

**OSTWALDS KLASSIKER
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN
Band 206**

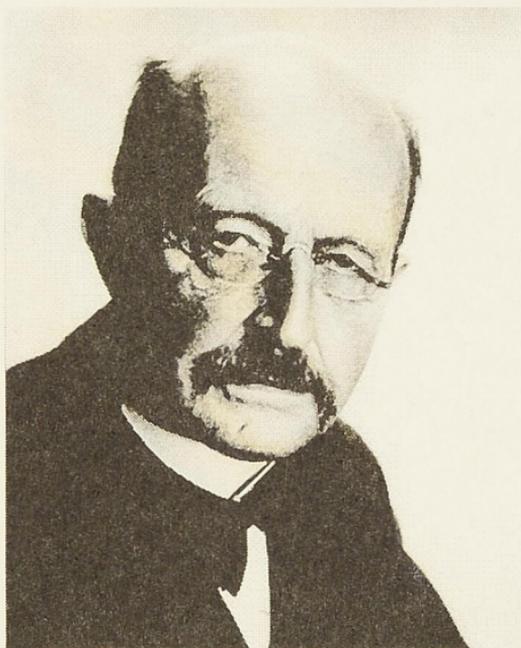
Die Ableitung der Strahlungsgesetze

Sieben Abhandlungen aus dem
Gebiete der elektromagnetischen
Strahlungstheorie

von
Max Planck

Verlag Harri Deutsch

OSTWALDS KLASSIKER
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN
Band 206



Max Planck
23.4.1858–4.10.1947

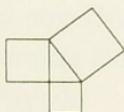
**OSTWALDS KLASSIKER
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN
Band 206**

**Die Ableitung der Strahlungsgesetze
(1895–1900)**

von
Max Planck

Einleitung von
Dieter Hoffmann

Anmerkungen von
Fritz Reiche



Verlag Harri Deutsch

Quellenangabe für das Portrait von Max Planck auf der Schmutztitelrückseite:
Archiv der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin

Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-8171-3419-9

Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne
Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für
Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung
und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Der Inhalt des Werkes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren,
Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und
Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

© Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH,
Frankfurt am Main, 2010

1. Auflage Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig

Nachdruck der 4., erw. Auflage 2007, 2010

Druck: Rosch - Buch Druckerei GmbH, Scheßlitz

Printed in Germany

Lebensdaten

Max Planck (1858–1947)

- 1858 am 23. April in Kiel geboren
- 1874 Abitur am Maximilians-Gymnasium München
- 1874–79 Studium der Physik in München und Berlin
- 1879 Promotion an der Universität München mit der Arbeit
„Über den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie“
- 1880 Habilitation
- 1880–85 Privatdozent an der Universität München
- 1885–89 a.o. Professor für theoretische Physik an der Universität Kiel
- 1887 Heirat mit Marie Merck (1861–1909)
- 1889 Extraordinarius und Direktor des Instituts für theoretische Physik an der Universität Berlin
- 1892 Ernennung zum Ordinarius
- 1894 Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften (1912–38 deren beständiger Sekretar)
- 1894 Beginn der Arbeiten zur Wärmestrahlungstheorie
- 1900 Vorträge vor der Physikalischen Gesellschaft in Berlin zum Planckschen Strahlungsgesetz mit der Quantenhypothese $E = h\nu$
- 1911 Heirat mit Marga von Hoeßlin (1882–1949)
- 1913–14 Rektor der Universität Berlin
- 1918 Nobelpreis für Physik
- 1926 Emeritierung
- 1930–37 Präsident der Kaiser Wilhelm-Gesellschaft
- 1947 am 4. Oktober in Göttingen gestorben

Einleitung

von Dieter Hoffmann

Die vorliegende Edition fasst sieben Abhandlungen Max Plancks zur Ableitung des Strahlungsgesetzes zusammen, die unser aktuelles Wissen zur Wärmestrahlungstheorie begründen halfen. Sie dokumentieren eine der schöpferischsten Schaffensperioden des Gelehrten, der mit diesen Arbeiten und wegen der in diesem Zusammenhang erfolgten Einführung der Beziehung $E = h\nu$ zum „Vater der Quantentheorie“ wurde. Die Auswahl der Aufsätze geht auf Fritz Reiche (1883–1969) zurück, der als Doktorand zu den wenigen direkten Schülern Plancks gehörte und die Aufsätze bereits 1923 als „Ostwalds Klassiker“ herausgegeben und mit Anmerkungen versehen hatte.

Planck konnte sich bei seinen Untersuchungen des Wärmestrahlungsproblems auf wichtige Vorarbeiten stützen, denn es war lange bekannt, dass Körper bei Erwärmung Strahlung aussenden. Spürt man bei geringer Erwärmung nur die Wärmestrahlung, so wird der Körper mit zunehmender Temperatur zunächst rotglühend und später weißglühend. Die Rot- bzw. Weißglut erklärt sich damit, dass sich das Intensitätsmaximum der Strahlung vom langwelligen Teil des Spektrums in den kurzwelligen Spektralbereich verschoben hat, d. h. vom infraroten bzw. roten in den blauen Teil.

So geläufig dies auch war, gab es bis ins ausgehende 19. Jahrhundert kaum gesicherte Erkenntnisse über die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die der Wärmestrahlung zugrunde

liegen. Erst 1859 zeigte Gustav Kirchhoff¹, dass zur Beschreibung der Wärmestrahlung eine universelle Strahlungsfunktion von zentraler Bedeutung ist. Für Strahlen gleicher Wellenlänge (λ) bzw. Frequenz (ν) und gleicher Temperatur (T) ist das Verhältnis von Emissions- (e) und Absorptionsvermögen (a) bei allen Körpern identisch:

$$\frac{e}{a} = \text{const.} = f(\nu, T)$$

Von Kirchhoff wurde in diesem Zusammenhang auch der Begriff des „Schwarzen Körpers“ eingeführt – eines Körpers, der alle auftreffende Strahlung vollständig absorbiert, d.h. in jedem Wellenlängenbereich „schwarz“ ist. Für einen solchen Schwarzen Körper (bb) gilt

$$a = 1$$

und die von ihm emittierte Wärmestrahlung ist damit allein eine Funktion von Wellenlänge bzw. Frequenz, d.h. unabhängig von der Beschaffenheit des strahlenden Körpers:

$$\frac{e}{1} = E_{\text{bb}} = f(\nu, T)$$

Das allgemeine Strahlungsproblem und die Ermittlung einer Strahlungsformel, die den spektralen Verlauf der Strahlung beschreibt, kann damit auf die Untersuchung der Strahlung eines Schwarzen Körpers und auf die Bestimmung dieser materialunabhängigen Funktion der Temperatur und Längswelle bzw. Frequenz reduziert werden. Allerdings erwiesen sich die experimentellen und theoretischen Schwierigkeiten

1 G. Kirchhoff: Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Licht und Wärme. *Annalen der Physik* **19** (1860) S. 275–301; Nachdruck als Ostwalds Klassiker Bd. 72.

als kompliziert und stellten für die zeitgenössische Physik eine große Herausforderung dar.² So gibt es in der Natur keinen perfekten Schwarzen Körper, weshalb geeignete Versuchsanordnungen erst zu entwickeln waren; ein Prozess, der Jahrzehnte dauerte und in den 1890er Jahren vornehmlich von den Physikern und Technikern der Berliner Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geleistet wurde.³ In der Theorie waren die Probleme ähnlich gravierend. Erst 1879 gelang es dem Wiener Physiker Josef Stefan, aus der Analyse vorliegender Messergebnisse die pro Flächeneinheit ausgestrahlte Strahlungsleistung eines homogen temperierten Hohlraums, d.h. eines Schwarzen Körpers zu bestimmen.⁴ Die Energiedichte (I) ist nach Stefan der vierten Potenz der Temperatur proportional:

$$I \sim T^4$$

Ludwig Boltzmann lieferte dann 1884 auf der Grundlage der Maxwell'schen Elektrodynamik eine Ableitung dieses T^4 -Gesetzes für die Gesamtstrahlung eines Schwarzen Körpers⁵, die Hendrik Antoon Lorentz als eine „Perle der theoretischen Physik“ rühmte und dazu führte, dass das man heute vom Ste-

2 Zur Geschichte der Wärmestrahlungstheorie und des Planckschen Strahlungsgesetzes vgl. insbesondere: H. Kangro: Vorgeschichte des Planckschen Strahlungsgesetzes. Wiesbaden 1970 sowie H.-G. Schöpf: Von Kirchhoff bis Planck. Berlin 1978.

3 Vgl. D. Hoffmann: Schwarze Körper im Labor. Physikalische Blätter **56** (2000) S. 43–47; derselbe: On the Experimental Context of Planck's Foundation of Quantum Theory. Centaurus **43** (2001) S. 240–259.

4 J. Stefan: Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften Wien, Abt. II, **79** (1879) S. 391–397.

5 L. Boltzmann: Ableitung des Stefanschen Gesetzes betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der elektromagnetischen Lichttheorie. Annalen der Physik **22** (1884) S. 291–294.

fan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz spricht. Der nächste große Schritt gelang dann Wilhelm Wien von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin-Charlottenburg, der 1893 das sogenannte Wiensche Verschiebungsgesetz

$$\lambda \cdot T = \text{const}$$

und drei Jahre später auch das Wiensche Strahlungsgesetz

$$\rho(\nu, T) = \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}}$$

formulierte, wobei $\rho(\nu, T)$ die Energiedichte bei einer gegebenen Frequenz und Temperatur ist und α , β universelle Konstanten sind.

Das Wiensche Strahlungsgesetz konnte in den folgenden Jahren durch Präzisionsmessungen verifiziert werden und schließlich gelang es Anfang 1899 Max Planck, seit 1889 Professor für theoretische Physik an der Berliner Universität, das Gesetz auf der Grundlage thermodynamischer Überlegungen theoretisch abzuleiten. Damit schien das Wiensche Strahlungsgesetz nicht nur das am besten empirisch bestätigte, sondern auch theoretisch wohlbegründet zu sein. Plancks diesbezügliche Arbeiten waren das Ergebnis einer langen Reihe von Untersuchungen, die bis zu seiner Münchener Dissertation aus dem Jahre 1879 zurückreichen. Mit dieser hatte er sich ganz der Thermodynamik verschrieben. In den Folgejahren arbeitete er insbesondere über das Entropieprinzip, irreversible Vorgänge und thermodynamische Gleichgewichtsprozesse.⁶ Dabei ging es ihm nicht nur um die grundsätzliche Bedeutung der beiden Hauptsätze oder solcher Prinzipien wie der Entropie und der Irreversibilität für die Physik, sondern er

6 Vgl. M. Planck: Über Thermodynamische Gleichgewichte. Ostwalds Klassiker Band 299, Frankfurt/Main 2008.

wandte die thermodynamischen Grundgesetze auch auf das damals noch junge und sich stürmisch entwickelnde Gebiet der physikalischen Chemie an. Mit der Etablierung der Maxwellschen Elektrodynamik in den späten 1880er Jahren bemühte er sich dann auch darum, seine thermodynamischen Studien mit der neuen und stimulierenden elektromagnetischen Lichttheorie zu verknüpfen. Dabei ging es ihm insbesondere darum, die Strahlung konsequent als einen elektromagnetischen Vorgang zu deuten und sich dafür der Thermodynamik zu bedienen. In seiner Antrittsrede vor der Preußischen Akademie der Wissenschaften hatte Planck im Sommer 1894 diesbezüglich ausgeführt: „Ebenso steht zu hoffen, dass wir über diejenigen elektrodynamischen Prozesse, welche direkt durch die Temperatur bedingt sind, wie sie sich namentlich in der Wärmestrahlung äußern, nähere Aufklärung erfahren können, ohne erst den mühsamen Umweg durch die mechanische Deutung der Elektrizität nehmen zu müssen.“⁷

Die Wärmestrahlungstheorie gehörte damals zu den aktuellsten und anspruchsvollsten Gebieten der zeitgenössischen Physik. Allerdings ging es Planck bei der angestrebten Aufklärung nicht allein darum, die bisherigen Erkenntnisse theoretisch zusammenzufassen bzw. zu systematisieren und auf diesem Wege das lang gesuchte, allgemein gültige Strahlungsgesetz zu finden. Sein Streben zielte vielmehr darauf, den inneren Zusammenhang zwischen den beiden noch isoliert voneinander stehenden Gebieten von Thermo- und Elektrodynamik aufzuspüren und so die klassische Physik mit dieser Vereinheitlichung krönen und abschließen zu können.

Anknüpfend an seine bisherigen thermodynamischen Forschungen setzte er sich zunächst mit der Modellvorstellung

7 Chr. Kirsten, H.-J. Treder (Hrsg.): Physiker über Physiker II, Berlin 1979, S. 170.

des linearen bzw. harmonischen Oszillators auseinander. Dieser war 1889 durch Heinrich Hertz als „Hertzscher Oszillator“ in die Physik bzw. Elektrodynamik eingeführt worden, um die Emissions- und Absorptionsprozesse elektromagnetischer Vorgänge, insbesondere die Emission und Absorption Hertzscher Wellen, zu beschreiben. Diese Oszillatoren dachte sich Hertz als linear schwingende elektrische Dipole. Planck übernahm diese Modellvorstellung, um sie auf „die Frage nach den stationären Strahlungsvorgängen innerhalb eines mechanisch ruhenden Mediums, welches sich auf gleichmäßiger konstanter Temperatur befindet und von Körpern nämlicher Temperatur umgeben ist“⁸, d.h. auf einen Schwarzen Körper, anzuwenden. Im März 1895 und im Februar 1896 berichtete er dazu vor der Berliner Akademie⁹, wobei er zeigen konnte, dass „das Kirchhoffsche Gesetz von der Proportionalität des Absorptions- und des Emissionsvermögens eine unmittelbare Folge dieses Verhaltens (solcher Resonatoren – DH) ist. Zur Berechnung der Schwingungsamplitude braucht man auf die Natur der emittierenden Teilchen nicht näher einzugehen, es genügt die Voraussetzung, dass die Dimension der Schwingungszentren klein ist gegen die Wellenlänge, wie das z.B. auch der Fall ist, wenn man hinreichend kleine Schwingungen ponderabler Masse mit konstanten elektrischen Ladungen annimmt.“¹⁰

8 M. Planck: Absorption und Emission elektrischer Wellen durch Resonanz. *Annalen der Physik* **57** (1896) S. 1–14, im vorliegenden Band S. 1–21.

9 Vgl. die Abhandlung I, „Absorption und Emission elektrischer Wellen durch Resonanz“ (*Annalen der Physik* **57** (1896) S. 14), im vorliegenden Band S. 1–21, und Abhandlung II, „Über elektrische Schwingungen, welche durch Resonanz erregt und durch Strahlung gedämpft werden“ (*Annalen der Physik* **60** (1897) S. 577–599), im vorliegenden Band S. 2–42.

Planck hat die Idee der „Planckschen Resonatoren“ – so werden in der Physik seither solche fiktiven und mit einer charakteristischen Frequenz ν schwingenden Körper bezeichnet – dann in den folgenden Jahren weiter ausgebaut und insbesondere auf die in einem Hohlraum eingeschlossene elektromagnetische Strahlung und das sich dort ausbildende Strahlungsgleichgewicht angewandt. Dabei sollten die schwingenden Resonatoren den Energieaustausch zwischen Strahlungsemission und -absorption vermitteln. Seine Forschungsergebnisse präsentierte er zwischen 1897 und 1899 in den *Annalen der Physik* mit einer Serie von fünf Aufsätzen „Über irreversible Strahlungsvorgänge“.¹¹ Dabei ließ sich zwar seine ursprüngliche Hoffnung, im Strahlungsverhalten eines Hohlraums die lang gesuchte Begründung für die Irreversibilität zu finden, nicht bestätigen, doch gelang ihm die Aufstellung einer Zustandsfunktion, die sich als Entropie (S) des betrachteten Strahlungssystems (d.h. der Resonatoren) deuten ließ. Der gefundene Ausdruck lautete

$$S = -\frac{E}{a\nu} \ln \frac{E}{eb\nu},$$

wobei E die Energie des Resonators, ν dessen Frequenz und a bzw. b wiederum universelle Konstanten sind.

Diese Beziehung liefert mit

$$\frac{dS}{dE} = \frac{1}{T} \quad \text{und} \quad E = b\nu e^{-\frac{a\nu}{T}}$$

10 M. Planck: Absorption und Emission elektrischer Wellen durch Resonanz, a.a.O., im vorliegenden Band S. 21

11 M. Planck: *Physikalische Abhandlungen und Vorträge*. Braunschweig 1958, Bd. 1, S. 493ff;

M. Planck: *Annalen Papers*. Weinheim 2008, S. 461ff.

die schon erwähnte theoretische Ableitung des Wienschen Strahlungsgesetzes.

Planck hatte über seine diesbezüglichen Forschungsergebnisse im Mai 1899 in einer Sitzung der Preußischen Akademie vorgetragen und dabei auch die Überzeugung vertreten, dass die von ihm gewählte „Strahlungsentropie und damit auch das Wien'sche Energieverteilungsgesetz eine nothwendige Folge der Anwendung des Principes der Vermehrung der Entropie auf die elektromagnetische Strahlungstheorie ist und dass daher die Grenzen der Gültigkeit dieses Gesetzes, falls solche überhaupt existiren, mit denen des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie zusammenfallen“ – d.h. das Wiensche Strahlungsgesetz sollte „allgemeine Gültigkeit“ besitzen.¹²

In diesem Zusammenhang wurde von Planck im Übrigen auch schon die später als elementares Wirkungsquantum h bezeichnete Naturkonstante eingeführt und darauf hingewiesen, dass diese in Kombination mit Lichtgeschwindigkeit und Gravitationskonstante die Möglichkeit eröffnet, „Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur aufzustellen, welche ... ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch außerirdische und außermenschliche Culturen nothwendig behalten und welche daher als ‚natürliche Maßeinheiten‘ bezeichnet werden können.“¹³ Dass die Bedeutung dieser neuen Konstante sich indes nicht auf das Gebiet der Metrologie und der Begründung natürlicher Maßeinheiten beschränkt und dass auch das Wiensche Gesetz keineswegs Allgemeingültigkeit beanspruchen konnte, sollte Planck schon wenige Monate später feststellen.

Die Präzisionsmessungen zur Wärmestrahlung sowie die damit verknüpften Entwicklungen von adäquaten Messme-

12 M. Planck: Über irreversible Strahlungsvorgänge. *Annalen der Physik* **1** (1900) S. 119.

13 Ebd., S. 121.

thoden und Instrumenten waren an der Berliner Physikalisch-Technischen Reichsanstalt auch nach der Bestätigung des Wienschen Strahlungsgesetzes fortgeführt worden, denn es ging dem Forschungsprogramm der Reichsanstalt nicht nur und keineswegs in erster Linie um die experimentelle Prüfung der Strahlungsgesetze. Die Präzisionsmessungen geschahen vielmehr vor dem Hintergrund, auf dieser Grundlage ein geeignetes Normal für Lichtquellen zu definieren. „Die Versuche über die Strahlung schwarzer Körper berechtigen zu der Hoffnung, jene früher schon ausgesprochene Idee, die Strahlung einer Lichtquelle auf diejenige einer konstanten Wärmequelle zurückzuführen, zu besserem Erfolg führen zu können.“, heißt es dementsprechend im Tätigkeitsbericht der Reichsanstalt für das Jahr 1895.¹⁴

Nachdem auch schon früher Abweichungen zwischen der Theorie und den gemessenen Energiekurven des Schwarzen Körpers konstatiert worden waren, ergaben im Sommer 1900 Untersuchungen von Heinrich Rubens und Ferdinand Kurlbaum, die als Gastmitarbeiter an der Reichsanstalt mit der sogenannten Reststrahlenmethode Messungen im äußersten Ultrarot durchführten, so gravierende Abweichungen von der Wienschen Strahlungsformel, dass man diese nicht mehr wegdiskutieren konnte. Bevor darüber auf einem Kolloquium der Physikalischen Gesellschaft berichtet wurde, informierte Rubens seinen Kollegen Max Planck über die neuen Messergebnisse. Beide verband nicht nur eine kollegiale Freundschaft, sondern Planck galt wegen seiner intensiven Beschäftigung mit dem Wärmestrahlungsproblem in der Wissenschaft überhaupt als Autorität auf diesem Gebiet. Gerhard Hettner, ein damaliger Doktorand von Rubens, gab über den Besuch

14 Die Tätigkeit der PTR 1895/96. Zeitschrift für Instrumentenkunde **16** (1896) S. 206.

später den folgenden Bericht: „Als am Sonntag, dem 7. Oktober 1900 Rubens mit seiner Frau bei Planck einen Besuch machte, kam das Gespräch auch auf die Messungen, mit denen Rubens beschäftigt war. Er erzählte, dass bei seinen längsten Wellen das kürzlich von Lord Rayleigh aufgestellte Gesetz ... gelte. Eine allgemeingültige Strahlungsformel müsse jedenfalls für große T in diese Form übergehen.“¹⁵

Dieser Hinweis veranlasste Planck, seine bisherigen Arbeiten zur Wärmestrahlungstheorie und insbesondere die Ableitung des Wienschen Strahlungsgesetzes zu überdenken. Noch am selben Abend fand er eine „glücklich erratene Interpolationsformel“ für die Messergebnisse seiner Kollegen und teilte dies auch Rubens auf einer Postkarte mit. Wenige Tage später traf man sich erneut, wobei Rubens seinen Kollegen berichten konnte, dass „die neue Formel vorzüglich mit seinen Beobachtungen (überein)stimme.“¹⁶ Auf der Sitzung der Physikalischen Gesellschaft, die auf den 19. Oktober angesetzt war, berichtete dann Ferdinand Kurlbaum über die gemeinsam mit Rubens durchgeführten Experimente „Über die Emission langer Wellen durch den schwarzen Körper bei verschiedenen Temperaturen“, und Planck gab in der sich anschließenden, „eingehenden“ Diskussion einen vorbereiteten Diskussionsbeitrag¹⁷, in dem er erstmals seine Strahlungsformel der Öffentlichkeit präsentierte. Diese hatte er durch Probieren bzw. eine formale Abänderung seines früheren Entropieausdrucks für die Planckschen Oszillatoren erhalten. Statt des durch das Wiensche Strahlungsgesetz vorgegebenen Entropieausdrucks

15 G. Hettner: Die Bedeutung von Rubens' Arbeiten für die Plancksche Strahlungsformel. *Die Naturwissenschaften* **10** (1922) S. 1036.

16 Ebd.

17 Protokollbuch der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin. Archiv der DPG, Berlin.

$$\frac{d^2 S}{dE^2} = -\frac{\text{const}}{E}$$

setzte er

$$\frac{d^2 S}{dE^2} = \frac{\text{const}}{E(E + \text{const})}$$

womit er durch Integration und über mehrere Zwischenschritte die neue (Plancksche) Strahlungsformel erhielt:

$$\rho(\nu, T) = \frac{A\nu^3}{e^{\frac{B\nu}{T}} - 1}$$

wobei A und B wiederum universelle Konstanten sind, die unbestimmt und noch experimentell anzupassen waren. Die Formel stimmte mit den bekannten Messergebnissen ausgezeichnet überein.¹⁸

Acht Wochen später, am 14. Dezember 1900, und wiederum auf einer Sitzung der Physikalischen Gesellschaft, lieferte dann Planck eine erste physikalische Begründung seines ad hoc eingeführten Strahlungsgesetzes bzw. der „glücklich erratenen Interpolationsformel“, bei der nicht nur das elementare Wirkungsquantum h eine Rolle spielte, sondern die sich vor allem auf eine neue (statistische) Behandlung der Strahlungszustände gründete.¹⁹ Dieser Tag gilt heute gemeinhin

18 Vgl. die Abhandlung IV im vorliegenden Band: „Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung“ (Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft **2** (1900) S. 202–204), S. 53–55.

19 Vgl. die Abhandlung V im vorliegenden Band: „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum“ (Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft **2** (1900) S. 237–245), S. 56–64.

als Geburtstag der Quantentheorie, obwohl Planck damals noch keinerlei konkrete Vorstellungen von einer „Quantenhypothese“ besaß und sich die Erkenntnis von deren Bedeutung erst im folgenden Jahrzehnt durchsetzen sollte.

Im Mittelpunkt der damaligen Überlegungen Plancks stand vielmehr, dass er seine bisherige Skepsis gegenüber der statistischen Physik Boltzmanns aufgeben und die bislang vehement abgelehnte wahrscheinlichkeitstheoretisch-atomistische „Methode Boltzmann“ für die Bestimmung der Entropiefunktion der Strahlungoszillatoren nutzen musste – was er später als einen „Akt der Verzweiflung“ bezeichnete²⁰ –, um die neue Strahlungsformel abzuleiten. Im Rückgriff auf Boltzmanns statistische Auffassung der Thermodynamik sollte nach Planck die Entropie (S) des betrachteten Systems von Resonatoren in einem beliebigen Zustand proportional dem natürlichen Logarithmus der Wahrscheinlichkeit (W) dafür sein, dass die Resonatoren insgesamt die Energie E besitzen. Es sollte also gelten:

$$S = k \ln W$$

Über Boltzmann hinausgehend, der diesen Zusammenhang auch schon kannte, sich aber um den Proportionalitätsfaktor nicht gekümmert hatte, führte Planck für diesen die sogenannte Boltzmann-Konstante k ein, deren fundamentale Bedeutung für die gesamte statistische Physik er sofort erkannte.²¹ Um mit dem gewählten neuen Ansatz auch Statistik im Sinne Boltzmanns betreiben zu können, bediente er sich weiterhin eines Tricks, der ebenfalls auf Boltzmann

20 M. Planck an R. W. Williams, Berlin 1931. Archive for the History of Quantum Physics.

21 Vgl. die Abhandlung VII im vorliegenden Band: „Über die Elementarquanten der Materie und der Elektrizität“ (Annalen der Physik 4 (1901) S. 564–566), S. 75–77.

zurückgeht und den dieser schon 1877 für die Statistik eines molekularen Gases genutzt hatte. Er unterteilte die möglichen (kontinuierlichen) Energiezustände seiner (identischen) Oszillatoren in Zellen konstanter, aber nicht beliebig kleiner Größen bzw. „Energieelemente“ ε : 0 bis 1ε ; 1ε bis 2ε ; 2ε bis 3ε ; usw. usf. Aus der Anzahl möglicher Verteilungen ließ sich dann die Wahrscheinlichkeit des betreffenden Zustandes ermitteln und daraus die gesuchte Entropie der Oszillatoren sowie die Energiedichte des Strahlungsfeldes bestimmen.²² Da außerdem das Wiensche Verschiebungsgesetz die Proportionalität zwischen der Energie (ε) und der Frequenz (ν) fordert, wurde $\varepsilon = h\nu$ gesetzt, so dass man schließlich das endgültige Plancksche Strahlungsgesetz erhielt:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Dieses enthält neben den variablen Größen Temperatur (T) und Frequenz (ν) nur noch die drei universellen Naturkonstanten: Boltzmann Konstante (k), Lichtgeschwindigkeit (c) und das (Plancksche) Wirkungsquantum (h). Dies wird Planck mit besonderer Genugtuung erfüllt haben, war sein Erkenntnisstreben doch stets auf das Absolute gerichtet; zudem erlaubte das neue Strahlungsgesetz Präzisionsbestimmungen dieser Naturkonstanten, deren Genauigkeit – wie

²² Zu den Details des Planckschen Vorgehens vgl.

C.A. Gearhart: Planck, the Quantum, and the Historians. *Physics in Perspective* 4 (2002), S. 170–215.

C.A. Gearhart: Max Planck und die Quantentheorie. In: D. Hoffmann (Hrsg.): *Max Planck und die moderne Physik*. Heidelberg 2010, S. 95–118.

Messungen bald zeigen sollten – die bislang bekannten Methoden und Werte in den Schatten stellte.²³

Planck hat dann in den folgenden Wochen seine in den beiden Vorträgen vor der Physikalischen Gesellschaft dargelegten Erkenntnisse zusammengefasst und als separaten Aufsatz in den *Annalen der Physik* veröffentlicht.²⁴

Planck machte in seinen Originalarbeiten keinerlei konkrete Ausführungen zur physikalischen Bedeutung der eingeführten „Energiezellen“, weshalb das von Planck gewählte Verfahren kaum etwas mit dem gemein hat, was wir im modernen Sinne unter Quantisierung verstehen. Darauf hat erstmals 1978 mit aller Konsequenz der amerikanische Wissenschaftshistoriker Thomas S. Kuhn hingewiesen.²⁵ Kuhns Einschätzung ist nicht ohne Widerspruch geblieben,²⁶ doch folgen heute die meisten Physikhistoriker im Grundsatz der Kuhnschen Argumentation, dass das Plancksche Vorgehen keine Quantisierung der Resonatoren im modernen Sinne bedeutet.²⁷ Dennoch markiert Plancks Ableitung des Strahlungsgesetzes den ersten Schritt in der Einführung des Quantenkonzepts in die Physik. Planck selbst sprach erst um 1908 explizit von diskreten Energiezuständen seiner Resonatoren und noch 1906 in seinen Vorlesungen zur Theorie der Wär-

23 Vgl. R. Ladenburg: Die Methoden zur h-Bestimmung und ihre Ergebnisse. In: *Handbuch der Physik*. Herausgegeben von H. Geiger und K. Scheel. Berlin 1933, Bd. XXIII, S. 1–22.

24 Vgl. die Abhandlung VI im vorliegenden Band: „Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum“ (*Annalen der Physik* 4 (1901) S. 553–563), S. 65–74.

25 Th. S. Kuhn: *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894–1912*. New York 1978.

26 R. Jost: *Das Märchen vom Elfenbeinernen Turm. Reden und Aufsätze*. Berlin 1995, S. 67–78.

27 Vgl. O. Darrigol: *The Historian's Disagreement over the Meaning of Planck's Quantum*. *Centaurus* 43 (2001) S. 219–239.