

Sitzungsberichte

der

mathematisch-naturwissenschaftlichen

Klasse

der

Bayerischen Akademie der Wissenschaften

zu München

Jahrgang 1948

München 1949

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

In Kommission beim Biederstein Verlag München

Gedenkrede auf Max Planck¹.

Von Walther Meißner.

(Gehalten auf der Sitzung der Physikalischen Gesellschaft in Bayern
am 8. Dezember 1947 in München.)

Vorgelegt in der Sitzung vom 5. März 1948.

Meine Damen und Herren!

Wenn ich das Wort ergreife, um über unseren am 4. Oktober im Alter von fast 90 Jahren aus dem Leben geschiedenen Max Planck zu sprechen, so möchte ich zunächst begründen, inwiefern ich glaube dies wagen zu dürfen, obwohl hier unter uns Theoretiker sind, die an der Fortentwicklung der weltbewegenden Planckschen Quantentheorie intensiv mitgearbeitet haben, während ich selbst auf anderen Gebieten und sogar meist experimentell tätig war. Der Berufenste unter uns, unser verehrter Sommerfeld, hat schon auf der Physikertagung in Heidenheim über Planck gesprochen und wollte seine Rede nicht zum zweiten Male halten. Ich selbst aber habe vor anderen wohl das voraus, daß ich einer der wenigen engeren Schüler Plancks bin und von 1904 bis 1934, also 30 Jahre lang, in Berlin steten Konnex mit ihm hatte.

Bei Planck haben nur promoviert: 1897 Abraham, 1903 von Laue, 1904 Schlick, 1906 von Mosengeil, der kurz nach der Prüfung in den Alpen abstürzte, und ich selbst, 1907 Reiche, 1912 Lamla und Schottky, 1914 Bothe, und zwar mit Arbeiten über: Elektrische Schwingungen an einem stabförmigen Leiter, Interferenzerscheinungen an planparallelen Platten, Durchgang des Lichts durch inhomogene Schichten, Strahlung in einem gleichförmig bewegten Hohlraum, Strahlungsdruck auf bewegte Körper, Kompression der Hohlraumstrahlung durch eine semi-permeable Wand, Hydrodynamik des Relativitätsprinzips, Dy-

¹ Ein Verzeichnis der Veröffentlichungen Max Plancks findet sich in der Zeitschrift für Naturforschung Bd. 2a, 592, 1947. Eine wissenschaftliche Selbstbiographie erschien 1948 bei Joh. Ambr. Barth, Leipzig.

namik der Relativitätstheorie, Theorie der Brechung und Reflexion. Sicher rechnen sich zu Plancks Schülern noch viele, die nicht gerade bei ihm promovierten, aber doch seine Vorlesungen hörten, bei ihm das Lehramtsexamen machten, aus seinen grundlegenden Büchern ihr Wissen schöpften oder auf irgendeine andere Weise von ihm lernten. Der Grund für die geringe Zahl der Physiker aber, die bei Planck promovierten, hängt wohl mit seiner ganzen Art zusammen. Es seien mir einige Worte darüber gestattet, wie es mir selbst mit meiner Dissertation ergangen ist. Ich kann das erzählen, da ich damit, wie Sie gleich sehen werden, nicht mein eigenes Loblied singe. Zunächst legte ich Planck, der mich aus der Teilnahme an seinen Vorlesungen und Übungen – ich hatte seinen sechsemestrigen Zyklus von Vorlesungen ganz gehört – schon gut kannte, eine theoretische Ausarbeitung über Thermoelektrizität vor, mit der Frage, ob ich sie in erweiterter Form als Dissertation verwenden könnte. Planck sah sie sich an und sagte mir dann, es sei ja alles richtig, was ich geschrieben hätte, aber es sei doch zu einem großen Teil Kritik an anderen Arbeiten, man wisse manchmal nicht, was sich andere bei ihren Arbeiten gedacht haben, und man solle Polemiken, wenn sie nicht unbedingt nötig seien, vermeiden. Wenn ich es wolle, könne er mir aber ein anderes Thema für eine Dissertation geben: Die Theorie des Strahlungsdruckes auf den bewegten Körper. Ich sollte ihn in ähnlicher Weise berechnen, wie er es in seiner Vorlesung für den ruhenden Körper tat. Natürlich war ich damit sehr einverstanden. Ohne daß Planck sich inzwischen nach dem Stand der Arbeit erkundigte oder ich es für nötig hielt, mich von ihm beraten zu lassen, legte ich ihm nach einem halben Jahr die Reinschrift der Dissertation vor, die er erfreut entgegennahm. Nach 14 Tagen sprach er mich auf der Straße an und sagte, an meiner Arbeit stimme etwas nicht. Bald darauf aber teilte er mir mit, es sei doch alles in Ordnung, und die Arbeit wurde ohne Änderung auch nur eines einzigen Wortes gedruckt, erhielt aber nur die Note „gut“. Schon damals wunderte ich mich nicht hierüber, da ich keineswegs das Gefühl hatte, eine besonders ausgezeichnete Leistung zustande gebracht zu haben, obwohl ich nicht nur die gestellte Aufgabe in der gewünschten Art und

Weise gelöst, sondern auch noch das Drehmoment auf eine planparallele, nicht leitende Platte und ähnliches berechnet hatte. Der Strahlungsdruck auf den bewegten Spiegel war nämlich, wie ich in der Dissertation angab, was aber, ohne daß ich es ahnte, Planck bei der Stellung der Aufgabe entgangen war, schon von Abraham, allerdings nicht so allgemein wie von mir und in ganz anderer Weise berechnet worden. Meine Arbeit brachte also kein grundsätzlich neues Resultat. Aber aus dem Gesagten geht jedenfalls hervor, daß Planck von seinen Schülern eine sehr große Selbständigkeit erwartete und einen strengen Maßstab bei der Beurteilung ihrer Arbeiten anlegte, übrigens auch bei den Prüfungen. Seine eigene Dissertation über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie hatte Planck auch, ohne daß ihm das Thema gestellt war und ohne daß er bei der Ausarbeitung beraten wurde, vorgelegt.

Es wird nicht allen, die bei Planck die Promotionsprüfung ablegten, gerade ebenso wie mir selbst ergangen sein. Aber das Geschilderte ist doch für Plancks Art charakteristisch. Er wollte offenbar nur solche Doktoranden, die selbständig theoretisch arbeiten konnten. Wir müssen noch hinzufügen, daß Planck keinen Institutsbetrieb hatte. Nach Vorlesung und Übungen ging er in der Regel nach Hause und arbeitete dort weiter.

Plancks Vorlesungen, die ich, wie ich schon sagte, alle gehört habe, waren bis ins kleinste vorbereitet und von unübertrefflicher Klarheit. Sie anzuhören war ein ästhetischer Genuß. Besonders lebhaft, als ob es gestern war, ist mir die Vorlesung im Wintersemester 1905/06 in Erinnerung, in der Planck zum ersten Male seinen Hörern über die Quantentheorie und das elementare Wirkungsquantum vortrug. Es kam dabei seine ganze Bescheidenheit zum Ausdruck. Fast war es so, als ob er sich genierte, über seine eigenen neuen Ideen zu sprechen, die seinen Schülern darzulegen doch schon unumgänglich nötig war. Durch die Vorlesungen und Übungen Plancks wurden seine Schüler nicht nur in die theoretische Physik eingeführt, sondern sie lernten auch an alle Fragen in gründlicher, logisch einwandfreier Weise herangehen.

Die Ausgeglichenheit und Vornehmheit, die in seinen Vorlesungen zum Ausdruck kam, waren in Plancks tiefstem Wesen

begründet. Er hat sich sein ganzes Leben so eingerichtet, daß er aus seiner Begabung das Größtmögliche herausholen konnte. Es ist ja bekannt, daß Planck ursprünglich zweifelte, ob er Musiker oder Physiker werden sollte, und daß er auch als Physiker nebenbei die Musik immer eifrig betrieben hat. Sein Tag war genau eingeteilt, so daß von ihm immer eine Stunde der Musik gewidmet wurde, was für ihn eine Erholung bedeutete. In jüngeren Jahren betätigte er sich sogar in München als Dirigent. Er besaß die seltene Gabe des absoluten Tonbewußtseins. Besonders interessierte er sich auch für das Spiel auf einem in mehreren Tonleitern reingestimmten Harmonium, das natürlich wegen der größeren Anzahl der Tasten nicht leicht ist. Später hat er in seinem Hause in der Kolonie Grunewald einen aus Bekannten und Schülern eingerichteten Chor geleitet. Aber nicht nur in der Musik suchte er Erholung. Regelmäßig verbrachte er jedes Jahr mehrere Wochen im Gebirge, wobei er auch schwierige Klettertouren durchführte. Noch mit 70 Jahren machte er eine Hochtour. So gilt für ihn wie selten der Spruch: In corpore sano mens sana. Um sich trotz dieser geregelten Lebensweise in genügendem Umfange seinen physikalischen Forschungen widmen zu können, mußte er natürlich eine weise Beschränkung ausüben, und so erklärt es sich wohl, daß er auf einen regelrechten Institutsbetrieb verzichtete. Wo es ihm aber wichtig schien, setzte er dann auch wieder seine ganze Persönlichkeit für die Allgemeinheit ein. So besonders in der Physikalischen Gesellschaft, in der er viele Jahre lang im Vorstand tätig war. An der Gründung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, die aus der zunächst allein bestehenden Physikalischen Gesellschaft zu Berlin hervorging, war er maßgebend beteiligt. Ihm lag hier besonders daran, unter den Physikern einen engen Konnex in wissenschaftlicher und menschlicher Beziehung herzustellen. Ebenso gründlich widmete er sich der Berliner Akademie der Wissenschaften, zu deren „beständigen Sekretären“ er etwa 40 Jahre lang gehörte. Einem noch größeren Kreise kamen seine organisatorischen Fähigkeiten und seine unbedingte Zuverlässigkeit zugute, als er 1930 Präsident der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaften wurde. Auch als Herausgeber der „Annalen der Physik“ hat er viele Jahrzehnte lang segensreich gewirkt, wobei er vor-

übergehend, als es notwendig war, auch die Schriftleitung übernahm. Darüber hinaus stand er auch in besonderen Fällen, wo sein Urteil wichtig war, mit seinem Rat zur Verfügung, so zum Beispiel als Berater der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft bzw. ihres Leiters, Exzellenz Schmidt-Ott. Ich entsinne mich noch sehr gut einer Sitzung, zu der ich eingeladen war und in der von Schmidt-Ott und Planck darüber beraten wurde, wo in Deutschland ein großes Kälteinstitut errichtet werden sollte. Wenn die Wahl, obwohl Göttingen Schmidt-Ott viel mehr am Herzen lag als Berlin, auf Berlin fiel und die Gründung und Leitung des Kälteinstituts mir übertragen wurde, so war dies sicherlich in der Hauptsache auf die Meinungsäußerung von Planck zurückzuführen, und sicher kam für ihn dabei nicht persönliche Anteilnahme in Frage, sondern die Überzeugung, daß in Berlin, wo ich schon eine Wasserstoff-Verflüssigungsanlage geschaffen hatte und im Begriffe war, eine Helium-Verflüssigungsanlage einzurichten, das Kälteinstitut im Rahmen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt am raschesten zu intensiver Arbeit kommen konnte. Daß es trotzdem besser gewesen wäre, es nach Göttingen zu legen, wo es jetzt unversehrt stände, während es in Berlin restlos zerstört wurde, konnte ja damals niemand voraussehen.

Woran sich Planck auch regelmäßig und lebhaft beteiligte, war das Berliner physikalische Colloquium. Eine besondere Blütezeit desselben war es, als auch Nernst, Einstein und v. Laue in Berlin waren. Es zeigte sich so recht der Unterschied in den verschiedenen Wesensarten. Planck war mit seinen Diskussionsbemerkungen immer überaus vorsichtig. Laue war die Seele des Colloquiums. Einstein und Nernst aber waren diejenigen, die zu jedem Thema etwas mit erstaunlicher Geistesgegenwart zu bemerken wußten, ohne erst lange zu überlegen. Wiederholt kam es vor, daß Einstein sagte, er möchte eine ganz dumme Frage stellen. Fast immer zeigte sich dann aber, daß diese Frage keineswegs dumm, sondern eher genial war. Ein paarmal, als außer Einstein auch Ehrenfest im Colloquium war, ging es besonders lebhaft zu. Planck aber behielt immer seine große Abgeglichenheit und Vornehmheit. Einmal ist mir freilich in Erinnerung, daß sich in Plancks Gesicht bei einem

Referat von mir ein ganz großer Schrecken ausdrückte, als ob ich eine große Dummheit gesagt hätte. Ich referierte damals über eine Arbeit Kapitzas „Erzeugung hoher Magnetfelder bis 100000 Gauß“. Ich sagte, daß die Dynamomaschine, die den Strom zur Erzeugung des Magnetfeldes lieferte, während einiger hundertstel Sekunden die tausendfache Energie, die der Antriebsmotor zuführte, abgebe. Als ich dann hinzufügte, das widerspräche aber nicht dem Energieprinzip, sondern der Überschuß an Energie würde von der sich verringernden kinetischen Energie des Ankers der Dynamomaschine geliefert, glätteten sich Plancks Züge wieder. In den 30er Jahren wurde Planck im Colloquium zu einem großen Schweiger. Er hörte nur noch zu, um auf dem laufenden zu bleiben, ohne jemals noch in die Diskussion einzugreifen. Auch diese Beschränkung ist charakteristisch für das Wesen Plancks. Er hatte wohl das Gefühl, daß er nicht mehr Geistesgegenwart genug besaß, um schnell diskutieren zu können, obwohl er doch bis in sein letztes Jahr hinein noch, wenn er Ruhe und Muße hatte, so scharf denken konnte wie nur irgend jemand.

Die körperliche und seelische Gesundheit und Ausgeglichenheit befähigte Planck, auch schwere Schicksalsschläge zu überwinden und in der Arbeit einen Trost zu finden. Seine erste Frau, eine Süddeutsche, geborene Merck, verlor er schon im Alter von 48 Jahren. Von den vier Kindern, die seine erste Frau ihm schenkte, lebt niemand mehr. Die beiden Töchter, Zwillinge, starben beide im Alter von 28 bzw. 30 Jahren im Kindbett nach der Geburt des ersten Kindes, das sie von demselben Manne, der die zweite Tochter nach dem Tode der ersten geheiratet hatte, erhielten. Der älteste Sohn fiel im ersten Weltkrieg bei Thiaumont in Frankreich. Der zweite Sohn fand Ende Januar 1945 als Opfer des Nazismus einen furchtbaren Tod. Als Planck von diesem Ende erfuhr, schrieb er an Sommerfeld, daß er seinen nächsten und besten Freund verloren hätte. Er ringe um die Kraft, sein zukünftiges Leben durch gewissenhafte Arbeit sinnvoll zu gestalten. Beim Ertragen all dieses persönlichen Unglückes half ihm seine zweite Frau, geborene von Hoeßlin, eine Münchnerin, in rührender und treuer Weise. Aber auch auf das Leben des Sohnes, den sie ihm 1911 schenkte, warf das Ge-

schick einen trüben Schatten. Plancks treue Lebensgefährtin ist ihm bis zur letzten Stunde eine aufopfernde Hilfe gewesen.

Über Plancks wissenschaftlichen Werdegang und die Stätten, an denen er lebte, sei folgendes gesagt:

Planck, der am 23. 4. 1858 in Kiel geboren wurde, kam in jungen Jahren nach München, wohin sein Vater als Professor der Jura berufen worden war. Planck studierte 1875–1877 in München bei Jolly, 1877–1879 in Berlin bei Helmholtz und Kirchhoff Physik. Er legte, nach München zurückgekehrt, schon 1879 mit 21 Jahren auf Grund einer aus Berlin mitgebrachten Dissertation die Promotionsprüfung ab. Im nächsten Jahre habilitierte er sich für Physik. Mit 28 Jahren erhielt er einen Ruf als außerordentlicher Professor nach Kiel. Schon drei Jahre danach, 1889, wurde er, wohl hauptsächlich auf den Vorschlag von Helmholtz, als Nachfolger von Kirchhoff auf den Berliner Lehrstuhl für theoretische Physik berufen und 1892 zum Ordinarius befördert. In Berlin blieb er, bis ihn der Krieg, dem auch sein Haus zum Opfer fiel, zwang, Berlin zu verlassen. Nach vorübergehendem Aufenthalt in Rogätz a. d. Elbe wurde er noch rechtzeitig von den Amerikanern nach Göttingen gebracht, wo er seit 1945 bei seiner Nichte und deren Mann zusammen mit seiner Frau wohnte. Während der letzten Monate seines Lebens war er allerdings schon in eine Göttinger Klinik überführt, wo seine Gattin ein Zimmer mit ihm teilte.

Wenden wir uns nun aber zu Plancks wissenschaftlicher Tätigkeit. Seine weltbewegende Bedeutung hier im Kreise von Physikern betonen, hieße „Eulen nach Athen tragen“. In den Zeitungen war es in diesen Tagen zu lesen, daß ähnlich wie Newton dem Ende des 17. und dem 18. Jahrhundert, Planck dem 20. Jahrhundert durch die Quantentheorie ein neues Gesicht gegeben hat. Aber für den Physiker ist es doch wohl interessant, die wissenschaftliche Arbeit Plancks in ihren großen Zügen wieder einmal zu verfolgen. – Seine Doktordissertation über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie gab vor allen Dingen einen neuen Beweis für ihn. Der Ausgangspunkt für den Clausiusschen Beweis war, daß der Übergang von Wärme von einem Körper höherer zu einem von niedriger Temperatur auf keine Weise vollständig rückgängig gemacht werden kann.

Planck dagegen ging davon aus, daß die Ausdehnung eines Gases oder sonstigen Körpers, falls sie ohne Arbeitsleistung vor sich geht, auf keine Weise wieder vollständig rückgängig zu machen ist. Er zog diesen Ausgangspunkt vor, wie er sagte, weil bei ihm im Gegensatz zum Vorgehen von Clausius nur von einem Körper die Rede ist. Er konnte so den Beweis, fast ohne Kreisprozesse heranzuziehen, nur mit Benutzung von thermodynamischen Funktionen durchführen. Hierdurch tritt die Entropiefunktion stark in den Vordergrund und ihre Bedeutung für irreversible Prozesse.

Der Eindruck von Plancks Dissertation war nach seinen eigenen Worten gleich Null. Helmholtz hat sie wohl überhaupt nicht gelesen. Kirchhoff lehnte ihren Inhalt ausdrücklich ab. Es ist kennzeichnend, sowohl für Plancks Sicherheit und Überlegenheit des Denkens wie für seine glückliche Charakteranlage, daß er sich durch die fehlende Anerkennung nicht entmutigen ließ, sondern auf dem eingeschlagenen Wege beharrte, der ihn später gerade zu seiner größten Leistung, der Aufstellung der Quantentheorie befähigte. Bis zum Jahre 1897 befaßte sich Planck fast ausschließlich mit thermodynamischen Arbeiten. Einen schönen zusammenfassenden Bericht über sie gab v. Laue in seinem Vortrag, den er bei der Feier von Plancks 60. Geburtstag 1918 in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Berlin hielt. Die 1880 erschienene Habilitationsschrift behandelt die thermodynamische Theorie des Schmelzens und des Verdampfens. Mit Hilfe der Bedingung des Entropiemaximums und mit den Nebenbedingungen konstanter Energie, konstanter Masse und konstanten Volumens konnte Planck das Problem vollständig lösen und die Clausius-Clapeyronsche Gleichung sowie damit verwandte Formeln ableiten. Die Ergebnisse waren zum mindesten bis zu einem gewissen Grade neu. Es folgten Arbeiten über die Theorie des Sättigungsgesetzes, vor allem die Verdampfungskurve der Kohlensäure, und über Verdampfen, Schmelzen, Sublimieren, wobei Planck den wichtigen Satz bewies, daß das absolute Entropiemaximum stets der größten möglichen Zahl von Phasen entspricht. Er behandelte weiter das thermodynamische Gleichgewicht von Gasgemengen, wobei er zum ersten Male die Helmholtzsche freie Energie benutzte. Die

thermodynamischen Untersuchungen wurden unterbrochen durch Herausgabe von Clausius' „Mechanischer Wärmetheorie“ und durch seine 1887 als Buch erschienene Schrift „Das Prinzip der Erhaltung der Energie“, das von der Philosophischen Fakultät der Universität Göttingen preisgekrönt wurde. Noch heute ist es ein Genuß, diese klare und umfassende Schrift zu lesen, in der die Arbeiten von Robert Mayer, Joule und Helmholtz ausführlich behandelt sind und in der Planck auch Eigenes gab. Er wandte sich dann der Behandlung der chemischen Vorgänge zu. In den drei Abhandlungen aus dem Jahre 1887 über die Zunahme der Entropie behandelte er das heterogene Gleichgewicht, das dem Gleichgewicht zwischen verschiedenen Aggregatzuständen entspricht, das Massenwirkungsgesetz für Gasgemische und die Ableitung der thermodynamischen Funktionen einer verdünnten Lösung, insbesondere ihrer Entropie. Sein Ergebnis ging über das von Van 't Hoff hinaus. Der bei Van 't Hoff in die Siedepunktserhöhung eingehende sogenannte Aktivitätskoeffizient mußte, wie Planck zeigte, nach dem zweiten Hauptsatz den Wert 1 haben. Experimentelle Abweichung vom Werte 1 war nur möglich durch Spaltung der gelösten Moleküle. Wenn Planck 1943 in seiner Abhandlung „Zur Geschichte der Aufindung des elementaren Wirkungsquantums“ sagt, daß ihm in bezug auf fruchtbare Ergebnisse bei seinen thermodynamischen Arbeiten der große amerikanische Theoretiker Gibbs zuvorgekommen sei, so können wir dies doch nur bedingt zugeben, da einzelne Resultate Plancks doch bahnbrechend waren. Wichtig für das Spätere ist auch, wie sicher Planck sich gegenüber Einwendungen anderer schon damals fühlte und wie er die Verwendung von idealen Prozessen schon verteidigte. Er weist dabei auch auf die Verwendung der idealen halbdurchlässigen Wände durch Gibbs und Van 't Hoff hin und sagt: „Angesichts ihrer unzweifelhaften Erfolge wird man nicht umhin können, die geschilderten idealen Prozesse als ein höchst wertvolles Hilfsmittel der Forschung anzuerkennen und zu erwarten, daß sie richtig angewendet uns auch fernerhin die Erkenntnis neuer Wahrheiten vermitteln können. Ja, ich stehe nicht an, sie für einen besonderen Triumph des menschlichen Geistes zu halten, der mit ihrer Hilfe den Zusammenhang der Naturgesetze bis in Gebiete

hinein verfolgen kann, die dem direkten Experiment gänzlich verschlossen sind.“

Nach einigen kleineren Arbeiten folgte 1891 ein vierter Teil der großen Arbeit über das Prinzip der Vermehrung der Entropie, der die Theorie des Thermoelementes und der elektrolytischen Konzentrationskette brachte.

1897 erschien schließlich die erste Auflage von Plancks Vorlesungen über Thermodynamik. Auch in diesem Buch sind noch mancherlei neue Ergebnisse enthalten, zum Beispiel das Gesetz über den Einfluß von Temperatur und Druck auf das Gleichgewicht zwischen beliebig vielen Phasen von beliebiger Zusammensetzung.

Plancks Vorlesungen über Thermodynamik sind auch im Ausland weit verbreitet.

Seit 1896 wandte sich Planck neuen Gebieten zu. Das Problem, das ihm nun vorschwebte, war die Durchdringung der Elektrodynamik mit der Thermodynamik, um die Gesetze der Wärmestrahlung ableiten zu können. Er war zu der Überzeugung gekommen, was er später auch direkt ausgesprochen hat, daß bei jedem physikalischen Geschehen auch das Verhalten der Entropie zu berücksichtigen sei und daß dies dementsprechend auch für die Wärmestrahlung gelte. Und auch jetzt bediente er sich wieder der idealen Prozesse, deren Berechtigung er ja bei seinen thermodynamischen Arbeiten eingehend verfochten hatte. Planck betrachtete einen evakuierten, von total reflektierenden Wänden begrenzten Hohlraum, in dem sich elektrische lineare Oszillatoren von bestimmter Eigenfrequenz und schwacher, durch Strahlung bewirkter Dämpfung befinden. Er meinte, daß die Anwendung der Maxwellschen Theorie bei beliebigem Anfangszustand der Strahlung in dem Hohlraum durch irreversible Strahlungsvorgänge zu einem stationären Zustand, nämlich dem des thermodynamischen Gleichgewichts, führen müsse. Es zeigte sich aber, worauf Planck von Boltzmann hingewiesen wurde, daß Plancks Meinung irrig war. Er mußte noch ein neues Prinzip hinzufügen, um zum Ziele zu gelangen. Dies war die Hypothese der natürlichen Strahlung, nach der die einzelnen Partialschwingungen der Wärmestrahlungswellen vollständig inkohärent sind. Erst mit dieser Hypothese

sind die Strahlungsvorgänge als irreversibel anzusehen, so daß sich ein bestimmtes thermodynamisches Gleichgewicht immer herstellt. Auf Grund dieser Irreversibilität konnte dann Planck einen Ausdruck für die Entropie eines Oszillators sowie der Hohlraumstrahlung selbst, der sogen. schwarzen Strahlung, aufstellen. Im thermodynamischen Gleichgewicht hat diese Entropie ein Maximum, und der ihm entsprechende Endzustand hängt nur von der absoluten Temperatur ab. Die Entropie ist eine Funktion der Energie und der Schwingungszahl, deren von Planck zunächst versuchte Form aber eine gewisse Willkür enthielt. Mit diesem ersten Ansatz für die Entropie gelangte Planck zu dem damals als allgemein richtig angesehenen Wienschen, im Jahre 1896 aufgestellten Gesetz für die Energieverteilung der Hohlraumstrahlung. Auf jeden Fall sah Planck schon damals, daß der Abhängigkeit der Entropie von der Energie und der Schwingungszahl die Hauptbedeutung bei der Behandlung der Wärmestrahlung ankomme. Plancks Ansatz für den Wert der Entropie wurde über den Haufen geworfen, als sich zeigte, daß das Wiensche Strahlungsgesetz durch die Messungen nicht allgemein bestätigt wurde. Insbesondere ergaben neue Messungen von Kurlbaum und Rubens, über die Kurlbaum in einer Sitzung der Physikalischen Gesellschaft im Oktober 1900 berichtete, daß mit steigender Temperatur die Intensität der schwarzen Strahlung bei langen Wellen immer angenäherter proportional der absoluten Temperatur wird entsprechend dem 1900 veröffentlichten Strahlungsgesetz von Rayleigh. Mit Rücksicht auf diesen Befund, der Planck schon einige Tage vor der Sitzung der Physikalischen Gesellschaft mitgeteilt wurde, suchte er nach einem Ausweg aus den Schwierigkeiten und fand zunächst eine empirische Lösung. Nach dem Rayleighschen Strahlungsgesetz ist, da die Energie U des Planckschen Oszillators bei bestimmter Schwingungszahl der Strahlungsintensität proportional ist, wenn T die absolute Temperatur bedeutet,

$$U = C T.$$

Mit der thermodynamischen Beziehung für die Entropie S bei konstantem Volumen

$$dS/dU = 1/T$$

wird daher

$$d^2S/dU^2 = -C/U^2.$$

Plancks erstem Ansatz für die Entropie und dem Wienschen Gesetz aber entspricht der Wert

$$d^2S/dU^2 = -1/a \nu U,$$

wenn ν die Schwingungszahl je Sekunde ist.

Planck stellte nun eine Interpolationsformel für die beiden Werte von d^2S/dU^2 auf, indem er setzte

$$d^2S/dU^2 = -1/(a \nu U + C/U^2).$$

Diese Interpolationsformel führt dann mit $dS/dU = 1/T$ unmittelbar zum Planckschen Strahlungsgesetz

$$\mathfrak{R} = U \nu^2/c^2 = c_1 \nu^3/(e^{c_2 \nu/T} - 1),$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist.

Planck teilte es noch in der Sitzung vom Oktober 1900 mit. Es wurde schon damals durch die Messungen von Kurlbaum und Rubens sowie auch durch Messungen von Lummer und Pringsheim bestätigt und die Bestätigung wurde um so besser, je genauer die experimentellen Arbeiten durchgeführt waren.

In den nächsten 14 Tagen versuchte nun Planck, die empirische Interpolationsformel theoretisch zu bestimmen. Es handelte sich nach dem Gesagten dabei hauptsächlich darum, einen einwandfreien Weg für die Berechnung der Abhängigkeit der Entropie von der Energie und der Schwingungszahl zu finden. Planck sah, daß dies mit Hilfe der Elektrodynamik nicht möglich war. Er wurde dazu geführt, sich der Methode von Boltzmann zu bedienen und mit ihm die Entropie proportional dem log. der Wahrscheinlichkeit zu setzen. Er hat dabei von vornherein die sogen. thermodynamische Wahrscheinlichkeit eingeführt, bei der im Gegensatz zur mathematischen Wahrscheinlichkeit der Nenner fehlt. Er hat später die Entropiekonstante allgemein Null gesetzt, so daß die Entropie am abs. Nullpunkt verschwindet, wodurch dem Nernstschen Wärmetheorem entsprochen, aber über dasselbe hinausgegangen wird. Planck zeigte später auch, daß seine Definition der Entropie unempfindlich gegen die Art der Berechnung der Komplexionen ist.

Planck dachte sich nun wieder ein Gebilde aus einer sehr großen Anzahl gleichartiger Oszillatoren und hatte die geniale

Idee, die Energie eines Oszillators als eine Summe von diskreten, einander gleichen Quanten von endlicher Größe zu betrachten. Nur so, also durch Einführung der Energiequanten, war es ihm möglich, mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung seine Interpolationsformel zu erhalten. Das Energiequant wurde dabei gleich dem Produkt aus der Schwingungszahl und einer neuen Konstante h , eben dem Planckschen elementaren Wirkungsquantum. Aus den experimentellen Werten der Strahlungskonstanten konnte Planck nicht nur das elementare Wirkungsquantum h numerisch berechnen, sondern auch den Proportionalitätsfaktor k in dem Boltzmannschen Ausdruck für die Entropie sowie den Wert e der Ladung des elektrischen Elementarquantums. Es ergaben sich die Werte

$$k = 1,346 \cdot 10^{-16} \text{ erg/Grad}; \quad h = 6,55 \cdot 10^{-27} \text{ erg s}; \\ e = 4,69 \cdot 10^{-10} \text{ elektrost. E.}$$

Plancks Strahlungsgesetz nahm die Formen an:

$$\mathfrak{R} = U \nu^2/c^2 = h \nu^3/c^2 (e^{h\nu/kT} - 1),$$

so daß die Konstanten c_1 und c_2 universell bestimmt sind.

Die heute als die bestangesehenen Werte der Konstanten k , h und e sind die folgenden:

$$k = 1,3807 \cdot 10^{-16} \text{ erg/Grad}; \quad h = 6,626 \cdot 10^{-27} \text{ erg s}; \\ e = 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ elektrost. E.}$$

Man sieht, wie erstaunlich gut schon die von Planck 1900 berechneten Werte waren. Die Konstante k , die von Boltzmann überhaupt nicht benutzt worden war, hat Planck zum ersten Male berechnet, wie Planck mehrfach, z. B. in seiner Nobelpreisrede, betont. Man sollte sie daher nicht als Boltzmannsche, sondern zum mindesten als Boltzmann-Plancksche Konstante bezeichnen. Die Berechnung des elektrischen Elementarquantums e aus Strahlungsmessungen wurde zunächst von vielen nicht ernst genommen, obwohl sie die um 1900 bei weitem genaueste Ermittlung war. Dies zeigten aber erst die Messungen von Geiger und Rutherford im Jahre 1908. Wie Rutherford später sagte, machte die Berechnung Plancks auf ihn einen überwältigenden Eindruck.

Bei seiner ersten Ableitung des Strahlungsgesetzes hat Planck angenommen, daß sowohl die Ausstrahlung durch die Oszilla-

toren wie die Absorption durch die Resonatoren quantenmäßig erfolge. Diese Darstellung findet sich auch in den 1906 erschienenen Vorlesungen von Planck über die Theorie der Wärmestrahlung. Das sind die im Wintersemester 1905/06 gehaltenen Vorlesungen, die ich, wie schon erwähnt, mitanhörte. Später hat Planck statt der quantenhaften Absorption vorübergehend eine kontinuierliche Absorption zugrunde gelegt. Aber diese Ableitung hatte nichts recht Befriedigendes an sich. Ich besinne mich noch darauf, wie Nernst in der Sitzung der Physikalischen Gesellschaft in Berlin, in der Planck über die neue Ableitung seines Gesetzes vortrug, ihr gleich widersprach und von etwas Ähnlichem wie den Einsteinschen Photonen redete, so daß Planck ganz bedrückt die Sitzung verließ. Trotzdem blieb er zunächst bei seiner neuen Ableitung.

Der Grund für die Schwierigkeiten lag tief. Er lag in der Doppelnatur des Strahlungsquanten, das sich je nach den Umständen wie eine Korpuskel oder wie eine Welle verhält. Es ist bekannt, daß zuerst von Einstein mit durchschlagendem Erfolge die Hypothese eingeführt wurde, daß nicht nur die Emission quantenhaft erfolgt, sondern daß sich auch die Licht- und Wärmestrahlen als Quanten, sogen. Photonen, gradlinig fortpflanzen. Aber schon die Einsteinsche Ableitung des Planckschen Gesetzes mit Hilfe der in einem Hohlraum hin und her fliegenden Photonen enthielt die Doppelnatur der Photonen; denn es wurde den Photonen dabei eine bestimmte Schwingungszahl zugeschrieben. Die Doppelnatur des Photons zeigt sich besonders auch in den Energieschwankungen, die in der Strahlung vorhanden sind. Sie setzen sich zusammen aus einem Glied, das proportional dem Energiequant und der mittleren Energie, also quantenmäßig bedingt ist, und einem Glied, das dem quadratischen Mittelwert der Energie proportional ist. Auch dieses Einsteinsche Gesetz der Energieschwankungen hat Planck näher behandelt.

Er hat sich auch noch weiter mit den einschlägigen Fragen befaßt. Es sei in dieser Beziehung besonders auf folgendes hingewiesen:

In einer Mitteilung an das Franklin-Institut knüpft Planck 1927 an die Fortführung der Quantentheorie durch de Broglie, Heisenberg, Born, Jordan, Schroedinger und andere an.

Er führt folgendes aus: „Die klassische Theorie kennt und behandelt nur die beiden extremen Fälle, korpuskulare Bewegungen und Wellenbewegung. Nach dem neu gewonnenen Standpunkt gibt es aber weder eine rein korpuskulare noch eine reine Wellenbewegung. Sobald bei der Bewegung eines materiellen Punktes das Verhältnis des Impulses zu der Bahnkrümmung, das bei der gradlinigen Bewegung unendlich groß ist, auf die Größenordnung des Wirkungsquantums h sinkt, beginnen die Wellengesetze merklich zu werden. Umgekehrt: Sobald für einen monochromatischen Lichtstrahl das Verhältnis seiner Energie zu seiner Frequenz, das für ein statisches Feld unendlich groß ist, auf die Größenordnung des Wirkungsquantums sinkt, beginnen die Korpuskulargesetze sich bemerkbar zu machen. Die Beziehung zwischen Korpuskulargesetzen und Wellengesetzen im allgemeinen Fall zu finden ist die große Aufgabe.“

Um diese Synthese hat sich Planck nun in 1940–1941 erschienenen Annalenarbeiten bemüht. Er geht aus von der Schroedingerschen Wellenmechanik, bei der das Wirkungsquantum einen endlichen Wert hat, und fragt sich, wie ist die Wellenmechanik zu modifizieren, damit sie restlos in die Korpuskularmechanik übergeht, falls das Wirkungsquantum h gegen Null geht. Es gelingt Planck, der zeitabhängigen Schroedinger-Gleichung eine solche Form zu geben, daß das Glied mit h für $h \rightarrow 0$ verschwindet, allerdings nicht immer für den ganzen Konfigurationsraum. Unter Umständen bleibt ein gewisser Bezirk übrig, in dem der Übergang nicht möglich ist, wo also allein die Wellenmechanik zuständig ist, während im übrigen Konfigurationsraum die Korpuskularmechanik als ein Spezialfall der modifizierten Wellenmechanik erscheint. Planck erläutert das am kontinuierlichen Spektrum des Wasserstoffatoms. Allerdings ist manches von diesen Untersuchungen Plancks schon in früheren Arbeiten von Kramers zu finden. Neu ist die abgeänderte Wirkungsfunktion und die Abänderung der Randbedingungen der Wellenmechanik.

Fragt man sich, welche Ableitung des Planckschen Strahlungsgesetzes heute als die einwandfreieste anzusehen ist, so kann man wohl folgendes sagen: Die Quantenmechanik hat gezeigt, daß als Statistik für gleichartige Teilchen nur die Bose-

Einsteinsche oder die Fermische Statistik in Betracht kommen, die letzten aber nur, falls das Pauli-Prinzip anzuwenden ist. Will man sich bei der Ableitung des Strahlungsgesetzes ganz von der mit der Quantentheorie nicht zu vereinbarenden klassischen Elektrodynamik freihalten, so kann man mit Bose folgendermaßen vorgehen: Man postuliert folgendes: 1. Die Strahlung ist aus Lichtquanten von der Größe $h\nu$ zusammengesetzt, die einer der relativistischen Beziehung zwischen Energie und Masse entsprechenden Impuls haben. 2. Das aus den Koordinaten und Impulsen des Lichtquants zusammengesetzte sogen. Phasenvolumen ist aus Zellen von der Größe h^3 zusammengesetzt. Dann führt die Definition der Entropie als k mal dem Logarithmus der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit und die Bose-Einstein-Statistik, angewandt auf eine in einem gegebenen Volumen eingeschlossene, im thermodynamischen Gleichgewicht befindliche Strahlung von gegebener Gesamtenergie ohne weitere Annahmen zum Planckschen Strahlungsgesetz. Die Sache ist dabei freilich auf den Kopf gestellt, indem das, was Planck aus seiner Ableitung des Strahlungsgesetzes folgerte, als Postulat aufgestellt wird. Aber dieses Postulat ist eben heute durch zahllose Experimente so gesichert, daß es berechtigt ist, es nunmehr als gegebene Tatsache zum Ausgangspunkt der Berechnungen zu machen.

Und darin zeigt sich wohl gerade die ganze Genialität Plancks, daß er trotz aller formal entstehenden Schwierigkeiten mit sicherem Instinkt als einzig möglichen Ausweg aus der festgefahrenen klassischen Theorie das Bestehen von diskreten Energiequanten von der Größe $h\nu$ sah, das heute als ein fundamentales Gesetz anzusehen ist, wohl von ähnlicher Zuverlässigkeit wie der Energiesatz und der Entropiesatz. *Während die Zahl und Art der Elementarteilchen in neuester Zeit immer mehr anwächst, gibt es immer noch nur ein einziges elementares Wirkungsquantum, das Plancksche h .*

Freilich, das Rätsel der Doppelnatur von Korpuskel und Lichtquant ist auch durch Boses Ableitung von Plancks Gesetz nicht gelöst, sondern sie ist nur als Tatsache eingeführt. Auch die Frage, ob das Kausalitätsprinzip im Bereich der Quantentheorie versagt, ob die bei Zugrundelegung der New-

tonschen Punktmechanik logisch bedingte Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation der Weisheit letzter Schluß ist, wird dabei nicht berührt. Planck selbst sah bis zuletzt die restlose Klärung dieser Fragen als eine noch zu lösende Aufgabe an. Denn der Schlußsatz seines Aufsatzes in den Naturwissenschaften 1943 lautete: „Ich glaube vielmehr, daß es noch grundlegender, jetzt noch nicht deutlich vorauszusehender Änderungen in unserer physikalischen Begriffsbildung bedarf, ehe die Quantentheorie denselben Grad der Vollendung erreicht, wie er seinerzeit der klassischen Theorie eigen war.“

Die überragende Bedeutung der Planckschen Entdeckung des elementaren Wirkungsquantums haben die großen Erfolge, die bei Anwendung der Quantentheorie auf allen Gebieten der Physik erzielt wurden, bewiesen. Diese Anwendungen sind heutzutage dem Physiker vielleicht geläufiger als die ursprünglichen Arbeiten Plancks. Ich brauche nur zu erinnern an das Einsteinsche lichtelektrische Grundgesetz, an die Spektroskopie, besonders die Röntgenspektren, an den Compton-Effekt, an die Theorie der spezifischen Wärme der festen Körper und der Gase, an die Berechnung der chemischen Konstanten, an die Lichtanregung durch Elektronenstoß, an die Kernphysik.

Auf den Ausbau der Quantentheorie durch Einstein, Bohr, de Broglie, Heisenberg, Schroedinger, Dirac und andere habe ich schon hingewiesen. Ich möchte hier noch besonders betonen, wie ich es schon eingangs tat, daß an dem Ausbau der Quantentheorie auch unser unter uns weilender Sommerfeld maßgebend beteiligt ist, von dessen Anteil Planck in seinem Nobelvortrag folgendes sagt: „Sommerfeld zeigte, daß aus einer sinngemäßen Erweiterung der Gesetze der Quantenteilung auf Systeme mit mehreren Freiheitsgraden und aus der Berücksichtigung der von der Relativitätstheorie geforderten Veränderlichkeit der trägen Masse jene Zauberformel hervorgeht, vor welcher das Wasserstoff- wie auch das Heliumspektrum die Rätsel ihrer Feinstruktur entschleiern mußte. Eine Leistung, vollkommen ebenbürtig der berühmten Entdeckung des Planeten Neptun.“

Besonders betonen möchte ich auch noch, daß das Plancksche elementare Wirkungsquantum und die damit zusammenhängenden Gesetze nicht nur für die reine Physik, sondern auch

für die *Anwendungen* der Physik und für die *Technik* von grundlegender Bedeutung wurden. Ich erinnere nur an die lichtelektrischen Zellen, an die technische Dosierung der Röntgenstrahlen und an die Ausnutzung der Atomenergie für technische Zwecke.

Um den Arbeiten Plancks gerecht zu werden, müssen wir auch noch erwähnen, daß Planck intensiv für die spezielle Einsteinsche Relativitätstheorie eingetreten ist und in einer großen Annalenarbeit die relativistische Behandlung der Dynamik bewegter Systeme durchgeführt hat. Planck und Nernst waren es, die Einsteins Berufung nach Berlin veranlaßten. Der allgemeinen Relativitätstheorie stand Planck, wie ich aus persönlicher Erfahrung weiß, zunächst ablehnend gegenüber. Aber lange hat er sich doch den großen Ideen, die sie enthielt, nicht verschließen können.

Wie ein roter Faden zieht sich durch alle Arbeiten Plancks das, was er selbst in dem mehrfach erwähnten Aufsatz zur Geschichte der Auffindung des elementaren Wirkungsquantums in den Naturwissenschaften 1943 mit folgenden Worten ausspricht:

„Was mich in der Physik von jeher vor allem interessierte, waren die großen allgemeinen Gesetze, die für sämtliche Naturvorgänge Bedeutung besitzen, unabhängig von den Eigenschaften der an den Vorgängen beteiligten Körper und von den Vorstellungen, die man sich über ihre Struktur bildet. Daher fesselten mich in besonderem Maße die beiden Hauptsätze der Thermodynamik.“ Daß sein Hauptinteresse immer den großen allgemeinen Gesetzen galt, zeigen auch seine Vorträge und allgemeinen Veröffentlichungen nicht rein physikalischen Inhalts. Sie betreffen zum Teil schon die Grundlagen der exakten Naturwissenschaften überhaupt und handeln vom Kausalbegriff in der Physik, vom Determinismus und Indeterminismus, vom Sinn und Grenzen der exakten Wissenschaft, von Scheinproblemen, über die Planck in Göttingen noch im Jahre 1946 vortrug. Aus dem Aufsatz über Sinn und Grenzen der exakten Wissenschaft sei ein Satz zitiert, der besonders charakteristisch für Plancks Denkungsart ist: „Das Einzige, was wir mit Sicherheit als unser Eigentum beanspruchen dürfen, das höchste Gut, was uns keine Macht

der Welt rauben kann, und was uns wie kein anderes auf die Dauer zu beglücken vermag, das ist eine reine Gesinnung, die ihren Ausdruck findet in gewissenhafter Pflichterfüllung.“ Erwähnt seien auch Plancks Aufsätze zum 70. Geburtstag von Sommerfeld, zum 60. Geburtstag seines „ihm am nächsten stehenden Schülers“ Max von Laue und zur 100. Wiederkehr der Entdeckung des Energieprinzips durch Robert Mayer.

Viele Ehren sind auf Planck im Laufe seines Lebens gehäuft worden und haben ihn dafür entschädigt, daß ihm anfänglich die Anerkennung versagt wurde. Er war Mitglied aller deutschen (der Bayerischen seit 1911) und vieler ausländischen Akademien, z. B. der Royal Society in London, auf deren Einladung hin er noch 1946 an der Newton-Feier in London teilnahm. Planck war vielfacher Ehrendoktor, u. a. Ehrendoktor von Cambridge. Er erhielt die Lorentz-Medaille und als wohl größte Anerkennung 1919 für sein Strahlungsgesetz den Nobelpreis.

Planck ist in seinem langen Leben viel gefeiert worden. Besonderen Anlaß dazu bot sein 60., 70. und 80. Geburtstag. Der 60. Geburtstag wurde von der Physikalischen Gesellschaft in Berlin durch Reden von Warburg, v. Laue, Sommerfeld und Einstein gefeiert. Auch sein 70. Geburtstag wurde in Berlin in der Physikalischen Gesellschaft und in seinem eigenen Hause gefeiert. Besonders imponierend war die Feier seines 80. Geburtstages im Harnack-Haus in Berlin, bei der Ramsauer, Grüneisen, Debye, v. Laue und der französische Botschafter François Poncet sprachen. Der letztere nahm an Stelle von de Broglie die diesem verliehene goldene schöne Planck-Medaille entgegen, deren Spiegelbild von Sommerfeld bei seiner Heidenheimer Rede an die Wand projiziert wurde. Außer de Broglie haben noch die folgenden Forscher die Planck-Medaille erhalten: Planck selbst, Einstein, Bohr, Sommerfeld, v. Laue, Heisenberg, Schroedinger, Hund, Jordan, Kossel¹.

Am Abend von Plancks 80. Geburtstag sprachen noch Sommerfeld, Fokker für die holländischen Physiker, Kopff für die Astronomen. Sowohl vormittags wie am Abend fand Planck schlichte, vornehme Worte des Dankes.

¹ 1948 auch noch Max Born.

Ich habe Planck noch in den letzten Jahren mehrmals gesprochen. Zuletzt Anfang September des Jahres bei der Göttinger Physikertagung, also 4 Wochen vor seinem Tode. Obwohl er damals schon im Krankenhaus war, freute er sich doch noch über meinen Besuch.

Wir haben dann Planck am 7. Oktober in Göttingen zur letzten Ruhe geleitet. An seinem Sarge sprachen die Nobelpreisträger v. Laue und Hahn. Laue schloß mit den Worten: „Und dann liegt da noch ein schlichter Kranz ohne Schleife. Den habe ich für die Gesamtheit seiner Schüler niedergelegt, zu denen auch ich mich ja zähle, als ein vergängliches Zeichen unserer unvergänglichen Liebe und Dankbarkeit.“ – Diese Worte waren mir ganz aus dem Herzen gesprochen.