

Planck Strahlungsgesetze

1900 existiert umfangreiches und sehr genaues Faktenmaterial zu den Spektren vor

- Linienspektrum, z. B. Natrium- und Quecksilberdampfampe
- Temperatur-Strahlung (Kontinuum, z. B. Glühlampe) vor, physikalisch „Schwarzer Körper“

Grundgesetz der Kontinuum-Strahlung:

thermisches Gleichgewicht: Emission = Absorption (Reemission)

Absorptionskoeffizient (Albedo = Weltraumphotographie) ist dabei zu berücksichtigen

Schwarzer Körper besitzt ideale Verhältnisse. Er ist großes aufheizbares Gehäuse, innen gründlich mit Ruß geschwärzt, nur an einer Seite ein kleines Loch, wo Strahlung ein- und austreten kann. Innen wird alle eintretende Strahlung absorbiert, Absorptionskoeffizient = 1. Je nach der Temperatur des Strahlers unterschiedliche Spektren, mathematische Beschreibung zeigte sich als sehr schwierig.

1. für die Gesamt-Energie gilt **Stefan-Boltzmann** Gesetz 1879

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad \text{mit der Stefan-Boltzmann-Strahlungs-Konstante } \sigma = 5,67 \dots \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}.$$

2. Für langwelligen, roten Bereich: **Wien**sches Gesetz 1896

$$F(\nu, T) = 2 \cdot \nu^3 \cdot e^{-\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}} \cdot \frac{1}{c^2}$$

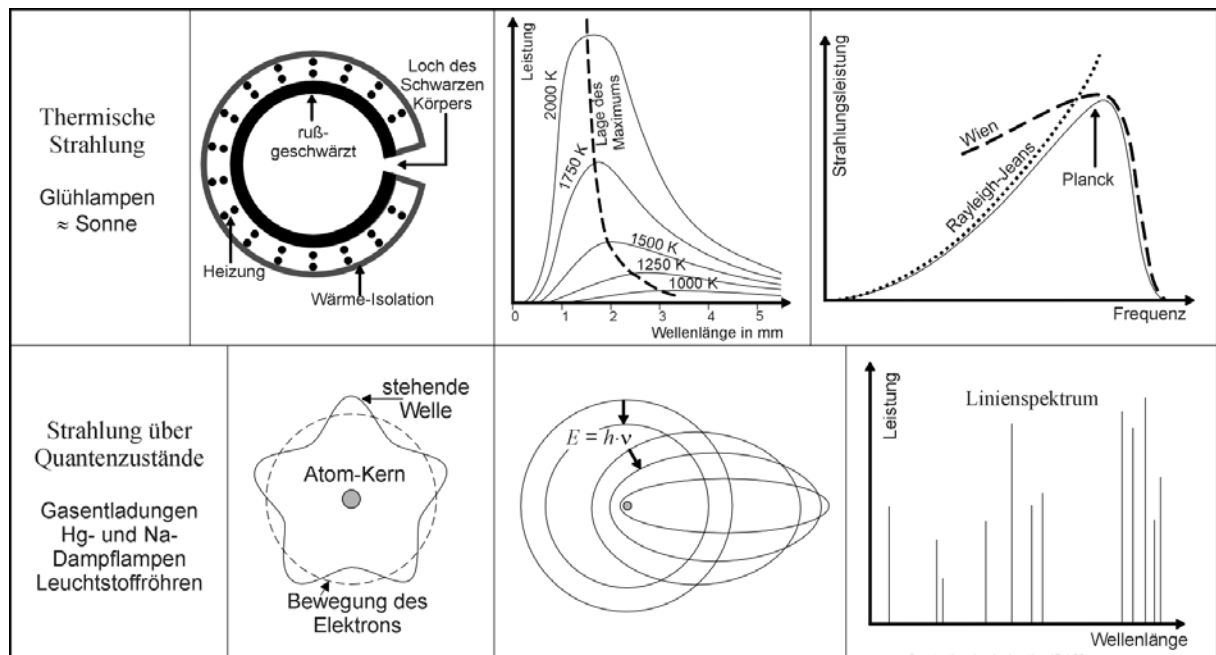
3. Für hohe Frequenzen, kurze Wellenlängen (blau, UV): **Rayleigh-Jean** Gesetz 1900:

$$F(\nu, T) = 2 \cdot k \cdot \nu^2 \cdot T / c^2 \quad \text{mit Boltzmann-Konstante } k = 1,38 \dots \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

4. Planck vollständige Beschreibung, trug 14.12.1900 in der Physikalischer Gesellschaft Berlin vor

$$F(\nu, T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot E \cdot \nu^2}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{E}{k \cdot T}}} \quad \text{mit Planck-Konstante } h = 6,626 \dots \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Energie kann also nur diskrete Stufen gemäß $E = h \cdot \nu \Rightarrow$ Quanten annehmen, ursprünglich zur Abgrenzung gegen Korpuskeln gewählt



Beispiel: Spannung einer Photozelle hängt nur von kürzester Wellenlänge nicht von der Lichtintensität ab!

Heisenberg Matrizenmechanik

Mai 1925 hat Werner Heisenberg Heisenberg (1901 - 1976) Heuschnupfen, lässt sich von Nils Bohr beurlauben, fährt nach Helgoland.

Beschäftigt sich mit Spektren:

Observable (beobachtbare Größen) üblich Zahlen werden durch Zahlenanordnungen ersetzt.

Formale Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Experimenten überein.

Nils Bohr (1885 - 1962) erkennt darin das Rechnen mit Matrizen.

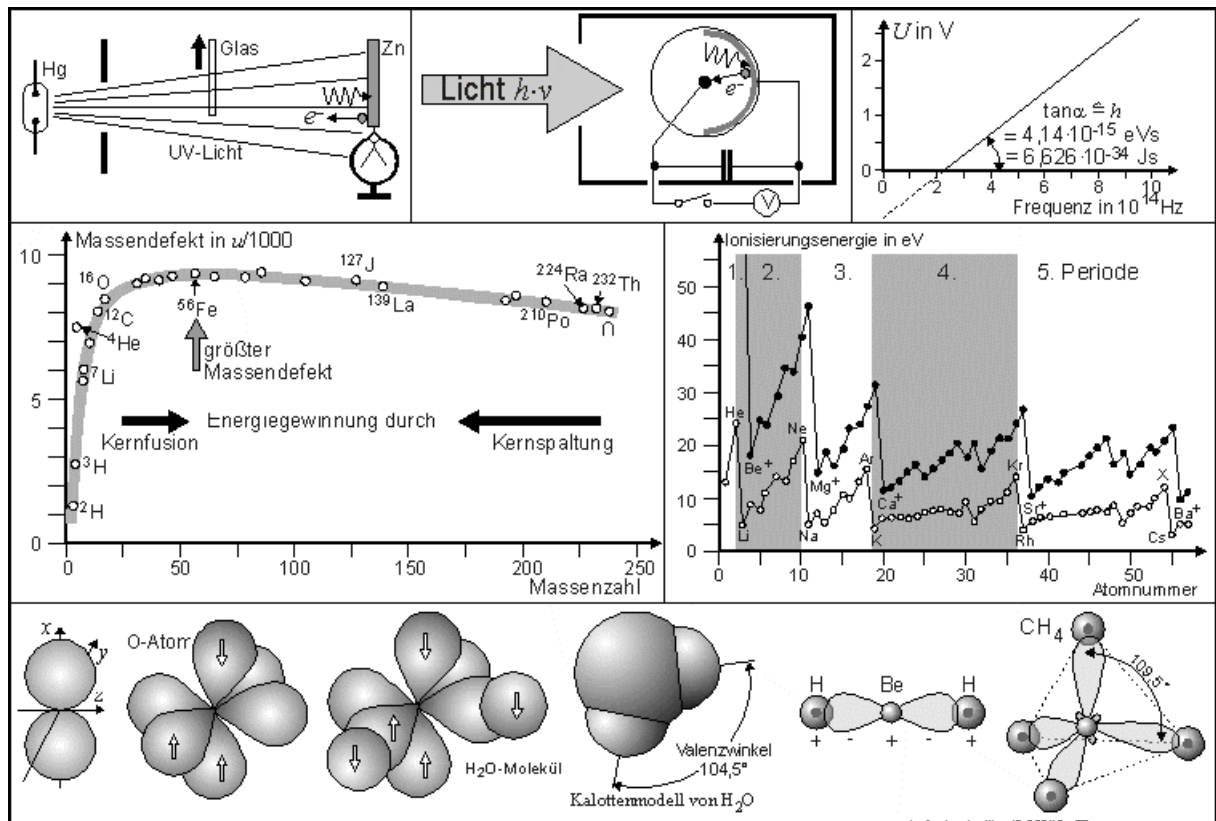
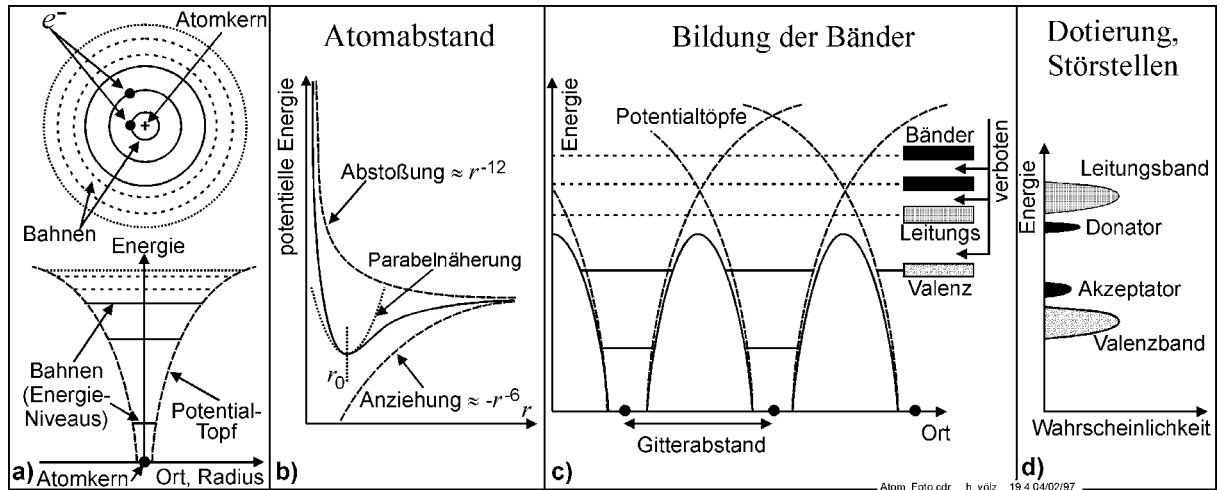
Es gilt nicht mehr das kommutative Gesetz: $a \cdot b = b \cdot a$, sondern $a \cdot b - b \cdot a = \Delta \epsilon$.

Führt zur Heisenberg-Unschärfe $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$

Born und Pascual Jordan (1902 - 1980) bauen Matrizenmechanik aus

Pauli berechnet auf dieser Basis das Wasserstoffspektrum exakt

1926 Heisenberg-Unschärfe: $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2 \cdot \pi$.



de Broglie Materiewellen

1923 de Broglie Hypothese Materie-Wellen: Aus $E = m \cdot c^2$ folgt $\lambda = h/m \cdot v$.

1927 wird zufällig von Clinton Davisson (1881 - 1958) und Lester Germer (1896 - 1971) durch Beugungen von Elektronen und Atomen an Kristallen gefunden

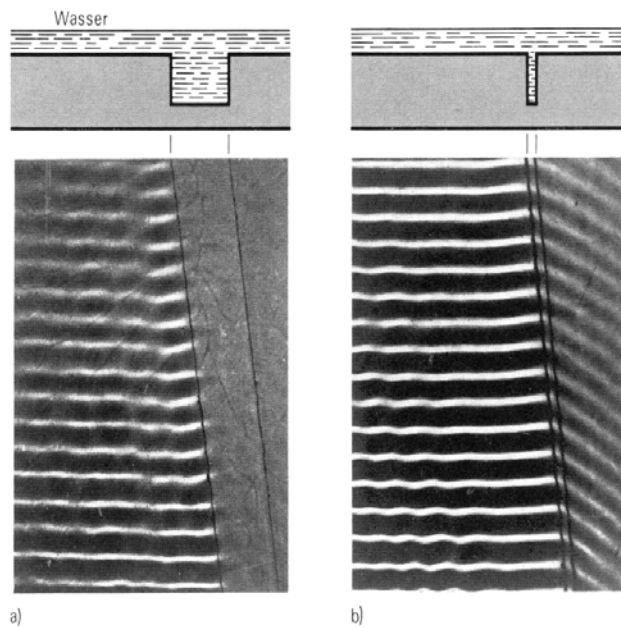
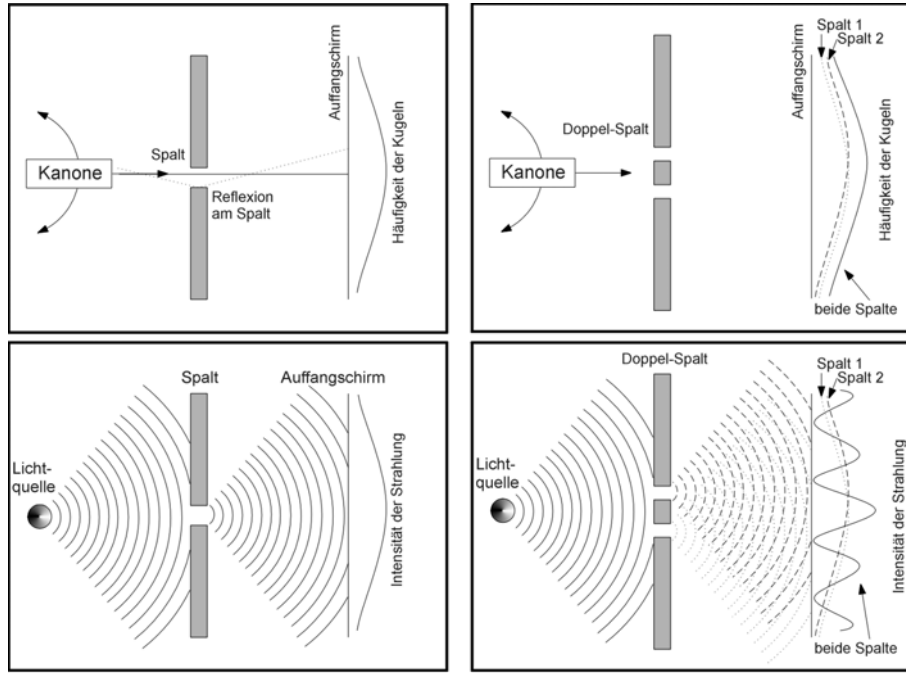
Also: kontinuierliche Strahlung aus diskreten Energie-Quanten und diskrete Teilchen kontinuierliche Wellennatur:

Jedes bewegtes Teilchen ist auch Welle, jede Welle auch Teilchen

Nicht Welle oder Teilchen sondern sowohl Welle als auch Teilchen = kontinuierlich und diskret.

Nils Bohr entwickelt hieraus Komplementaritätsprinzip (Korrespondenzprinzip):

Klassische Physik und „Neue Physik“ verhalten sich analog. So ist Erraten der Quantengesetze möglich,



Beispiel:

klassische Schwingung = Grundwelle und Oberwelle ⇒
 Auswahlregeln für Atomzustände = Übergänge zwischen stabilen Bahnen der Atome.
 Jede Bahn bedeutet einen Energiezustand des Atoms
 Quantenzahlen ganzzahlige Vielfache, die sich für den Umlauf einpassen müssen
Folge Elektronenmikroskop: Lichtwellenlänge ca. $6 \cdot 10^{-7}$ m, Elektronen mit 50 kV ca. $5 \cdot 10^{-12}$ m.

Schrödinger-Gleichung

Einstein weist Erwin Schrödinger (1887 - 1961) auf de Broglies Materiewellen hin.
 entwickelt Differentialgleichung mit Zustandsfunktion; Weiterentwicklung der klassischen Wellengleichung.

$$\nabla\psi = (W - U) \cdot \psi \cdot \frac{2 \cdot m}{h^2}$$

W die Gesamtenergie, U die potentielle Energie, ψ die Wellenfunktion und ∇ den Operator der zweifachen partiellen Ableitung nach den Raum-Koordinanten.

So entsteht gleichwertige Lösung. Daher erneuter Widerstreit kontinuierlich \Leftrightarrow diskret
1927 Born: Wellenfunktion bestimmt die Bewegung der Teilchen und das Betrags-Quadrat der Zustandsfunktion ist Aufenthalts-**Wahrscheinlichkeit** im Volumen V .

$$dW = |\psi|^2 \cdot dV$$

Unser Alltag ist so die wahrscheinlichste aller Welten.

Erklärung des Doppelspalt für Elektronen, Tunneleffektes, der Supraleitung usw.

Statt Elektronenbahnen dann Orbitale für Elektronen (Konsequenzen für Chemie)

Pauli-Statistik, -Verbot = Quantenzahlen: Hauptquantenzahl, Bahnimpuls, Magnet-Quantenzahl, Spinquantenzahl. In einem Atom darf es keine zwei gleichen Zustände geben. Kristall -> Bändermodell: Halbleitertechnik.

Offen: heute zumindest relativistische Quantenmechanik.

Paradoxa zur Quantentheorie

- Als der sechzehnjährige Max Planck sich nach seinem Abitur 1874 mit der Frage an den Physiker Philipp von Jolly wandte, ob er **Physik studieren** sollte, erhielt er den Rat (Barrow: Theorien für alles S. 15.):
„Studieren Sie ja nicht Physik. Das ist doch ein Gebiet, in dem alles Wesentliche erforscht ist, nur einige unbedeutende Lücken sind noch zu füllen“
- 1905 entwickelt Einstein die Idee der **Lichtquanten** als materielle Teilchen (Photonen). Planck kreidet ihm das in seiner Laudatio zur Berufung in die Akademie der Wissenschaften als Jugendsünde an.
- **Einstein und Gott:** Bis an sein Lebensende schwor Einstein auf den Determinismus in der Physik. Er konnte sich nicht an die Zufallseigenschaften der Quantentheorie gewöhnen. Seine Abneigung gegen den probabilistischen Charakter der Theorie kommt in seiner Antwort auf einen Brief von Max Born aus dem Jahre 1926 zum Ausdruck:
„Die Quantenmechanik ist sehr achtung-gebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, daß das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der nicht würfelt.“

An anderer Stelle sagt er:

„Ich will wissen, wie Gott diese Welt erschaffen hat. Ich bin nicht an dieser oder Erscheinung interessiert, am Spektrum dieses oder jenes Element. Ich möchte Seine Gedanken kennen, das übrige sind Details.

Was mich wirklich interessiert ist, ob Gott bei der Erschaffung der Welt eine Wahl hatte.“

Die Wendung „der **wahre Jakob**, d. h. nicht das Richtige, Echte, Wahre“ bezieht sich auf den Anspruch des spanischen Ortes San Jago di Compostella (= Giacomo Postolo = Jakobus Apostel). Er will die Gebeine des heiligen Jakob d. Ä. zu besitzen, der hier den Märtyrertod erlitten haben soll. Ansprüche anderer Orte und Kirchen wurden zurückgewiesen. So wurde nach Jerusalem und Rom San Jago di Compostella im Mittelalter zum berühmtesten Wallfahrtsort. 1161 wurde ein Ritterorden (bis 1835) gleichen Namens zum Schutze der Pilger gegründet. Sie nannten sich bald Jakobsbrüder und sangen eigene Wallfahrtslieder «auf sant jacobs strassen». Der Name der sozialdemokratischen satirischen Zeitschrift „Der wahre Jakob“ (1884 bis 1933) wurde als Kontrast zu der geflügelten Wendung gewählt.



Hinweise

- Die Quantentheorie ist im Prinzip als Theorie eines begrenzten Wissens konzipiert. es gibt nur noch Wahrscheinlichkeitsaussagen. Dennoch ist sie in vieler Hinsicht **sehr genau**: So sind z. B. die stabilen Energiezustände von Atomen und Molekülen sehr genau berechenbar.
- Im anschaulichen Sinn gibt es zwar keine Schalen um den Kern, auf denen sich Elektronen bewegen – in einen abstrakten Sinn und auf Mittelwerte bezogen, besteht jedoch eine Analogie zum Schalenaufbau.
- Maxwell und Boltzmann setzen die **kausalen Gesetze an die Spitze** und leiten aus ihnen Durchschnittswerte ab. Die **Quantentheorie** tut das Gegenteil: Die Grundaussagen sind Durchschnittswerte und die **Einzelwerte** sind dann bei Aufsummierung wieder kausalartig.

Geschichte Quantentheorie

- 1896 Becquerel entdeckt daß Uranerze Foto-Platten schwärzen, Radioaktivität
- 1898 28.12. Ehepaar Curie gibt Entdeckung der Radioaktivität von Radium bekannt
- 1899 Max Karl Ernst Ludwig Planck (Deutschland) entdeckt Plancksches Wirkungsquantum
- 1900 14.12. Planck stellt in Berlin seine Theorie zur Schwarzer Körper-Strahlung vor
- 1902 Philipp Eduard Anton Lenard (Deutschland): Energie der Photoelektronen
- 1905 A. Einstein Lichthypothese: Lichtquanten = Photonen und Energie-Masse $E = m \cdot c^2$
- 1911 Atommodell von Rutherford: Elektronen-Hülle und Kern
- 1912 M. v. Laue: Beugung u. Interferenz von Röntgenstrahlen an Kristallgittern
- 1913 Nils Bohr (1885 - 1962): Planetenmodell der Atome, Sprung = Licht, erklärt Spektren
- 1914 Moseley: Röntgenstrahlen = Übergänge inneren Schalen
- 1915 Arnold Sommerfeld (1868 - 1951) elliptische Elektronenbahnen vermutet
- 1915 Umwandlung von Wasserstoff in Helium erwogen
- 1916 Funktion des Elektrons bei der chemischen Bindung untersucht
- 1922 Bohr: Physikalische Theorie der Periodensystems
- 1922 Compton führt den Begriff Photon ein
- 1924 Louis de Broglie (1892 - 1981) verteidigt Dissertation (1923) Materie-Wellen $\lambda = h/m \cdot v$ an der Sorbone
- 1925 Werner Heisenberg (1901 - 1975) Heuschnupfen, Helgoland: entwickelt dort Matrizenmechanik
- 1925 Pauli formuliert, daß nach ihm benannte Verbot
- 1925 Gravitationsrotverschiebung wird festgestellt
- 1926 Brief Einstein an Born „Gott würfelt nicht“
- 1926 Februar: Heisenberg formuliert seine Unschärfe-Relation $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2 \cdot \pi$
- 1926 Fermi und Dirac entwickeln Quantenstatistik der Teilchen
- 1926 Schrödinger formuliert Quantentheorie, Wellengleichung
- 1927 C. Davisson, L. Germer bestätigen bei Röntgenuntersuchungen an Kristallen Materiewellen
- 1927 Chemische Bindung mit Hilfe der Quantenmechanik erklärt
- 1927 Born definiert die Aufenthaltswahrscheinlichkeit bei der Schrödinger-Gleichung
- 1927 Beugung von Elektronen entdeckt
- 1938 22.12. Otto Hahn spaltet den Uran-Kern