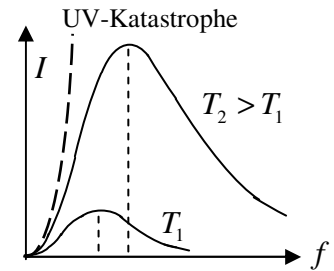


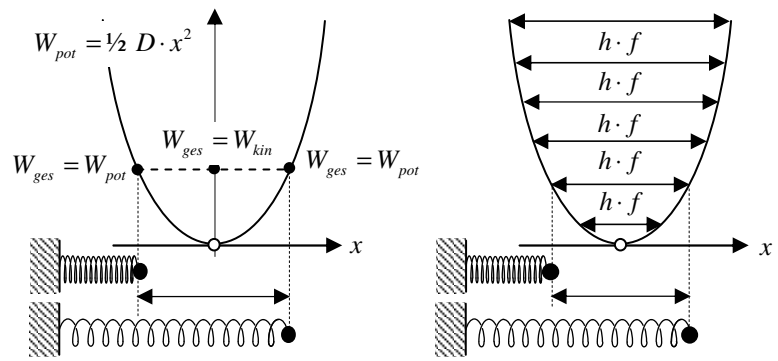
Die Quantentheorie **behebt** die Probleme des Lichtes als elektromagnetische Welle.

1) Max Planck: Der Schwarze Strahler und die „UV- Katastrophe“.

Der Schwarze Strahler wurde als „Neutrallampe“ zum Lampenvergleich entwickelt. Er besteht aus einer wärmeisolierten Box mit beheizter Innenwand. Je nach Temperatur wird dominant *eine* jeweilige Lichtfarbe durch ein kleines Loch abgestrahlt. Die Abb. zeigt die gemessene Frequenzverteilung für zwei Temperaturen. Die Praxis des Schwarzen Strahlers ist einfach, doch die Theorie führte zur sog. „UV-Katastrophe“, welche absolut unrealistisch ist. Im Inneren der Box stehen die schwingenden Atome der Wandung als atomare Sendeantennen mit den elektromagnetischen Wellen in Wechselwirkung. Beide konkurrieren um die Wärmeenergie, welche bei der Beheizung in die Box eingebracht wurde. Ist a der Wandabstand der kubischen Box, so können sich in jeder Raumrichtungen gemäß $f = n \cdot c / 2a$ unendlich viele stehende elektromagnetische Wellen mit gleicher Amplitude und gleichem Energieinhalt ausbilden. Da es aber nur endlich viele Atome in der Box gibt, bleibt für diese wegen der *Energiegleichverteilung* praktisch nichts übrig. „UV-Katastrophe“ sagt man, weil UV-Licht höherfrequent ist als blau in Richtung unendlich und die Frequenzen bis unendlich das Problem darstellen.



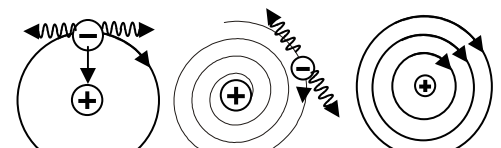
Max Planck hat das Problem gelöst und dabei „aus Versehen“ die Quantentheorie entdeckt. Planck wusste, dass EM-Wellen nur durch *Sendeantennen* zustande kommen. In diesem Fall sind es die schwingenden Atome. Als Modell für die Atomschwingung dient eine elastische Feder mit Federkonstante D und Masse m . Die Masse schwingt zwischen den Umkehrpunkten hin und her. Dort gilt $W_{ges} = W_{pot} = \frac{1}{2} D \cdot x_{max}^2$. Je größer die Gesamtenergie W_{ges} , desto größer die Schwingungsamplitude $x_{max} = \sqrt{2 \cdot W_{ges} / D}$. Mit dieser Formel werden *alle* Lichtfrequenzen $f \rightarrow \infty$ generiert.



Wenn der Oszillator jedoch diejenigen Bewegungen *unterlässt*, die zur Ausstrahlung der hohen Frequenzen führen, kann die experimentell gefundene Frequenzverteilung entstehen. Planck probierte und fand, dass nur solche Amplituden erlaubt sind, für welche die Gesamtenergie W_{ges} ein *ganzzahliges* Vielfaches der Schwingungsfrequenz $f = (1/2\pi) \cdot \sqrt{D/m}$ des Oszillators ist, multipliziert mit der neuen Naturkonstante $h = 6,62 \cdot 10^{-34} Js$. ($h =$ Plancksches Wirkungsquantum).

Es muss also $W_{ges} = n \cdot h \cdot f$ gelten. In der normalen Vorstellung ist es absurd, dass eine Spiralfeder *verbotene* Auszugslängen haben könnte. Desweiteren: Die eigentliche Bewegung ist gar nicht die Schwingung selbst, sondern der Sprung über die verbotenen Amplituden hinweg. Und dabei wird immer der *gleiche* Energiewert $\Delta W = (n+1) \cdot h \cdot f - n \cdot h \cdot f = h \cdot f$ abgegeben bzw. aufgenommen. Damit reduziert sich der Energieaustausch zwischen den schwingenden Atomen und der EM-Welle auf *eine einzige* Einheit, nämlich $\Delta W = h \cdot f$. Dieser spärliche Austausch „füttert“ die hohen Frequenzen so wenig, dass die „UV-Katastrophe“ ausbleibt. Doch die Begründung fehlte.

Außer der „UV-Katastrophe“ gibt es auch noch die „**Atomkatastrophe**“: Das umlaufende Elektron erfährt permanente Radialbeschleunigung und strahlt daher fortwährend EM-Wellen ab. Dadurch verliert das Atom an Energie und das Elektron stürzt in den Kern. Doch so ist es nicht: Wie beim Oszillator sind fast alle Bahnen verboten (Bohrsches Atommodell), nur eine abzählbare Anzahl ist erlaubt. Auch hier spielt das *Plancksche Wirkungsquantum* die Schlüsselrolle. Eine Erklärung für die extreme Einschränkung der Bewegungsfreiheit konnte auch hier zunächst nicht gegeben werden.



Das Elektron müsste abstürzen, tut es aber nicht.

Das Elektron müsste abstürzen, tut es aber nicht. Oszillator sind fast alle Bahnen verboten (Bohrsches Atommodell), nur eine abzählbare Anzahl ist erlaubt. Auch hier spielt das *Plancksche Wirkungsquantum* die Schlüsselrolle. Eine Erklärung für die extreme Einschränkung der Bewegungsfreiheit konnte auch hier zunächst nicht gegeben werden.

2) Albert Einstein: Das Hallwachs-Experiment und der Lichtelektrische Effekt.

Beim ersten Hallwachs-Experiment wurde die *Photoemission* entdeckt. Beleuchtet man eine negativ geladene Zinkplatte mit UV-Licht, so entlädt sich die Platte, die Elektronen werden in den Luftraum abgegeben. Bei positiver Aufladung unterbleibt die Entladung, ebenso, wenn der UV-Anteil des Lichtes weggefiltert wird. In weiteren Experimenten zum Lichtelektrische Effekt wurden systematisch alle Zusammenhänge zwischen den vier vorkommenden Variablen untersucht. Beim Licht sind das die Frequenz f (Farbe) und die Intensität I (Helligkeit), bei den Elektronen sind es deren Anzahl n und deren kinetische Energie W_{kin} . Die Ermittlung der Anzahl n der emittierten Elektronen erfolgt mit einer evakuierten Fotozelle in Kurzschlusschaltung. Die Ermittlung der kinetischen Energie der emittierten Elektronen erfolgt mit einer evakuierten Fotozelle in offener Schaltung. Die Ergebnisse waren verwirrend. Albert Einstein hat alle Rätsel durch eine einzige einfache Annahme gelöst, nämlich durch die sog. *Lichtquantenhypothese*.

Einstein kannte die Arbeiten von Planck. Die UV-Katastrophe bleibt nur aus, wenn die Schwingungsenergien W des mechanischen Oszillator (mit Schwingungsfrequenz $f = (1/2\pi) \cdot \sqrt{D/m}$) *ausschließlich* die Werte $W_n = n \cdot h \cdot f$ annehmen. Dann gibt es qualitativ nur *eine* einzige Bewegung, nämlich den Sprung über die verbotenen Amplituden mit der Energieänderung $W_n \rightarrow W_{n+1}$ (oder umgekehrt). Die EM-Wellen im Schwarzen Strahler bekommen so von den Oszillatoren *nur* die Energieportion $\Delta W = h \cdot f$. Die EM-Wellen mit großem f werden dann kaum mehr versorgt.

Einstein übertrug diesen Gedanken auf das Licht. Das Ziel war jetzt nicht, eine „Katastrophe“ zu vermeiden, sondern die Hallwachs-Ergebnisse verständlich zu machen.

Die Übertragung war möglich, weil das elektromagnetische Feld, so wie das Atom des Schwarzen Strahlers, *auch* zu harmonischen (sinusförmig) Schwingungen fähig ist. Bei den Atomen schwingen mechanische Oszillatoren, beim elektromagnetischen Feld schwingt die elektrische und magnetische Feldstärke als EM-Welle. Einsteins Ansatz: Wie beim Oszillator sind auch bei der EM-Welle die meisten Amplituden *verboten* und die Energieaufnahme bzw. -abgabe erfolgt ebenfalls *nur* beim *Überspringen* der *verbotenen* Amplituden jeweils mit dem Wert $\Delta W = h \cdot f$.

Dabei ist f *jetzt* die Frequenz des elektromagnetischen „Oszillators“, also die Frequenz der elektromagnetischen Welle. Der mechanische Oszillator verliert (oder gewinnt) Energie beim Amplitudensprung, denn die abgestrahlte EM-Welle ist etwas *anderes* als er selbst. Die EM-Welle hingegen strahlt beim Amplitudensprung dasjenige ab, was sie selber ist, nämlich auch eine EM-Welle. Deshalb „zerbrösel“ die EM-Welle durch permanente Amplitudensprünge mit der jeweiligen Energie $\Delta W = h \cdot f$ in lauter Energieportionen $W_{ph} = h \cdot f$. Diese Portionen nennt man „Photonen“. Weil das elektromagnetische Feld nicht ortsfest ist, „fliegen“ die Photonen mit Lichtgeschwindigkeit hin und her. Nach Einsteins Formel $W = m \cdot c^2$ besitzen die Photonen sogar eine *Masse*. Diese ergibt sich aus der Gleichung $m \cdot c^2 = h \cdot f$ zu $m_{ph} = h \cdot f / c^2$. Ja, die Photonen können obendrein *Stöße* ausführen, denn sie besitzen wegen ihrer Lichtgeschwindigkeit sogar einen Impuls. Er beträgt $p = m \cdot v = m_{ph} \cdot c$. Das Photon erscheint also *einerseits* ein Teilchen, weil es Stöße ausführen kann und auf der Fotoplatte tatsächlich als *ein einzelner* Schwärzungspunkt in Erscheinung tritt. Aber *andererseits* hat diese „Teilchen“ *keine Identität*, denn es ist als Amplitudensprung = Quantensprung mit allen anderen Photonen desselben Lichtstromes *identisch* und von diesen *ununterscheidbar*. Selbst wenn bei fast vollständiger Dunkelheit momentan kein weiteres Photon vorhanden ist, so ist das eine Photon doch ein Quantensprung = Quantenteilchen der *gesamten*, gerade nicht weiter angeregten elektromagnetischen Welle, welcher es entstammt. Daher hat das Photon zwar *individuelle* Eigenschaften, aber mehrnoch die *kollektive* Eigenschaft des *gesamten* Lichtstromes, nämlich dessen *Frequenz*. Das zeigt sich besonders deutlich an der Energieformel $W_{ph} = h \cdot f$, welche die Frequenz der *gesamten* Lichtwelle enthält. Fällt ein Lichtstrahl der Frequenz f während der Dauer Δt mit der Intensität I auf die Fläche ΔA , so prasseln wegen $n \cdot h \cdot f = W = I \cdot \Delta t \cdot \Delta A$ insgesamt $n = I \cdot \Delta t \cdot \Delta A / h \cdot f$ Photonen auf die Fläche. Bei *gleicher* Intensität ist die Anzahl n der Photonen also *antiproportional* zur Frequenz f .

Die Sonne bestrahlt die Erdatmosphäre mit der Intensität $I = 1367 \text{ Watt/m}^2$. Wäre das Sonnenlicht komplett grün mit $f = 5,6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, so würden pro Sekunde und Quadratmeter $n = 3,68 \cdot 10^{21}$ Photonen auf die Erde prasseln. Rechne dies nach!

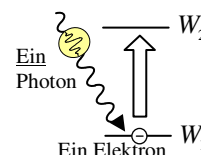
Das Photon hat zwar eine Masse, doch ein Volumen kann man ihm seiner Natur nach nicht zuschreiben. Wir müssen es als punktförmig ansehen. Das Elektron ist auch fast punktförmig. Daher ist auch das sog. **Eins-zu-Eins-Prinzip** von Einstein nachvollziehbar. Es besagt, dass ein Photon seine Energie stets nur auf *genau ein* Elektron übertragen kann. Damit werden alle Hallwachs-Experimente verständlich.

Aufgabe 1: Erkläre alle Hallwachs-Experimente.

Hilfe:

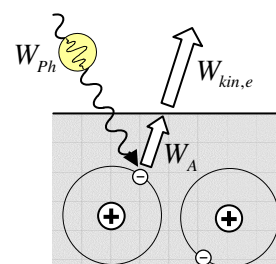
Beim Photoeffekt gilt das **Eins zu Eins-Prinzip**:

Ein Photon kann seine Energie *nur* auf ein *einzelnes* Elektron übertragen. Dabei wird vollständig absorbiert. Das Photon kann sich *nicht teilen*.



Licht der Frequenz f besteht aus Photonen der Energie $W_{ph} = h \cdot f$.

Fällt ein Photon auf ein Elektron, so überträgt es seine Energie vollständig auf dieses und hört damit auf zu existieren. Je nach dem Wert von W_{ph} springt das Elektron auf eine höhere Schale oder es verlässt das Metall und tritt an die Oberfläche. Ist W_{ph} sogar größer als die Ablösearbeit W_A , so steht die restliche Energie als kinetische Energie zur Verfügung.



Daraus folgt die Bilanzgleichung $W_{ph} = W_A + W_{kin,e}$. Umstellen ergibt $W_{kin,e} = h \cdot f - W_A$.

Das ergibt im Diagramm mit f auf der x -Achse und W_{kin} auf der y -Achse eine Geradengleichung mit dem y -Achsenabschnitt $-W_A$ und der Steigung h . Erkläre dies!

Aufgabe 2: Erkläre die Röntgenkante.

Hilfe:

Die Maximalfrequenz der Röntgenstrahlung ist direkt proportional zum Wert der Beschleunigungsspannung U . Es gilt $f_{max} = e \cdot U / h$. Erkläre dies!

Aufgabe 3: Erkläre den Strahlungsdruck.

Hilfe:

Druck ist Kraft durch Fläche, also $\text{Druck} = F / \Delta A$.

Kraft ist Masse mal Beschleunigung. Beschleunigung ist Geschwindigkeitsänderung pro Zeit.

Weil Impuls = Masse mal Geschwindigkeit ist, ist Kraft = Impulsänderung pro Zeit.

Also $F = \Delta p / \Delta t$. Damit haben wir $\text{Druck} = \text{Impulsänderung pro Zeit und Fläche}$.

Also $\text{Druck} = \Delta p / \Delta t \cdot \Delta A$. Die Impulsänderung Δp wird durch die Photonen geliefert.

Jedes von ihnen überträgt den Impuls $m \cdot c = \frac{h \cdot f}{c} \cdot c = \frac{h \cdot f}{c}$.

Frage: Wieviele „grüne“ Photonen braucht man pro Sekunde für einen Druck von $1 \mu\text{Pa} = 1 \text{ mikroPascal}$?

