Strahlungsintensität von Licht entsprechend *nur* von seiner Helligkeit, *nicht* aber von seiner Farbe abhängen. Dass die Amplitude wichtig ist, spürt man unter der IR-Lampe. Sie wärmt umso mehr, je heller sie ist. Die Erfolge, welche sich aus dem Verständnis des Elektromagnetismus ergaben, waren gigantisch und sie sind es bis heute. Die Rundfunk- und Antennentechnik bis hoch zu den Handyfrequenzen im Gigahertz-Bereich beruht darauf. Das Verständnis von Streuung und Dispersion von Licht in Kristallen war die Grundlage zur Erfindung der LCD (Flüssigkristallanzeige). Bis heute gibt es permanent weitere Erfindungen im EM-Bereich.

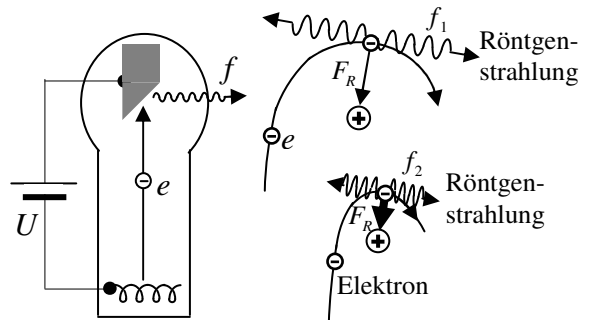
Deshalb war es ein Schock, als Ende des 19. Jahrhunderts mehr und mehr Experimente auftauchten, die zeigten, dass die Frequenz bei der Energieübertragung *doch* eine Rolle spielt. Diese *Widersprüche* führten letztlich zu einer Modifikation des Wellenbildes, welche Ausgangspunkt für die Quantentheorie wurde. Dadurch kam Newtons längst verworfenes Korpuskelbild sogar wieder zu Ehren.

a) Problem: Sonnenbrand: Jeder weiß, dass man in wölig warmem Licht keinen Sonnenbrand bekommt. Erst wenn das Licht große UV-Anteile hat, wird man braun oder bekommt sogar Sonnenbrand mit Hautschädigung. Dabei muss die Helligkeit, also die Amplitude des UV-Lichtes, nicht einmal groß sein. Die hohe Frequenz des UV-Lichtes bewirkt die Schädigung.

Das steht im Widerspruch zur Frequenzunabhängigkeit der Energieübertragung der EM-Welle.

b) Problem: Röntgenkante

In der Röntgenröhre werden Elektronen durch eine Hochspannung U beschleunigt. Ihre kinetische Energie ergibt sich aus $e \cdot U = \frac{1}{2} m v^2$. Die Elektronen schlagen dann mit hoher Geschwindigkeit auf die abgeschrägte Anode. Diese erwärmt sich dabei und zusätzlich wird Röntgenlicht abgestrahlt. Röntgenlicht gehört ebenfalls zur Familie der elektromagnetischen Wellen. Also muss das Zustandekommen des Röntgenlichtes mit dem „Antennenprinzip“ erklärlich sein: Die schnellen Elektronen durchschlagen bei ihrem Aufprall auf die Atome des Anodenmaterials deren Elektronenhülle und gelangen so bis in die unmittelbare Nähe der Atomkerne. Je nach dem, wie gut ein Elektron den Atomkern trifft, zieht es eine mehr oder weniger enge Bahn um diesen. Dabei erfährt das Elektron eine starke Radialbeschleunigung zum Kern hin. Allgemein bewirkt die beschleunigte Bewegung einer elektrischen Ladung die Abstrahlung einer EM-Welle. Dabei erfolgt die Abstrahlung, wie bei der Stabantenne, stets *senkrecht* zur Beschleunigungsrichtung. Wegen der *radialen* Beschleunigung des Elektrons zum Kern hin, erfolgt die Abstrahlung des Röntgenlichtes *tangential* zum Bahnverlauf.



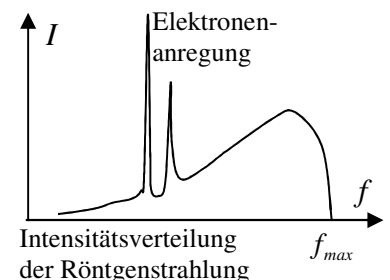
So wie ein sonnennaher Planet eine geringe Umlaufzeit und damit eine hohe Frequenz hat, so sollten auch diejenigen Elektronen die den Kern sehr eng umlaufen sehr hohe Frequenzen abstrahlen. Da es neben „schlechten“ Treffern auch sehr kernnahe gibt, sollten auch alle Frequenzen bis unendlich möglich sein. Das Frequenzspektrum sollte *keine* Obergrenze haben. Tatsächlich gibt es eine Frequenzobergrenze. Diese heißt „Röntgenkante“. Die Existenz der Frequenzobergrenze f_{\max} der Röntgenstrahlung, ist mit der Theorie der EM-Welle nicht erklärbar, sie stellt einen Widerspruch zur EM-Theorie des Lichtes dar.

So wie ein sonnennaher Planet eine geringe Umlaufzeit und damit eine hohe Frequenz hat, so sollten auch diejenigen Elektronen die den Kern sehr eng umlaufen sehr hohe Frequenzen abstrahlen. Da es neben „schlechten“ Treffern auch sehr kernnahe gibt, sollten auch alle Frequenzen bis unendlich möglich sein. Das Frequenzspektrum sollte *keine* Obergrenze haben. Tatsächlich gibt es eine Frequenzobergrenze. Diese heißt „Röntgenkante“.

Die Existenz der Frequenzobergrenze f_{\max} der Röntgenstrahlung, ist mit der Theorie der EM-Welle nicht erklärbar, sie stellt einen Widerspruch zur EM-Theorie des Lichtes dar.

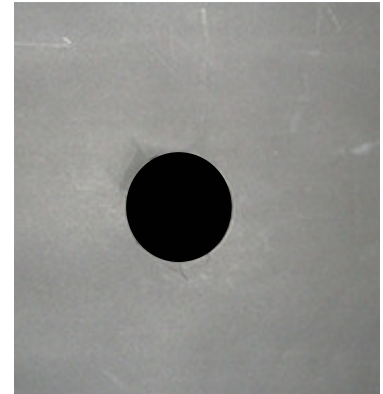
Die Existenz der Frequenzobergrenze f_{\max} der Röntgenstrahlung, ist mit der Theorie der EM-Welle nicht erklärbar, sie stellt einen Widerspruch zur EM-Theorie des Lichtes dar.

Übrigens: Die Frequenzobergrenze f_{\max} ist direkt proportional zur Beschleunigungsspannung U .



c) Problem: Hohlraumstrahler

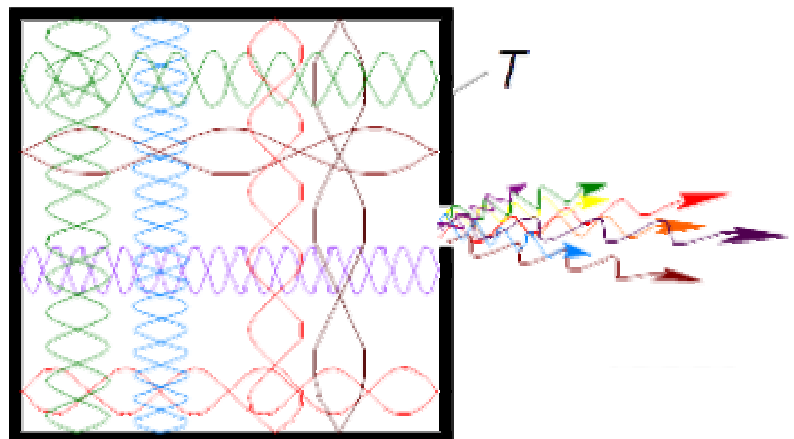
Nachdem Edison die Glühlampe erfunden hatte, waren für die öffentliche Beleuchtung, außer der Karbidlampe, noch etliche andere Lampen in Gebrauch. Da die Beleuchtung nun ein Wirtschaftsfaktor wurde, war ein Leistungsvergleich erforderlich. Man brauchte eine normierte Vergleichslampe. Diese durfte aber keine speziellen Techniken bevorzugen, sie musste „neutral“ sein. Als „Neutrallampe“ wurde ein beliebiges Material auf eine regelbare Temperatur T gebracht. Wir wissen, dass z.B. Eisen im Schmiedefeuer bei zunehmender Temperatur immer intensiver leuchtet, zunächst mattrot und letztlich gleißend weiß. Um Fremdeinstrahlung auszuschließen, wird das Material an die Innenwand eines Hohlraumes montiert und mit einer Rußschicht überzogen. Die Kiste bekam zum Lichtaustritt dann noch ein kleines Loch. Die verrußten Innenflächen verhindern, dass durch das Loch einfallendes Außenlicht das Ergebnis verfälscht. Das Austrittsloch ist dann noch schwärzer als der schwärzeste Nachthimmel. Deshalb erhielt diese Normallampe den Namen „Schwarzer Strahler“.



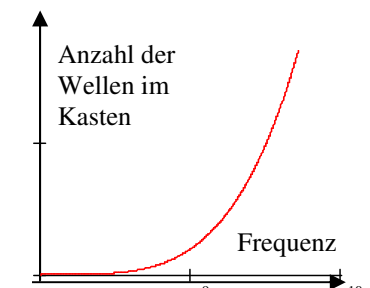
Je nach Temperatur T trat dann Licht anderer Farbe aus. Selbst bei Zimmertemperatur $T = 293K$ tritt eine EM-Welle der Wellenlänge $\lambda = 9,89 \mu m$ bzw. der Frequenz $f = 17,2 \cdot 10^{12} Hz$ aus, das ist immer noch Infrarot-Licht. Und selbst bei $1K$ tritt noch „Licht“ aus.

Problem: Die Theorie der EM-Wellen führt beim Schwarzen Strahler zur „UV- Katastrophe“.

Die EM-Wellen im Hohlraum werden von den warmen Wänden absorbiert und gleich wieder emittiert. Das ist wie eine Reflexion. An den Wänden gilt $\hat{E} = 0$. Eine stehende Welle bildet sich aus, wenn ein ganzzahliges Vielfaches von halben Wellenlängen auf den Wandabstand a passt, wenn also $n \cdot \lambda / 2 = a$, bzw. $\lambda = 2a / n$ gilt. Aus $f = c / \lambda$ folgt, dass alle Wellen mit den Frequenzen $f = n \cdot c / 2a$ in den Kasten



passen (und das noch in allen drei Richtungen). Da es aber für EM-Wellen *keine* Frequenzbeschränkung nach oben gibt und die Energie der EM-Welle frequenzunabhängig ist, bietet der Kasten unendlich vielen energetisch gleichberechtigten Wellen Platz. Deshalb beginnt sofort ein Konkurrenzkampf um die Energie. Weil aber nur eine endliche Anzahl von Atomen in der Wandung – und überhaupt in der ganzen Welt – ist, verlieren sie den Kampf gegen die unendlich vielen Wellen mit Pauken und Trompeten. Tatsächlich wächst die Anzahl der Wellen sogar mit f^4 . Da bleibt für den Kasten nichts übrig. Die EM-Wellen entziehen der Kiste alle Energie. Die Temperatur des Kastens sinkt auf null Kelvin. Ja die gesamte materielle Welt würde erstarren, weil das Licht ihr sämtliche Energie raubt. Diese logisch zwingende Überlegung ging in die Wissenschaftsgeschichte unter dem Namen „UV-Katastrophe“ ein.



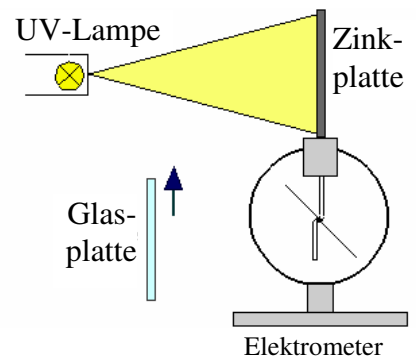
Die Anzahl der Wellen wächst mit der vierten Potenz der Frequenz

Weil die materielle Welt aber nicht die Temperatur 0 Kelvin hat, musste die EM-Theorie verändert werden. Dies gelang dem Physiker Max Planck im Jahre 1899 bzw. 1900 durch die Entdeckung einer bis dahin unbekanntes Naturkonstante, dem Planckschen Wirkungsquantum $h = 6,626 \cdot 10^{-34} Js$. Die Entdeckung des Planckschen Wirkungsquantums war der entscheidende Schritt zur neuen Quantentheorie.



d) Problem: Hallwachs-Experiment, Lichtelektrischer Effekt

Im Jahre 1887 bestrahlte Wilhelm Hallwachs auf Anregung von Heinrich Hertz eine blank geputzte Zinkplatte mit UV-Licht. Die Zinkplatte war isoliert aufgehängt und an ein Elektrometer angeschlossen, um den Ladezustand der Platte durch Abspreizung des Zeigers nachzuweisen. Hallwachs stellte fest, dass sich eine vorab *negativ* aufgeladene Platte durch die Bestrahlung entlud, während das bei positiver Aufladung nicht der Fall war. Desweiteren entdeckte er, dass die Entladung ausblieb, wenn der UV-Anteil des Lichtes durch eine Glasscheibe weggefiltert wurde.



Hallwachs erkannte recht schnell, dass seine Entdeckung des *Lichtelektrischen Effektes*, wie der *Hallwachseffekt* dann auch genannt wurde, den Bau eines Belichtungsmessers ermöglicht.

Die wissenschaftliche Erforschung des Hallwachseffektes nahm nun mit neuen Experimenten Fahrt auf. Anstatt Zink wurden auch andere Metalle erprobt und diese in einen evakuierten Glaskolben eingebracht. Damit war die erste Photozelle entstanden. Schnell wurde klar, dass die überschüssige negative Ladung, die bei der Bestrahlung abgegeben wird, aus Elektronen besteht. Wenn man diese Ladungen nämlich beschleunigt, zeigen sie im Magnetfeld die gleichen Kreisbahnen, wie man sie von Elektronen bei der Glühemission im Fadenstrahlrohr kennt.

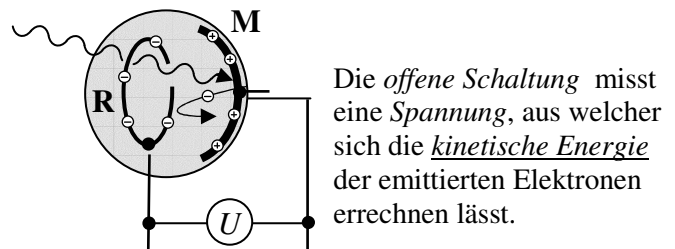
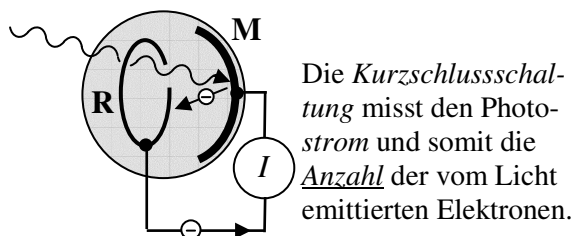
Die Messreihen der Hallwachs-Folgeexperimente haben *vier* Variable:

Licht: Farbe bzw. *Frequenz* f des Lichtes und Helligkeit bzw. *Intensität* I des Lichtes

Elektronen: *Stromstärke* I bzw. Anzahl n und Geschwindigkeit bzw. *kinetische Energie* W_{kin} .

Es wurden zwei Schaltungen konzipiert:

a) Die offene Schaltung. b) Die Kurzschlusschaltung. Beide besitzen *keine* Spannungsquelle. Später kam noch die Gegenfeldschaltung dazu, welche eine Spannungsquelle benutzt. Der Messaufbau bestand immer aus einer Photozelle mit einer Metallschicht **M** und einer Ringelektrode **R**, welche zum Auffangen der durch die Lichteinstrahlung emittierten Elektronen dient.



b) In der Kurzschlusschaltung werden **R** und **M** über ein Amperemeter (mit $R = 0\Omega$) verbunden. Hier fließen *alle* von **R** aufgefangenen Elektronen nach **M** zurück. Es gibt daher keine Aufladung zwischen **R** und **M** und es entsteht *kein* elektrisches Feld. Aus der Stärke des Photostroms $I = \Delta Q / \Delta t = n \cdot e / \Delta t$ ergibt sich dann die Anzahl n der pro Zeit emittierten Elektronen.

Die Geschwindigkeit mit welcher die Elektronen auf **R** aufprallen spielt *keine* Rolle.

Stets werden die ankommenden Elektronen von **R** aufgefangen und nach **M** zurückgeleitet

Die Kurschlusschaltung misst also die Anzahl n der pro Zeit emittierten Elektronen.

c) In der offenen Schaltung werden **R** und **M** über ein Voltmeter verbunden.

Da das Voltmeter ($R = \infty$) keinen Strom leitet, heißt die Schaltung trotz Verbindung „offen“.

Die emittierten Elektronen gelangen von **M** nach **R** und bleiben dort „kleben“. Dadurch lädt sich **R** negativ und **M** positiv auf. Das wirkt der weiteren Aufladung entgegen.

Die Aufladung endet, wenn $U \cdot e = \frac{1}{2} m_e v_e^2$ gilt. Dann reicht der „Ablöseschwung“, also die anfängliche kinetische Energie, nicht mehr aus, das Gegenfeld zwischen **M** und **R** zu überwinden. Weil Kapazität C zwischen den „Kondensatorplatten“ **R** und **M** winzig ist, wird der Spannungsendwert selbst bei geringster Strahlungsintensität praktisch sofort erreicht.

Die offene Schaltung misst die kinetische Energie W_{kin} der emittierten Elektronen.

Die Hallwachs-Folgeexperimente lieferten folgende irritierenden Messergebnisse, welche mit der EM-Theorie des Lichtes unvereinbar waren. Nach dieser hängt die Energieübertragung des Lichtes nämlich *nur* von der Helligkeit, *nicht* aber von der Farbe ab.

Als *erstes* betrachten wir die die offene Schaltung, welche Information über die kinetische Energie W_{kin} der durch das Licht ausgelösten Elektronen liefert.

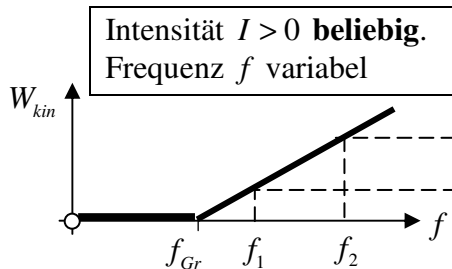


Abb.1) Unterhalb einer Grenzfrequenz f_{Gr} treten *keine* Elektronen aus. Ab f_{Gr} steigt W_{kin} linear mit f an. Der Spannungsendwert wird bei größerem I nur unmerklich schneller erreicht.

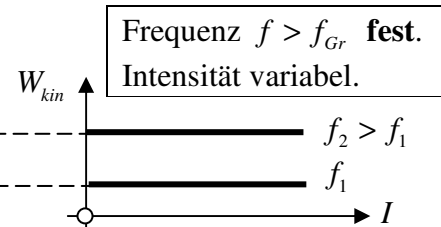


Abb.2). Für $f > f_{Gr}$ tritt Photoemission ein. Bei festem f ist W_{kin} *unabhängig* von I . Der Spannungsendwert wird bei größerem I nur unmerklich schneller erreicht. Die W_{kin} -Werte übertragen sich von Abb 1)

Als *zweites* betrachten wir die die Kurzschlusschaltung, welche Information über die Anzahl n der durch das Licht ausgelösten Elektronen liefert.

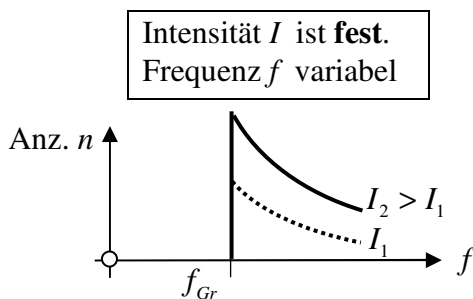


Abb.3) $f < f_{Gr}$ *keine* Emission. Für $f > f_{Gr}$ nimmt n mit f hyperbolisch ab. Für größeres I liegt die Hyperbel *höher*.

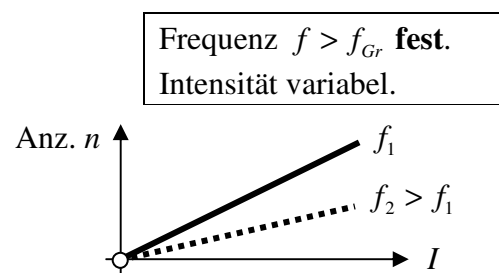
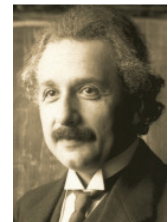


Abb.4) Ab $f > f_{Gr}$ Photoemission. Anz. n nimmt linear mit I zu. Für größeres f ist die Steigung der Gerade *geringer*.

Die Deutung der Ergebnisse des Hallwachs experimentes gelang dann Albert Einstein im Jahre 1905 durch Einführung des Photons als kleinst möglichem Schwingungsteilchen der elektromagnetischen Welle.



Aufgaben

- 1) Erläutere, was man unter „Strahlungsintensität“ versteht.
- 2) Wiederhole die Begründung dafür, dass die Strahlungsintensität der elektromagnetischen Welle nur von der Amplitude und nicht von der Frequenz abhängt.
- 3) Benenne die Entsprechungen von Amplitude und Frequenz beim Licht.
- 4) Benenne, wann man Sonnenbrand bekommt und wann nicht.
- 5) Erläutere das Phänomen der „Röntgenkante“ bei der Erzeugung von Röntgenlicht.
- 6) Stelle dar, was ein Schwarzer Strahler ist und wie es zur „UV- Katastrophe“ kommt.
- 7) a) Beschreibe das historische Hallwachs experiment und die ersten Ergebnisse.
b) Skizziere und beschreibe die Kurzschlusschaltung und die offene Schaltung. Benenne die jeweiligen Messgrößen und die daraus abgeleiteten Ergebnisgrößen.
c) Skizziere die vier Messkurven und benenne die Details.