

5. Beginn der Quantentheorie

Zwischenbilanz

Wir haben bis 1900 in der Physik anerkannte wesentliche Grundlagen skizziert:

Die **Newtonschen Axiome** der Mechanik, die sich auf eine **Teilchenvorstellung** beziehen; wir haben sie am Beispiel des freien Falls entwickelt.

Wir haben die freien **Maxwell-Gleichungen** der Elektrodynamik aus Faradays Induktionsgesetz in Kombination mit einer antisymmetrischen Transformation abgeleitet. Sie beschreiben elektromagnetische Wellen und entwerfen dabei ein teilchenfreies **Konzept einer Welle**. (Wasserwellen, Schallwellen, Schallwellen in Festkörpern referieren auf ein Teilchenbild.)

Der Carnot-Kreisprozess hat uns das Konzept der Entropie nahegelegt. Die beiden **Hauptsätze der Thermodynamik** wurden bereitgestellt. Die Möglichkeit der Identifikation von thermodynamischer (nach Clausius) und statistischer (nach Boltzmann) **Entropie** ist ein Hinweis auf die Universalität der Idee des Entropiebegriffs.

Die vorgestellten Konzepte werden wir als Werkzeuge bei der Hinführung zur Quantentheorie einsetzen.

5.1 Grenzen der “Klassischen Physik“

Weit über 200 Jahre, von 1687 bis 1900, galt die Newtonsche klassische Physik als die erfolgreiche und perfekte, axiomatisch gegründete Beschreibung von Materie. Ihr Geltungsbereich schloss nicht nur die Erde, sondern auch das ganze Universum mit ein.

Die Akustik, die Thermodynamik der kinetischen Gastheorie, die Strömungsphysik ließen sich auf Newtonsche Mechanik reduzieren. Auch die physikalische Chemie, die Chemie insgesamt arbeitete mit dem klassischen Teilchenbild.

Der Elektromagnetismus, die Optik und die Wärmestrahlung ließen sich aus den klassischen Maxwell-Gleichungen ableiten.

Doch an der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert ergaben sich Fragen, auf die es im Rahmen der klassischen Physik keine Antworten gab:

- Wie lässt sich das Periodensystem der chemischen Elemente erklären?
- Warum emittiert Materie Licht, beispielsweise im Falle rot glühenden Eisens?
- Warum leuchtet eine Kerzenflamme gelb auf, wenn Salz in die Flamme gestreut wird?
- Spektralanalyse der Elemente: Was ist der Grund für die Emission und Absorption von Licht mit charakteristischen Wellenlängen?
- Erklärung des photoelektrischen Effekts?
- Radioaktivität?
- Atommodelle (Rutherford 1908-1911, Bohr 1913): Warum ist die Materie stabil?
- Supraleitung: Bei sehr tiefen Temperaturen verschwindet der elektrische Widerstand (Onnes, 1911).
- Woher kommt die Energie der Sonne?
- Auch die Frage nach der Irreversibilität muss auf dieser Liste stehen bleiben.

Typische Grenzen der klassischen Physik ergeben sich im Zusammenhang von Phänomenen, wo Materie und elektromagnetische Strahlung miteinander wechselwirken. Im Rückblick ist das nicht überraschend. Denn gerade die Vereinigung von Teilchenbild und Wellenbild führt zur Quantentheorie. Dazu war es notwendig, radikal neue Konzepte einzuführen, um der Physik ein Fundament zu geben.

Um die Revolution im Denken der Physik beleuchten zu können, war es notwendig, die Grundlagen der klassischen Physik sich zu vergegenwärtigen. Eine Stärke der klassischen Physik liegt darin, dass ihr Gegenstand der Beschreibung im Rahmen der gewohnten räumlichen Anschauung wahrgenommen werden kann.

Gustav Robert Kirchhoff (1824, Königsberg - 1887, Berlin)

Studium (Mathematik) und Promotion in Königsberg, Habilitation in Berlin (1848), Extraordinarius in Breslau (1850), Physikprofessor in Heidelberg (1854-1874), und in Berlin (1875-1886).

Kirchhoffsche Regeln der Stromverzweigung (1845/46), Spektralanalyse, zusammen mit Bunsen (1859/60), Entdeckung der Elemente Cäsium und Rubidium, Erklärung der Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum, Kirchhoffsche Beugungstheorie (1882, Kirchhoffsche Formulierung des Huygensschen Prinzips).

1859 Strahlungsgesetz:

Unabhängig von den spezifischen Eigenschaften eines Körpers ist bei gegebener Temperatur und Wellenlänge sein Emissionsgrad gleich seinem Absorptionsgrad.

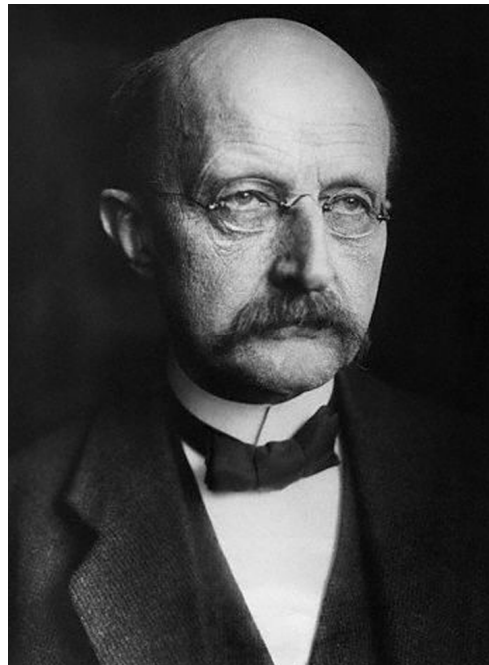
Ein schwarzer Körper ist durch vollständige Absorption (100 %) definiert.

Kirchhoff 1860 (Poggendorffs Annalen der Physik, Bd 109, 1860, S. 292. Zitiert in [35], S. 27.):

Das **Emissionsvermögen des schwarzen Körpers** „*ist eine Funktion der Wellenlänge und der Temperatur. Es ist eine Aufgabe von hoher Wichtigkeit, diese Funktion zu finden. Der experimentellen Bestimmung derselben stehen große Schwierigkeiten entgegen, trotzdem scheint die Hoffnung begründet, sie durch Versuche ermitteln zu können, da sie unzweifelhaft von einfacher Form ist, wie alle Funktionen es sind, die nicht von den Eigenschaften einzelner Körper abhängen, und die man bisher kennengelernt hat.*“

Genau diese Funktion wird Max Planck finden.

5.1 Beginn der Quantentheorie: Max Planck



Max Planck, 1858-1947

Eberhard Müller: Grundlagen und Interpretation der Quantentheorie. Beginn der Quantentheorie.

„Obwohl es seit dem Dezember 1900 andere wichtige Neuheiten in der Physik gegeben hat, hat die Welt einen Kopf wie Planck nie mehr hervorgebracht.“ [28]

Abraham Pais

Persönliches

Max Planck ist am 23. April 1858 in Kiel geboren.

Die Familie Planck stammt aus dem schwäbischen Nürtingen (am Neckar), wo Georg Jakob Planck (Ur-Urgroßvater von Max) Stadt- und Amtsschreiber war. Urgroßvater und Großvater waren Theologieprofessoren in Göttingen.

Max Plancks Vater:

Wilhelm von Planck (1817-1900), Juraprofessor, lehrte in Basel, Greifswald, Kiel, München; (dessen Bruder ebenfalls Juraprofessor in Göttingen, Mitverfasser des BGB, in Kraft getreten zum 1.1.1900)

Max Plancks Mutter:

Emma Planck, geb. Patzig (1821-1914), stammt aus Greifswald; in ihrer Familie Staatsbeamte, Verwaltungsbeamte, Pfarrer.

Max Plancks Bruder Hermann fiel im Krieg von 1870/71 in der Schlacht von Orléans.

Eberhard Müller: Grundlagen und Interpretation der Quantentheorie. Beginn der Quantentheorie.

1887 Heirat mit Marie Merck (1861-1909). Vier Kinder:

Karl (1888-1916), gefallen 1916 bei Verdun.

Zwillingsschwester Grete (1889-1917), Emma (1889-1919), beide sterben bei der Geburt des jeweils ersten Kinds.

Erwin (1893-1945).

1911 zweite Heirat Max Plancks, mit Margareta (Marga) von Hoeßlin (1882-1949).

1911 gemeinsames Kind Hermann (1911-1954).

Erwin Planck war Staatssekretär des letzten Kanzlers der Weimarer Republik, General Kurt von Schleicher. Schleicher wurde am 30. Juni 1934 in seinem Haus von einem NS-Kommando erschossen. Danach schloss sich Erwin Planck dem Widerstand gegen Hitler an. Nach dem Attentat gegen Hitler am 20. Juli 1944 wurde er zum Tode verurteilt. Max Plancks Gnadengesuch an Hitler blieb unbeantwortet. Erwin Planck wurde am 23. Januar 1945 im Gefängnis Plötzensee in Berlin als Mitverschwörer hingerichtet [26].

Max Planck überlebt seine erste Frau und alle vier Kinder mit ihr.

[26] Astrid von Pufendorf: „Die Plancks. Eine Familie zwischen Patriotismus und Widerstand“. Propyläen Verlag, Berlin, 2006.

- 1879 Dissertation in München: „Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie“. Planck reflektierte die Schriften von Clausius sehr gründlich und verallgemeinerte Clausius' Formulierung des zweiten Hauptsatzes.
- 1880 Habilitation: „Gleichgewichtszustände isotroper Körper in verschiedenen Temperaturen“. Ein für die physikalisch-chemische Thermodynamik wichtiger Beitrag.
- 1885 Extraordinarius für Theoretische Physik an der Universität Kiel.
- 1887 Wettbewerb der philosophischen Fakultät der Universität Göttingen: „Über das Wesen der Energie“. (2. Preis; der 1. Preis blieb vakant. Planck kritisierte einen Ansatz von Weber, der in der Jury saß.)
- 1889 Extraordinarius für Theoretische Physik an der Universität Berlin
- 1892 Ordentlicher Professor auf dem Lehrstuhl für theoretische Physik. Nachfolger von Gustav Kirchhoff, der 1887 gestorben war.
- 1894 In die Preußische Akademie der Wissenschaften gewählt.

- 1889 Umzug der Familie nach Berlin in die Tauentzienstr. 18a.
- 1905 10. März Einzug in das eigene Haus im Grunewald, Wangenheimstr. 21.

7. Oktober 1900:

An diesem Sonntagnachmittag besuchen Heinrich Rubens und seine Frau Marie Rubens die Familie Planck zuhause. Rubens war seit 1895 außerordentlicher Professor an der TH Charlottenburg, ab 1900 Ordinarius. Er nutzte bei seinen Experimenten zur Wärmestrahlung im Bereich bis über 50µm Wellenlänge das Labor von Ferdinand Kurlbaum an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Charlottenburg.

Planck hatte bis dato das Strahlungsgesetz, das Wilhelm Wien 1896 aufgestellt hatte, mit thermodynamischen Argumenten als universell gültig behauptet. Rubens macht nun Planck klar, dass inzwischen experimentell beobachtbare Abweichungen zum Wienschen Strahlungsgesetz stichhaltig sind. Das musste Planck alarmieren. Nachdem die Rubens nach ihrem Sonntagnachmittagsbesuch sich verabschiedet hatten, machte sich Max Planck noch am Abend an die Arbeit und interpolierte zwischen dem Wienschen Gesetz und dem neuen experimentellen Befund. Dabei erhielt er ein neues Strahlungsgesetz. Noch in der Nacht teilt er es auf einer Postkarte Rubens mit [27]. (Dies hat Abraham Pais recherchiert [28]. Das darüber hinaus Bekannte ist damit kompatibel.)

[27] Gerhard Hettner, Schüler von Rubens, Naturwissenschaft 10 (1922), S. 1033.

[28] Abraham Pais: „Raffiniert ist der Herrgott ...“, Albert Einstein, eine wissenschaftliche Biographie. Vieweg, Braunschweig, 1986.

Gegen Mitternacht intoniert Max Planck auf dem Klavier Beethovens Ode an die Freude. Das wissen wir von seiner Frau Marie Planck. Sie sagt auch, daß das ganz ungewöhnlich war. Ein Hinweis, dass etwas Besonderes passiert sein musste [29].

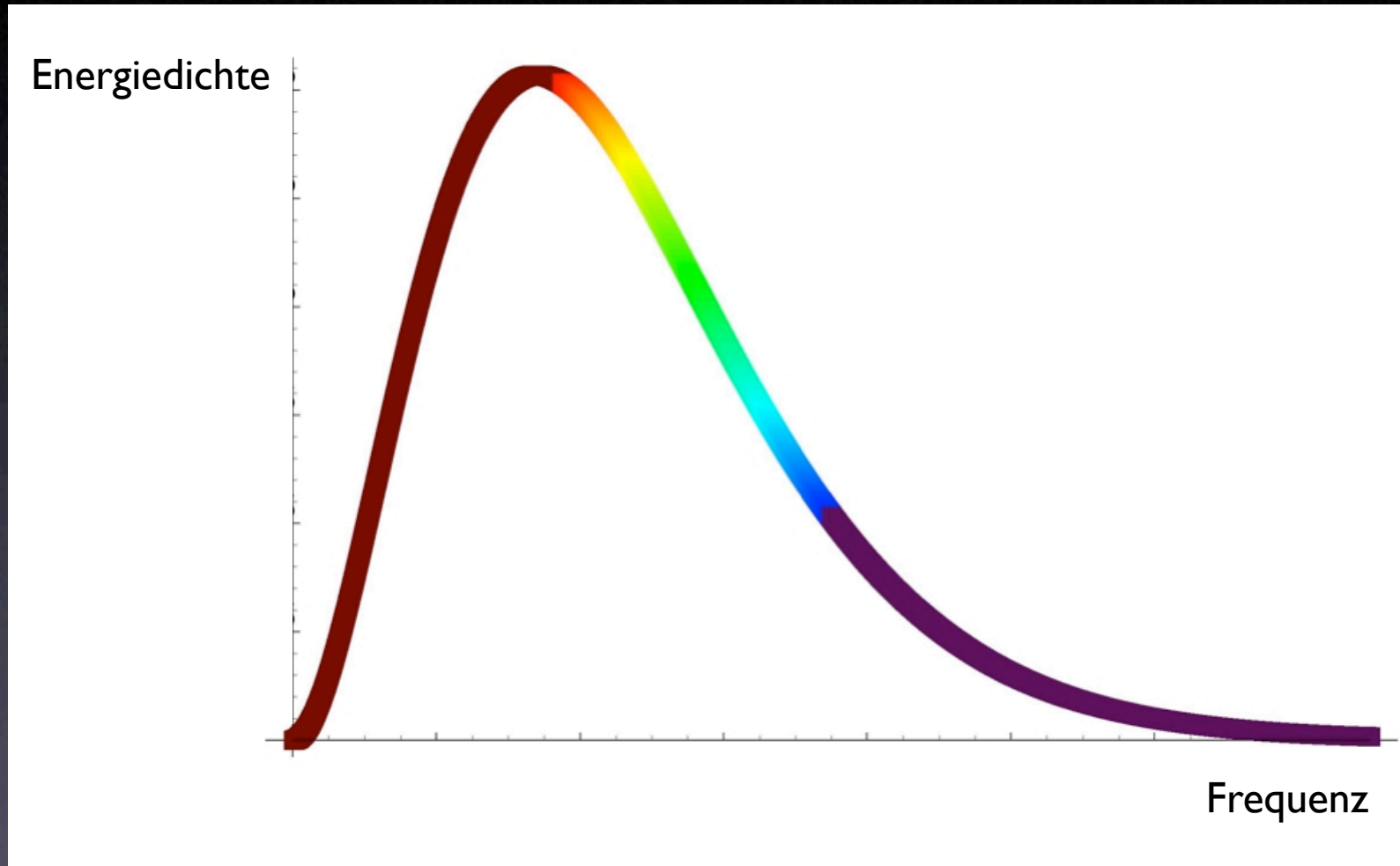
Dazu passt ein Hinweis von Erwin Planck. Demnach bemerkte Max Planck gegenüber seinem Sohn Erwin auf einem Spaziergang im Grunewald im Herbst 1900: „Heute habe ich eine Entdeckung gemacht, die ebenso wichtig ist wie die Newtons.“ ([26], S. 27)

Am 19. Oktober 1900, bei einem Treffen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, berichtet Ferdinand Kurlbaum über die neuen Strahlungsmessungen in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Daran anschließend macht Planck in einer ausführlichen Diskussionsbemerkung seine neue Strahlungsformel öffentlich [31]. In der Nacht vom 19. auf den 20. Oktober vergleicht Rubens die Plancksche Formel mit den experimentellen Daten und stellt völlige Übereinstimmung fest [31].

[29] Heinrich Planck, Verwandter von Max Planck, Professor an der Universität Stuttgart, berichtete dies am 7.10.2000 in seinem Abendvortrag „Zur Person von Max Planck“ anlässlich des Symposiums „100 Years of Quantum Theory“ in Schwerte [30].

[30] „100 Years of Quantum Theory“. Internationales Symposium am 6.-8. Oktober 2000 in Haus Villigst, Schwerte, organisiert von D. Buchholz, Universität Göttingen, A. Wieck, Universität Bochum, E. Müller, Evangelisches Studienwerk Villigst.

[31] Max Planck: „Zur Geschichte der Auffindung des physikalischen Wirkungsquantums“. In „Vorträge und Erinnerungen“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1975. Max Planck: „Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung“, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2 (1900), S. 202-204.



Energieverteilung der Wärmestrahlung

Planck-Verteilung der spektralen Energiedichte der Strahlung pro Volumeneinheit im Frequenzbereich ν bis $\nu+d\nu$

$$(32) \quad u(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

Max Planck, Vortrag der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, 14. Dezember 1900 [32].

Planck schrieb später über die Zeit zwischen dem 7. Oktober und 14. Dezember 1900:

„Kurz zusammengefaßt kann ich die ganze Tat als einen Akt der Verzweiflung bezeichnen. Denn von Natur bin ich friedlich und bedenklichen Abenteuern abgeneigt. ...Aber eine theoretische Deutung mußte um jeden Preis gefunden werden, und wäre er noch so hoch. ... Die beiden Hauptsätze der Wärmetheorie erschienen mir als das einzige, was unter allen Umständen festgehalten werden muß. Im übrigen war ich zu jedem Opfer an meinen bisherigen physikalischen Überzeugungen bereit.“ ([33], S. 22)

[32] Max Planck: „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum“, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2, (1900), S. 237-245. „Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum“, Annalen der Physik 4 (1901), S. 553-563.

[33] Brief Plancks an R.W.Wood vom 7. Oktober 1931, zitiert in [34], [35].

[34] Max Jammer: „The Conceptual Development of Quantum Mechanics“. McGraw-Hill Company, New York, 1966.

[35] Armin Hermann: „Planck“. rororo Monographien, S. 35.

5.2 Max Plancks Überlegungen zur Ableitung seiner Strahlungsformel [31a]

Das Wiensche Strahlungsgesetz (1896) ergibt sich aus der Planckschen Strahlungsformel (32) für hohe Frequenzen bzw. kurze Wellenlängen. (Das Produkt aus Frequenz ν und Wellenlänge λ ergibt die Lichtgeschwindigkeit c : $\nu \cdot \lambda = c$; $\nu = c/\lambda$.)

Für großes ν (und damit für kleine Wellenlänge λ) ist der Wert der im Nenner stehenden Exponentialfunktion groß, so dass demgegenüber der Summand 1 vernachlässigt werden kann:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad \xrightarrow{\text{für } \nu \rightarrow \infty} \quad \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT}}$$

Für kleines ν (großes λ) lässt sich die Exponentialfunktion nach ihrem Argument entwickeln. Im Grenzwert sehr kleinen Arguments, d. h. im Grenzwert sehr großer Wellenlänge können die Terme höherer Ordnung der Reihenentwicklung der Exponentialfunktion vernachlässigt werden und es ergibt sich das Rayleigh-Jeans-Gesetz:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad \xrightarrow{\text{für } \nu \rightarrow 0} \quad \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{1 + h\nu/kT + \dots - 1} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{kT}{h\nu} = \frac{8\pi \nu^2 kT}{c^3}$$

Ein direkter Weg zu den Grundlagen der Quantentheorie

Sehr kurze Wellenlänge bedeutet starke Lokalisierung und kommt damit dem Teilchenbild nahe.

Dieser Extremfall entspricht dem Wienschen Strahlungsgesetz.

Eine große Wellenlänge steht demgegenüber für das Wellenbild.

Diesem Extremfall entsprechen dem Rayleigh-Jeans-Gesetz und die Messwerte von Rubens und Kurlbaum, auch jenen von Lummer, Pringsheim und Paschen. Die Messungen von Rubens reichten am weitesten in das ferne Infrarot.

Rayleigh hatte sein Strahlungsgesetz aus der Maxwell'schen Elektrodynamik abgeleitet.

Auch das ein Indiz für das Wellenbild. - Rayleigh publizierte seine Ableitung im Sommer 1900.

Damit vermittelt die Plancksche Strahlungsformel zwischen Teilchenbild und Wellenbild.

Die Zuordnung des Ortsoperators zum Teilchenbild und des Impulsoperators zum Wellenbild baut eine Brücke zur mathematischen Vermittlung zwischen Teilchenbild und Wellenbild.

Durch eine einfache Rechnung erhalten wir eine Beziehung zwischen den beiden Operatoren.

Herleiten der Heisenbergschen Vertauschungsrelation

$$(\text{PQ} \psi)(x) = \frac{1}{i} \frac{h}{2\pi} \frac{d}{dx} (x \psi(x)) = \frac{1}{i} \frac{h}{2\pi} (x \psi'(x) + \psi(x)) \quad \text{Produktregel der Differentiation}$$

$$(\text{QP} \psi)(x) = (x \frac{1}{i} \frac{h}{2\pi} \frac{d}{dx} \psi)(x) = x \frac{1}{i} \frac{h}{2\pi} \psi'(x)$$

$$\begin{aligned} ((\text{PQ} - \text{QP}) \psi)(x) &= (\text{PQ} \psi)(x) - (\text{QP} \psi)(x) = \frac{1}{i} \frac{h}{2\pi} x \psi'(x) + \frac{1}{i} \frac{h}{2\pi} \psi(x) - \frac{1}{i} \frac{h}{2\pi} x \psi'(x) \\ &= \frac{1}{i} \frac{h}{2\pi} \psi(x) \end{aligned}$$

Diese Gleichheit gilt für alle x -Werte. Wir haben damit die Funktionengleichung

$$(\text{PQ} - \text{QP}) \psi = \frac{1}{i} \frac{h}{2\pi} \psi = \frac{1}{i} \frac{h}{2\pi} \text{Id} \psi$$

„Id“ ist der Identitätsoperator, der die Funktion, auf die er angewandt wird, unverändert lässt. Die obige Funktionengleichung gilt für alle Funktionen ψ , so dass wir sie als Operatorgleichung schreiben können:

$$(33) \quad \mathbf{PQ} - \mathbf{QP} = \frac{1}{i} \frac{h}{2\pi} \mathbf{Id}$$

Das ist die **Vertauschungsrelation** zwischen Orts- und Impulsoperator. Sie drückt die entscheidende Struktur der Quantentheorie aus.

Zurück zum Beginn der Quantentheorie und zu den Überlegungen Plancks zur Ableitung der Strahlungsformel.

Planck geht von einem evakuierten Hohlraum (mit perfekt reflektierenden Wänden) aus, der „mit elektrisch schwingenden, Energie ausstrahlenden und absorbierenden Körpern“ erfüllt ist (S. 18 ff. in [31a]). Der Einfachheit halber nimmt er Oszillatoren von bestimmter Eigenfrequenz ν , die durch Strahlung gedämpft werden. Er sucht nach irreversiblen Strahlungsvorgängen, die zu einem stationären, thermodynamischen Gleichgewicht führen, wie es seit Kirchhoff von der Strahlung des schwarzen Körpers bekannt ist. Wie sieht die „normale“ Energieverteilung der Strahlung des schwarzen Körpers aus?

Planck will die Überlegungen, die auf der Basis der kinetischen Gastheorie zur Maxwell-Boltzmannschen Geschwindigkeitsverteilung des thermischen Gleichgewichts geführt haben, konzeptuell in die Struktur der elektromagnetischen Theorie übersetzen (Max Jammer in [34], S. 11).

Planck untersucht die Absorption und Emission elektrischer Wellen durch Resonanz (1895). Er vermutet einen irreversiblen Vorgang (1897). Aber Boltzmann liefert dazu ein überzeugendes Gegenargument (1897).

Daraufhin greift Planck zu einer Hypothese, die in der kinetischen Gastheorie bei der Boltzmann-Gleichung zur Beschreibung dissipativer Prozesse bekannt ist als molekulares Chaos; erst diese Initialvoraussetzung gewährleistet irreversibles Verhalten. Planck verlangt nun (analog zum molekularen Chaos in der kinetischen Gastheorie) die vollständige Inkohärenz (Zufallsverteilung der Phasenwinkel) der harmonischen Partialschwingungen der Wärmestrahlung. Damit erhält er die Irreversibilität bei der Wechselwirkung zwischen einem Oszillator und der ihn erregenden Strahlung [36].

Es ist pikant, dass Planck die Lösung beim Ansatz von Boltzmann sucht. Er war Boltzmanns atomistischen Vorstellungen gegenüber lange reserviert, und Plancks Mitarbeiter Zermelo führte mit Boltzmann einen veritablen Streit.

Als Folge der Irreversibilität kann Planck die thermodynamische Zustandsfunktion angeben, deren Wert mit der Zeit ansteigt: die Entropie. Er setzt die Entropie des ganzen Systems zusammen aus der Entropie der Oszillatoren und der Entropie der Hohlraumstrahlung. Im thermodynamischen Gleichgewicht ist die Entropie maximal. Aus diesem Maximum erhält er die spektrale Verteilung der Wärmestrahlung. Mit seinem Ansatz von 1899 für die Entropie eines Oszillators erhielt er das Wiensche Strahlungsgesetz. In dieser Formel vom Mai 1899 war implizit das später mit h bezeichnete Wirkungsquantum als universelle Konstante enthalten.

[36] Max Planck, Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften vom 18. Mai 1899, S. 455.

Nach dem Besuch von Rubens am 7. Oktober 1900 war Planck sofort in der Lage, die Entropie des Oszillators für den neuen Grenzfall anzugeben, um zwischen den beiden Grenzfällen (Wiensches Gesetz und Kurlbaum-Daten) der Entropieausdrücke zu interpolieren. Aus dem neuen Entropieausdruck konnte er sogleich die neue Spektralverteilung ableiten. ([3 Ia], S. 20 ff.)

Planck nutzt das Kriterium für das Maximum der Entropie S als Funktion der Energie U eines Oszillators: Die 2. Ableitung muss negativ sein.

Wien-Fall:
$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{1}{avU}$$

Kurlbaum-Fall:
$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{C}{U^2}$$

Interpolation:
$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{1}{avU + \frac{U^2}{C}}$$

a wird sich als Quotient h/k herausstellen, C ist ebenfalls eine Konstante, $a \cdot C = a'$ gesetzt.

Integration des Interpolationsausdrucks ergibt

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T} = \frac{1}{a\nu} \log\left(1 + \frac{a'\nu}{U}\right)$$

Diese Gleichung lässt sich nach der Oszillator-Energie U auflösen:

$$U = \frac{a'\nu}{e^{a\nu/T} - 1}$$

Nach dem 19. Oktober 1900 suchte Planck fieberhaft nach einer theoretischen Rechtfertigung seiner Strahlungsformel (32) aus physikalischen Prinzipien a priori. Dabei griff er nach Boltzmanns Entropie $S = k \log W_N$. Er musste die Wahrscheinlichkeiten in seinem System aus Oszillatoren und Strahlung im Hohlraum identifizieren. Die Gesamtenergie setzt Planck aus endlichen Energiebeiträgen ε zusammen:
 $U_N = P \cdot \varepsilon$.

W_N ist die Anzahl der Möglichkeiten, P ununterscheidbare Energiebeiträge auf N unterscheidbare Oszillatoren zu verteilen. Die klassische Boltzmannsche Statistik führte nicht auf seine Strahlungsformel. Er setzte sich darüber hinweg und suchte eine Abzählung, die zur richtigen Formel führte. Damit nahm er die von Bose 1924 vorgeschlagene Statistik vorweg. Aus dem erhaltenen Ausdruck für die Entropie konnte Planck auf

$$(34) \quad \varepsilon = h \cdot \nu$$

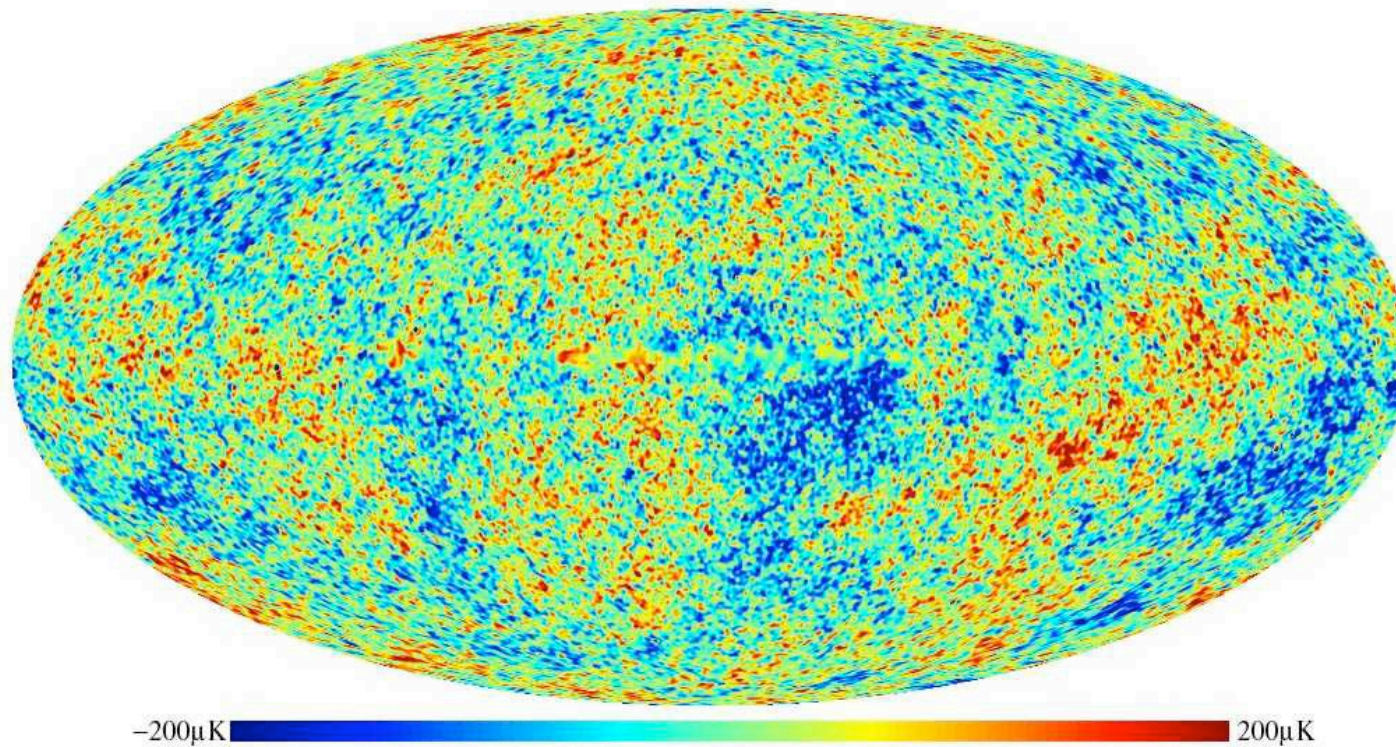
schließen.

(Siehe dazu Pais in [28], S. 374-376. Seine Argumentation nimmt die Darstellung Plancks in [31.a], S. 24 ff. auf.)

5.3 Ausblick: Eine weitreichende Anwendung der Planckschen Strahlungsformel

Bei der Entwicklung empfindlicher Erdsatelliten-Antennen entdeckten 1964 die beiden Physiker Arno Penzias und Robert Woodrow Wilson, Bell-Laboratories, USA ein Hintergrundrauschen, das sich nicht eliminieren ließ. Es stellte sich als kosmische Hintergrundstrahlung heraus. (Sie erhielten dafür 1978 den Physik-Nobelpreis.) Das Spektrum dieser Hintergrundstrahlung hat eine Planck-Verteilung mit einer Temperatur von 2,7 K. Die kosmische Hintergrundstrahlung entstand 380 000 Jahre nach dem Urknall, als Atomkerne Elektronen einfingen und dadurch das Universum „durchsichtig“ wurde. Zum Vergleich: Das Alter des Universums beträgt 13,8 Milliarden Jahre. Infolge der Expansion des Universums sinkt die Temperatur der Strahlung, die ursprünglich viel höher war.

Seit den 1990er Jahren werden feine Temperaturfluktuationen der Planck-Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung untersucht. Die Abweichungen von der Planckverteilung betragen einige Millionstel Grad Kelvin. Die neuesten Daten stammen vom 2009 gestarteten „Planck-Weltraumteleskop“ der Europäischen Raumfahrt-Agentur ESA. Die hier in einer Falschfarben-Darstellung gezeigten Energieverdichtungen (gelb-rötlich) sind „Keime“ für die Entwicklung von Materieverdichtungen bis hin zu Galaxien und Galaxienhaufen.



Planck CMB

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/04/Planck_and_cosmic_microwave_background

Released: 21/03/2013 12:00pm; Copyright ESA and the Planck Collaboration.