

## Ursprünge der Quantentheorie

Die nachfolgende Grafik zeigt einen historischen Abriss der für die Entwicklung der Quantentheorie wegweisenden Experimente und Theorien.

- 1881 Michelson erhält ein Null-Ergebnis für die Absolutbewegung der Erde.
- 1884 Balmer findet eine empirische Formel für einige Spektrallinien des Wasserstoffatoms.
- 1887 Hertz gelingt der Nachweis von elektromagnetischen Wellen, er bestätigt damit die maxwellsche Theorie und entdeckt den Photoeffekt.
- 1887 Michelson wiederholt sein Experiment zusammen mit Morley und erhält wieder ein Null-Ergebnis.
- 1895 Röntgen entdeckt die nach ihm benannte Röntgenstrahlung.
- 1896 Becquerel entdeckt die Radioaktivität.
- 1897 J.J. Thomson bestimmt  $\frac{e}{m_e}$  für Kathodenstrahlen und zeigt, dass Elektronen Bausteine von Atomen sind.
- 1900 Planck erklärt die Hohlraumstrahlung unter Annahme der Energiequantisierung.
- 1900 Lenard untersucht den Photoeffekt und stellt fest, dass die Energie der Elektronen unabhängig von der Lichtintensität ist.
- 1905 Einstein stellt seine spezielle Relativitätstheorie auf.
- 1905 Einstein erklärt den Photoeffekt unter Annahme der Quantisierung des Lichtes.
- 1907 Einstein wendet die Energiequantisierung an, um die Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazitäten von Festkörpern zu erklären.
- 1908 Rydberg und Ritz verallgemeinern Balmers Formel.
- 1909 Millikans Tröpfchenexperiment beweist die Quantisierung der elektrischen Ladung.
- 1911 Rutherford beweist die Existenz von Kernen in Atomen durch Streuexperimente mit  $\alpha$ -Teilchen.
- 1912 Friedrich, Knipping und von Laue beobachten Beugungseffekte von Röntgenstrahlung an Kristallen.
- 1913 Bohr stellt sein Modell des Wasserstoffatoms vor.
- 1914 Mosley analysiert die Röntgenspektren von Atomen.
- 1914 Franck und Hertz gelingt der experimentelle Nachweis der Energiequantisierung in Atomen.
- 1915 Duane und Hunt zeigen, dass die Grenzwellenlänge des Röntgenspektrums durch die Quantentheorie bestimmt ist.
- 1916 Wilson und Sommerfeld schlagen Quantisierungsbedingungen für ein erweitertes bohrsches Atommodell vor.
- 1916 Millikan bestätigt im Experiment Einsteins Gleichung für den Photoeffekt.
- 1923 Compton beschreibt die Streuung von Röntgenstrahlung an Atomen durch einen Stossprozess eines Photons mit einem Elektron und verifiziert seine Ergebnisse experimentell.
- 1924 De Broglie stellt die Hypothese vom Wellencharakter des Elektrons auf und gibt für das Elektron eine Wellenlänge von  $\frac{h}{p}$  an.
- 1925 Schrödinger entwickelt die Quantenmechanik.
- 1925 Heisenberg entwickelt die Matrizenmechanik.
- 1925 Pauli formuliert das nach ihm benannte Pauli-Verbot.
- 1927 Heisenberg entwickelt die Unschärferelation.
- 1927 Davisson und Germer beobachten die Beugung von Elektronen an einem Einkristall.
- 1927 G.P. Thomson beobachtet Beugung von Elektronen an Metallfolien.

- 1928 Gamow, Condon und Gurney wenden die Quantenmechanik auf den  $\alpha$ -Zerfall an.
- 1928 Dirac entwickelt die relativistische Quantenmechanik und sagt die Existenz des Positrons voraus.
- 1932 Chadwick entdeckt das Neutron.
- 1932 Anderson entdeckt das Positron.

Wie man sieht, ist die Formulierung der Quantenmechanik das Ergebnis der Beiträge vieler einzelner Wissenschaftler – ganz im Gegensatz zur Relativitätstheorie, die mit dem Namen eines einzigen Wissenschaftler, Albert Einstein, verbunden ist. Viele Entdeckungen schienen zunächst nichts miteinander zu tun zu haben, bis sich gegen Ende der zwanziger Jahre eine in sich geschlossene Theorie abzeichnete.

Heute bildet die Quantenmechanik die Grundlage für das Verständnis der gesamten mikroskopischen Physik.

Die Ursprünge der Quantentheorie liegen nicht etwa in der Entdeckung der Radioaktivität, der Röntgenstrahlung oder der Atomspektren, sondern in der **Thermodynamik**.

Bei dem Versuch, das Strahlungsspektrum eines schwarzen Körpers theoretisch zu beschreiben, sah sich Max Planck zu einer – wie sich bald zeigen sollte – folgenschweren Annahme gezwungen.

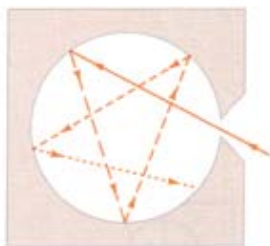
Danach wird die Strahlungsenergie nicht mehr als eine kontinuierliche Größe behandelt. Sie wird statt dessen in kleinen Paketen, den sog. Quanten, emittiert und absorbiert. Dass diese **Quantisierung** der Strahlungsenergie nicht nur ein Rechenrick ist, sondern eine wichtige und generelle Eigenschaft von Strahlung darstellt, erkannte zuerst Einstein bei seiner Deutung des Photoeffekts.

### Strahlung des schwarzen Körpers und das plancksche Wirkungsquantum

Am Ende des 19. Jahrhunderts war die Spektralverteilung der Strahlung eines schwarzen Körpers eines der rätselhaftesten physikalischen Phänomene.

Ein schwarzer Körper ist im Idealfall ein System, das die gesamte einfallende Strahlung absorbiert.

Eine gute experimentelle Realisierung eines solchen Körpers ist der nachfolgend gezeigte Hohlraum mit einer sehr kleinen Öffnung. Man spricht daher häufig von der Hohlraumstrahlung.

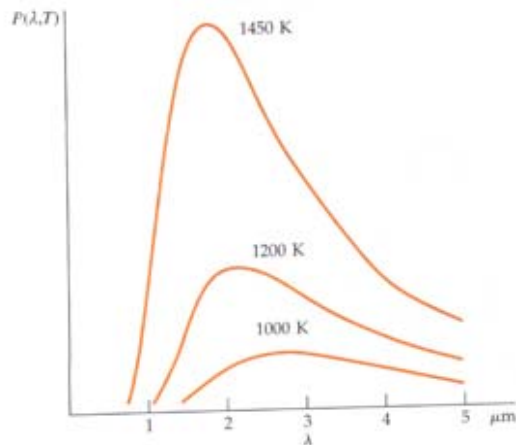


35.1 Experimentelle Realisierung eines schwarzen Körpers. Die durch die kleine Öffnung einfallende Strahlung wird an den Wänden reflektiert und nahezu vollständig absorbiert. Die Wahrscheinlichkeit für ein Entweichen durch die Öffnung ist sehr gering.

In dem Hohlraum befindet sich die Strahlung im thermischen Gleichgewicht mit den Wänden, die die Strahlung ständig emittieren und absorbieren. Durch das Loch kann die Strahlung eintreten und natürlich auch austreten. Die Wände werden auf einer gleichmäßigen Temperatur gehalten, die sich variieren lässt. Die Eigenschaften der Strahlung hängen nur von der Temperatur der Wände ab.

Bei Temperaturen unterhalb von  $600^{\circ}\text{C}$  ist die thermische Strahlung eines schwarzen Körpers nicht sichtbar, da ein Großteil der Energie über den infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums verteilt ist. Wird der Körper über diese Temperaturen hinaus erhitzt, so steigt die von ihm abgestrahlte Energie nach dem **Stefan-Boltzmann-Gesetz**, die **Strahlungsleistung ist direkt proportional der 4. Potenz der Temperatur**, an, und ihr Strahlungsmaximum verschiebt sich zu kleineren Wellenlängen.

Zwischen  $600^{\circ}\text{C}$  und  $700^{\circ}\text{C}$  liegt hinreichend viel Energie im sichtbaren Spektrum, um den Körper dunkelrot erscheinen zu lassen.



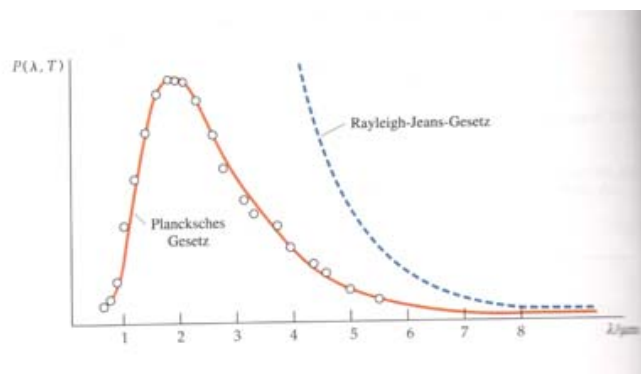
Wir nennen diese Kurven auch Spektralverteilung.

Somit stellt die Strahlungsleistung eine funktionale Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Temperatur dar.

Die Spektralfunktion lässt sich innerhalb der klassischen Thermodynamik ohne großen Aufwand bestimmen. Das Ergebnis ist das **Rayleigh-Jeans-Gesetz**:

$$P(\lambda, T) = \frac{8\pi \cdot k_B T}{\lambda^4}.$$

35.3 Spektralverteilung der Hohlraumstrahlung für eine Temperatur von  $1600\text{ K}$ . Die Berechnung der Spektralverteilungsfunktion in der klassischen Theorie ergibt das Rayleigh-Jeans-Gesetz, das mit den experimentellen Daten nur im Bereich großer Wellenlängen übereinstimmt.



Vergleicht man diese Funktion mit der experimentell gewonnenen Verteilung, so stellt man fest: eine gute Übereinstimmung gibt es nur im Bereich großer Wellenlängen.

Im Jahre **1900** gelang **Max Planck** die Herleitung einer Verteilungsfunktion, die mit den experimentellen Daten im gesamten Wellenlängenbereich übereinstimmt. Dazu war allerdings eine merkwürdige Änderung in der klassischen Berechnung notwendig.

Planck suchte bei seiner Herleitung der Verteilungsfunktion, die die experimentellen Daten richtig wiedergibt, nach einer **Korrekturmöglichkeit** in der klassischen Berechnung. Diese Suche war von Erfolg gekrönt, als er sich entschloss, die Energie des schwarzen Körpers nicht als eine kontinuierliche Größe zu betrachten, sondern anzunehmen, dass sie in kleinen, diskreten Paketen, sog. Quanten, emittiert und absorbiert wird. Die Energie eines Quantums ist dabei proportional zur Frequenz der Strahlung:

$$E = h \cdot f .$$

Die Größe  $h$  ist ein Proportionalitätskonstante, die erst später als **plancksches Wirkungsquantum** bezeichnet wurde.

Der heutige Standardwert liegt bei

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} .$$