

Vortrag im Rahmen des Festkolloquiums "... die Schätze, die Plancks Genie zu Tage gefördert hat"
am 23. April 2025 in Kiel – *Vortragsmanuskript*

Max Planck und die Quantentheorie

Arne Schirmmacher

Einführung [Folie 1]

[2]

Es gibt wohl keine andere große wissenschaftliche Leistung, die sich in einem einzelnen Buchstaben zusammenfassen lässt: h . Vor 125 Jahren gab Max Planck mit der Etablierung des Wirkungsquantums h den Startschuss zur Quantentheorie, die 25 Jahre später mit der Aufstellung der Quantenmechanik endgültig zu einem Durchbruch für ein neues Verständnis der Natur führte.

Die Grundgleichung dieser Quantenmechanik ist schon etwas komplizierter, aber sie besagt, dass genau Planck's h den Unterschied macht zwischen der klassischen Mechanik, in der bei der Multiplikation von Größen, die den Ort und die Geschwindigkeit eines Teilchens angeben, die Reihenfolge keine Rolle spielen kann, und der Quantenmechanik, wo genau das der Fall ist: p mal q und q mal p unterscheiden sich um eine Differenz in der Größe des Planckschen Wirkungsquantums h .

Ich werde in meinem Vortrag nicht viel tiefer in die physikalische Materie und ihre mathematische Formulierung einsteigen – dazu ist nicht die Zeit. Aber schauen wir uns noch einmal kurz an, mit welchen Worten Max Planck am 14. Dezember 1900 sein h als zentrales Element der Theorie der Strahlung schwarzer Körper einführte:

[3]

auf die N Resonatoren mit der Schwingungszahl ν . Wenn E als unbeschränkt teilbare Grösse angesehen wird, ist die Verteilung auf unendlich viele Arten möglich. Wir betrachten aber — und dies ist der wesentlichste Punkt der ganzen Berechnung — E als zusammengesetzt aus einer ganz bestimmten Anzahl endlicher gleicher Teile und bedienen uns dazu der Naturconstanten $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$ [erg \times sec]. Diese Constante

mit der gemeinsamen Schwingungszahl ν der Resonatoren multiplicirt ergibt das Energieelement ϵ in erg, und durch Division von E durch ϵ erhalten wir die Anzahl P der Energieelemente, welche unter die N Resonatoren zu verteilen sind.

Diese Passage lässt sich rückblickend natürlich wunderbar lesen, als ob Planck hier bereits von Energiequanten spricht, etwa wie sie einige Jahre später als Lichtquanten von Einstein postuliert werden. Aber wenn man weiter liest, sieht man schnell: da stimmt was nicht. Wäre nämlich die Energie in Portionen “quantisiert”, müsste jede Energie, die man misst, ja einer bestimmten Zahl von Energieelementen – oder Quanten – entsprechen. Bruchstücke von Quanten kann es ja per Definition nicht geben. Planck schreibt aber im letzten Satz, genau das:

[4]

Wenn der so berechnete Quotient keine ganze Zahl ist, so nehme man für P eine in der Nähe gelegene ganze Zahl.

Was tun? Genau an solchen Stellen trennen sich bisweilen die Ansichten von Wissenschaftlern und insbesondere Autoren populärer Bücher und die der Wissenschaftshistoriker.

Wir wollen doch nicht wirklich unsere liebgewonnenen Geschichten zu den genialen Entdeckungsmomenten dreingeben. Hat nicht Planck selbst von einem “Akt der Verzweiflung” geschrieben, also einem genialen Entdeckungsmoment, der die Quantentheorie begründete?

Diese Geschichten, die ich hier einmal als Quantenmythen bezeichne, gibt es in vielen Variationen. Eine besonders verbreitete, ist die Geschichte von “ h als Hilfsgröße”, die Planck eingeführt hätte, und dann überrascht gewesen wäre, dass diese doch eine fundamentale Konstante der Physik ist.

[5]

Das war ohne Quellenangabe zwanzig Jahre lang auf Wikipedia zu lesen und wurde fleißig verbreitet. Ein anderer Quantenmythos, den sie alle kennen, ist Heisenbergs angebliches “Heureka auf Helgoland” oder wie Carlo Rovelli in seinem Bestseller *Helgoland* schreibt,

[6]

als er sich im Sommer 1925 auf die Insel Helgoland zurückzieht.

Und dort hat er die zündende Idee, auf die man nur in der grenzenlosen Radikalität seiner Zwanziger kommt. Die Idee, die dazu bestimmt ist, die gesamte Physik, die gesamten Naturwissenschaften, unsere gesamte Konzeption von der Welt

auf den Kopf zu stellen. Die Idee, die die Menschheit, wie ich glaube, nach wie vor nicht verdaut hat.

Auch hier muss der Wissenschaftsgeschichte abwinken: Weder war die angebliche Idee neu – es ging um die Konzentration in der Theoriebildung auf tatsächlich messbare Größen, nicht Modellvorstellungen –, noch gibt es irgendeine verlässliche Quelle, was genau Heisenberg auf Helgoland gemacht hat. Er selbst hat dazu Jahrzehnte später verschiedene widersprüchliche Versionen präsentiert.

[7]

Wenn wir bei Max Planck erst 31 Jahre nach der Einführung des Wirkungsquantums in einem Brief an einen amerikanischen Kollegen zum ersten Mal die Formulierung “Akt der Verzweiflung” finden, ist ebenso eine gewisse Skepsis angebracht, ob das auch sein Erleben von 1900 war.

Ein realistischeres Bild der Quanten-„Revolutionen“ 1900 und 1925

Ich möchte daher versuchen, breiter und allgemeiner verständlich zu machen, was Plancks Leistung war. Die These ist, dass die Tatsache, dass Planck in der Lage war, einen wesentlichen Beitrag zur Begründung der Quantentheorie zu leisten, das Resultat langer und beständiger Forschung war, insbesondere auch während seiner Kieler Zeit.

Dieser Punkt wird besonders deutlich, wenn wir die neueren Erkenntnisse, die wir über die Etablierung der Quantenmechanik 1925 gewonnen haben und die nun langsam breiter wahrgenommen werden, auch für die Einführung des Wirkungsquantums als Grundlage der Quantentheorie 25 Jahre zuvor in Anschlag bringen.

[8]

In welcher Hinsicht gibt es Parallelen zwischen 1925 und 1900? Zwei erscheinen mir besonders wichtig:

1. Beide Quanten-„Revolutionen“ waren keine Revolutionen, sondern Prozesse, die eine langfristige Vorbereitung erforderten und in einer Reihe von Schritten stattfanden.
2. Es wurde jeweils erst im Nachhinein klar, worin das Neue, das Entscheidende oder das Revolutionäre bestand.

Bei der Quantenmechanik hat – ganz verkürzt ausgedrückt – David Hilbert ein Team von Quantenphysikern zusammengetrommelt und Max Born hat allen voran ein Forschungsprogramm definiert, das systematisch versuchte, die Grenzen der alten Quantentheorie auszutesten und wenn möglich zu

überschreiten. Die neue Institution der jungen Postdocs – Stichwort: Heisenberg – wurden zwischen München, Göttingen und Kopenhagen hin- und hergeschickt, um verschiedene theoretische und experimentelle Anregungen zu erhalten. Schließlich gelang mit vereinten Kräften – also kollaborativ – die Aufstellung der Matrizenmechanik in Göttingen. Aber erst mit Erwin Schrödingers Konkurrenz und mit der Wahrscheinlichkeitsinterpretation Borns 1926 bzw. der Unschärferelation Heisenbergs und Johan von Neumanns mathematischer Grundlegung 1927 wurde schließlich klar, was für eine „Revolution“ sich wirklich ereignet hat.

Bei der Theorie der Hohlraumstrahlung schwarzer Körper ist das Team oder der kollaborative Charakter zunächst nicht so sichtbar. Er tritt hervor, wenn man versteht, dass Plancks zentrales Anliegen weniger darin lag, die empirisch richtige Strahlungsformel zu finden, als vielmehr den tieferen Zusammenhang zwischen den bisher getrennt erscheinenden Theorien der Thermodynamik und der Elektrodynamik zu finden. Planck ging es also, wie Dieter Hoffmann es formuliert hat, darum, „die letzte Lücke im damals fast vollendet scheinenden Bau der klassischen Physik zu schließen.“ (Hoffmann, Planck S.54)

Plancks erstes Teamwork – wenn man so will – war ein virtuelles mit den großen Vorbildern der Physik, insbesondere Hermann von Helmholtz, Rudolf Clausius und Boltzmann.

Und Plancks zweites Teamwork war das mit den Experimentatoren der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, welche er ja im Berliner Kolloquium traf, wo er ja auch seine entscheidende Arbeit vortrug, oder mit denen er auch privat verkehrte.

Während Letzteres gut bekannt ist, möchte ich gleich einige Bemerkungen zu Plancks grundlegenden Programm machen und hier spielt seine Zeit als Kieler Professor eine wichtige Rolle.

[9]

Es gibt aber auch noch ein drittes Teamwork, und zwar von Studientagen an: Die „drei Holsteiner“ Max Planck, Bernhard Karsten – der Sohn des Kieler Physikprofessors Gustav Karsten – und Adolf Leopold verbündeten sich während ihres Studiums in München mit Carl Runge aus Göttingen. Sie verband nicht nur eine lebenslange Freundschaft, sie ließen auch über Jahrzehnte ein Briefftagebuch kursieren, in dem sie den anderen jeweils ihre persönlichen und wissenschaftlichen Neuigkeiten mitteilten. Hierin finden sich auch einige für uns interessante Stellen, auf die ich zurückkomme.

[10]

Mit der Doktorarbeit (einer Exegese und Verbesserung der Clausius'schen thermodynamischen Arbeiten) und der Habilitation (zu damit verbundenen Fragen der physikalischen Chemie) hatte Planck sein Thema gefunden: die Thermodynamik mit seinen beiden Hauptsätzen von der Erhaltung der Energie und der stetigen Vermehrung der Entropie in geschlossenen Systemen. Planck war gewissermaßen in ein Gespräch mit Clausius' Schriften eingetreten und so sollte er in den folgenden Jahren sich auch mit Ludwig Boltzmann und Josiah Gibbs auseinandersetzen. In diesen virtuellen Diskussionen formulierte er seine Überzeugungen: In Clausius' unklarem Entropiebegriff erkannte Planck die Möglichkeit, diesen zu einem Maß für die Irreversibilität, d.h. für den Grad der Unumkehrbarkeit physikalische Prozesse zu machen. Und im Gegensatz zu Boltzmann wollte er die Entropievermehrung nicht als statistisch meist zutreffenden Effekt ansehen, sondern als physikalisches Grundgesetz, das fundamental alle thermodynamischen Systeme beherrscht. Kurz: Die Entropie kann niemals abnehmen, Statistik hin oder her.

Dies war Plancks Thema als junger Professor in Kiel, worüber er freilich schrieb:

[11]

„Ich war eigentlich damals der einzige Theoretiker und hatte es daher nicht so ganz leicht, wie ich mit meiner Entropie hervorkam, und die war damals nicht sehr beliebt, weil sie ein mathematisches Gespenst war.“ (27)

Plancks Kieler Hauptwerk „Über das Princip der Vermehrung der Entropie“ von 1887 war ein Plädoyer, den zweiten Hauptsatz nicht nur auf die Wärmelehre zu beschränken, sondern als physikalisches Prinzip zu verstehen, das in allen Gebieten der Physik gelten müsse und so auch in der Elektrodynamik mit seiner Strahlungstheorie, womit wir zur Verbindung von Entropie und Strahlungsgesetz kommen.

Zentral war bei Planck, für den ja auch die Naturkonstanten eine Art überirdische Allgemeingültigkeit haben sollten, ein „Absolutheitsanspruch“ für die Entropie, wenn sie bestimmte physikalische Gesetzmäßigkeiten beschrieb. Jegliche Annahmen von Atomtheorien oder statistischen Ergebnissen würden die „ausnahmslose Gültigkeit des zweiten Hauptsatzes“ infrage stellen. (28) Damit stellte er sich insbesondere gegen Boltzmanns Auffassungen und seine Herleitungen aus der Statistik, wo das eingeführt wurde, was wir heute als Boltzmannstatistik bezeichnen.

Dass Planck aber durchaus bereits die Forschungen über Serienspektren von Atomen und deren Beschreibung über die Balmerformel nachdachte, erklärt sich aus seiner Freundschaft mit Carl Runge, der zusammen mit Heinrich Kayser einer der führenden Forscher auf dem Gebiet war. Im Brieffagebuch schreibt Planck am 15. Juli 1888 aus Kiel:

[12]

Man könnte Plancks Programm von München über seine Jahre in Kiel bis zum Wechsel nach Berlin mit der Aufstellung der sogenannten alten Quantentheorie von Bohr und Sommerfeld vergleichen.

Bemühungen.– Die Balmer'sche Formel für die Wasserstofflinien, die ich einmal im Naturforscher las, hat mir damals aus irgend einem Grunde (ich glaube wegen einer Willkür im Einsetzen ganzer Zahlen) nicht sehr imponirt, obwohl sie ja sehr genaue Werthe liefert. Im Ganzen bin ich aber auch der Ansicht, dass die Spectralanalyse uns die wichtigsten Aufschlüsse über die Natur der Elemente zu liefern bestimmt ist; wenn man nur erst einmal den Faden gefunden hat; u. warum sollst Du ihn nicht finden? Gestern habe ich mit Adolph den Einzug unseres Kaisers u. die

Innerhalb ihrer Prinzipien definierte sie für „Atombau und Spektrallinien“ ein sehr erfolgreiches Theoriegebäude. In beiden Fällen scheiterte dieses freilich an der Empirie.

[13]

Plancks Forschungsprogramm, das auch in den Kieler Jahren sich ausgestaltete, sollte Naturgesetze wie die Strahlungsverteilung der sogenannten schwarzen Körper rein aus allgemeinen Prinzipien wie der Entropie erklären. Es gab bereits das Wiensche Strahlungsgesetz und Planck konnte es aus einer sehr einfachen Entropiebeziehung herleiten. Hier währte er sich bereits, sein Ziel erreicht zu haben: ohne Rückgriff auf irgendwelche atomistischen Vorstellungen oder Mechanismen, die Strahlung ähnlich elegant zu beschreiben, wie es für die der Wärme gelungen war.

[14]

Aber Wiens Formel stimmte nicht. Aus unserer nun gewonnenen Perspektive ist es nun nicht mehr so sehr Plancks „durch Probieren“ und eine „formale Abänderung seines früheren Entropieausdrucks“ „glücklich“ gefundene Interpolationsformel, die das Wichtige ist.

Vielmehr ist es Plancks Bereitschaft, für die notwendigen Änderung der Formel sein so lange streng und erfolgreich durchgeführtes Projekt in einem wesentlichen Teil zu revidieren und gerade Boltzmanns Methode zur Statistik von Zuständen, die er immer versucht hatte zu vermeiden, doch zu verwenden und somit auch eine Form des Atomismus zu akzeptieren.

Aber genau durch diesen Schritt, der zunächst als Niederlage daherkommt, kann er einen vielleicht viel größeren Gewinn auf einem anderen von ihm so geliebten Gebiet erzielen. Waren die beiden empirisch zu bestimmenden Konstanten, die jede Strahlungsformel enthielt, zunächst ohne tiefere Bedeutung, wurden durch die Einführung von Energieelementen und die in der Formel nun auftretenden Energiegrößen $h\nu$ und kT , gerade solche universelle Naturkonstanten eingeführt, die garantierten, dass jeder Frequenz und jeder Temperatur eine Energie zugeordnet ist. Damit wird die Proportionalität von Strahlungsfrequenz und – wie wir heute sagen – Energiequant über die Planck-

sche Konstante h sichergestellt, genauso wie die Boltzmannkonstante k sicherstellt, dass die Entropie eines Zustands streng proportional zu seiner Wahrscheinlichkeit ist.

Planck hatte nicht eine, sondern gleich zwei universelle Naturkonstanten mit einer klaren Bedeutung eingeführt.

[15 & 16]

(Hinweis auf Webseite quantum-history.de als Teil der Aktivitäten der DPG-Taskforce 2025)

A History Wall of Quantum Physics

Eine visuelle Geschichte der Quantenphysik

[17]

Natürlich gibt es aber auch klare Unterschiede zwischen den Erfolgen von 1900 und 1925.

Der deutlichste ist vielleicht, dass zumindest die Göttinger und Kopenhagener Quantenmechaniker geradezu mit einer Begeisterung für die Zerstörung alter Begrifflichkeiten vorgingen: Bahnen, Orte und konkrete Vorstellungen von den Bewegungen im Atom sollten über Bord geworfen werden, was insbesondere Heisenberg offensiv forderte, während Bohr von Komplementarität orkelte.

Ganz anders Max Planck. Nicht nur vermeidet er jegliche ontologische Interpretation seiner Prozedur mit den Energieelementen – damit wird auch der uns so irritierende Satz klar, was man machen soll, wenn die Aufteilung nicht glatt aufgeht. Er braucht viele Jahre, bis er irgendetwas äußert, was der Anerkennung einer Quantentheorie oder Quantisierung gleichkäme. Erst 1908 spricht er von diskreten Energiezuständen und bis 1913 versucht er, alternative Deutungen einer kontinuierlichen Absorption und Emission von Strahlung. Selbstverständlich blickte der äußerst skeptisch auf Einsteins Idee der Lichtquanten.

Aber damit er war der wohl produktivste Skeptiker, der Einstein, Ehrenfest, Nernst und viele andere zwang, etwa auf der ersten Solvay-Konferenz 1911 über Quantentheorie ihre Argumente und Theorien zu verbessern und weiterzuentwickeln.

[18]

Wieder gibt das Briefftagebuch einen wunderbaren Einblick in Plancks physikalisches Denken: Auf Carl Runge's Nachfrage „Ich möchte aber gerne wissen, was Du Dir von den Elementarquanten der Energie für Vorstellungen machst.“ antwortet er:

Bezüglich Carl's Frage nach meinen Vorstellungen bezüglich des Elementarquantums muss ich zunächst bekennen, dass dieselben zur Zeit noch ziemlich dürftig sind; doch möchte ich Folgendes bemerken. Vor Allem ist daran festzuhalten, dass das Elementarquantum nicht die Dimension einer Energie, sondern die einer 'Wirkung' (Energie mal Zeit) hat, dass also seine vollständige Erklärung nicht durch Betrachtung eines Zustandes, sondern nur durch Betrachtung eines Vorganges erfolgen kann. Mit anderen Worten[:] Wir haben es hier nicht mit einer Atomistik im Raum, sondern mit einer Atomistik in der Zeit zu thun, indem Vorgänge, die wir für gewöhnlich als stetig in der Zeit betrachten, in Wirklichkeit zeitliche Unstetigkeiten aufweisen. Vielleicht liessen sich die Min-

Ich kann hier leider nicht weiter auf Plancks Gedanken eingehen, weil ich gern noch auf eine andere Vergleichsperspektive mit der Geschichte der Quantenmechanik eingehen möchte.

Plancks Karriere

[19]

Wie außergewöhnlich war Plancks Karriere? Im Vergleich zu den jugendlichen Protagonisten der Quantenmechanik, auf die die Geschichte häufig reduziert wird und mit dem Begriff „Knabenphysik“ verbunden wurde (auch wenn wir mittlerweile auch eine ganze Reihe von Frauen kennen, die etwa in Göttingen wichtige Beiträge zu Quantenmechanik geleistet haben, also auch von einer „Mädchenphysik“ gesprochen werden könnte), im Vergleich dazu gelingt Planck seine große Leistung erst im Alter von 42 Jahren. Doch sollte man sich hüten, die erst in den 1920er Jahren etablierte Institution des Postdocs, als Maßstab zu verwenden. Planck war nie ein Postdoc.

[20]

Im Vergleich mit Erwin Schrödinger oder auch mit Max Born, der das Göttinger Forschungsprogramm zu einer neuen Quantenmechanik initiierte, erscheint Plancks Karriere genau im typischen Muster zu liegen. Zeiten der Qualifikation und als Privatdozent, die erlaubten sich tief in die entsprechenden Themen einzuarbeiten und die ersten Berufungen erfolgten bei allen dreien erstaunlich ähnlich. Alle sollten ihren Durchbruch in Hinblick auf die Quantentheorie bzw. Quantenmechanik etwa im Alter von 40 Jahren erreichen.

Die glorreichen Erzählungen der jugendlichen Helden führen also eher zu einer verzerrten Wahrnehmung. Eine alternative These wäre, dass große Entdeckungen oder Fortschritte in den Naturwissenschaften nicht ohne Personen gelingen, die über lange Strecken Erfahrung gesammelt haben

und ein Forschungsprogramm verfolgten, dass systematisch die Grenzen der vorhandenen Theoriegebäude austesten. Aus dem Göttinger Beispiel der 1920er Jahre ließe sich vielleicht ableiten, dass die Kombination von beidem Elementen eine besonders wirksame Konstellation für Innovationen darstellt.

Fazit

Die Perspektiven, die die jüngeren Ergebnisse der Wissenschaftsgeschichte über die Entwicklung der Quantenphysik erlauben, lassen insbesondere drei Punkte deutlich werden:

1. Die vermeintlichen Revolutionen von 1900 und 1925 sind eher Prozesse gewesen, die sich über längere Zeiträume erstreckten. Interessanterweise hat Thomas Kuhn, dessen Buch *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* eine so weitgehende Wirkung hatte, die Quantenphysik gerade nicht zu den großen Revolutionen gezählt. Stattdessen hat er später einmal die komplexe Geschichte der Quanten-Diskontinuität über den Zeitraum von 1894 bis 1912 analysiert.
2. Die Ergebnisse der Wissenschaftsgeschichte kann man sehr vereinfacht unter der Formel des Schrumpfens des Genialen zusammenfassen. Ideen kommen nicht aus dem luftleeren Raum – oder der gesunden Luft einer Nordseeinsel – sondern werden von den vielfachen Kontexten, dem Austausch zwischen Wissenschaftlern und auch mit der Öffentlichkeit beeinflusst. Je mehr die Wissenschaftsgeschichte Einflusslinien rekonstruieren kann, desto weniger Platz bleibt für das Geniale.
3. Es erscheint mir ein Missverständnis zu sein, dass Heldengeschichten und der Hinweise auf Nobelpreise für junge Forscher wirklich motivierend sind. Würde nicht vielmehr die Vermittlung eines realistischen Bildes von der heute – wie aber auch schon vor 100 Jahren – notwendigen kollaborativen Form der wissenschaftlichen Forschung eine nachhaltigere Perspektive für gute Wissenschaft darstellen?

Max Planck und die Quantentheorie

Arne Schirmmacher

Humboldt-Universität zu Berlin



Max Planck und die Quantentheorie

$$h \quad pq - qp = \frac{\hbar}{2\pi i} 1.$$



h

*Zur Theorie des Gesetzes
der Energieverteilung im Normalspectrum;
von M. Planck.*

(Vorgetragen in der Sitzung vom 14. December 1900.)

$$pq - qp = \frac{\hbar}{2\pi i} 1.$$

Wenn E

als unbeschränkt teilbare Grösse angesehen wird, ist die Verteilung auf unendlich viele Arten möglich. Wir betrachten aber — und dies ist der wesentlichste Punkt der ganzen Berechnung — E als zusammengesetzt aus einer ganz bestimmten Anzahl endlicher gleicher Teile und bedienen uns dazu der Naturconstanten $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$ [erg \times sec]. Diese Constante mit der gemeinsamen Schwingungszahl ν der Resonatoren multiplicirt ergibt das Energieelement ϵ in erg, und durch Division von E durch ϵ erhalten wir die Anzahl P der Energieelemente, welche unter die N Resonatoren zu verteilen sind.



h

*Zur Theorie des Gesetzes
der Energieverteilung im Normalspectrum;
von M. Planck.*

(Vorgetragen in der Sitzung vom 14. December 1900.)

$$pq - qp = \frac{\hbar}{2\pi i} 1.$$

Wenn E

als unbeschränkt teilbare Grösse angesehen wird, ist die Verteilung auf unendlich viele Arten möglich. Wir betrachten aber — und dies ist der wesentlichste Punkt der ganzen Berechnung — E als zusammengesetzt aus einer ganz bestimmten Anzahl endlicher gleicher Teile und bedienen uns dazu der Naturconstanten $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$ [erg \times sec]. Diese Constante mit der gemeinsamen Schwingungszahl ν der Resonatoren multiplicirt ergibt das Energieelement ϵ in erg, und durch Division von E durch ϵ erhalten wir die Anzahl P der Energieelemente, welche unter die N Resonatoren zu verteilen sind.

Wenn der so berechnete Quotient keine ganze Zahl ist, so nehme man für P eine in der Nähe gelegene ganze Zahl.



h

$$pq - qp = \frac{\hbar}{2\pi i} 1.$$



WIKIPEDIA
Die freie Enzyklopädie

Artikel Diskussion

„Planck-Konstante“

Bedeutung

Das Planck'sche Wirkungsquantum tritt in der Beschreibung quantisierter Phänomene auf. Insbesondere mikroskopische Objekte wie Elementarteilchen wie Elektronen oder Photonen haben physikalische Eigenschaften, die nicht jeden beliebigen kontinuierlichen Wert, sondern nur bestimmte diskrete Werte annehmen können.

Proportionalitätsfaktor zwischen Photonenenergie und Frequenz

Die Energie E elektromagnetischer Strahlung einer gegebenen Frequenz ν (gr. Buchstabe "nü") kann nur in bestimmten Portionen absorbiert und emittiert werden. Die Energie eines Feldes kann sich also nur um den folgenden Betrag ändern:

$$\Delta E = h\nu$$

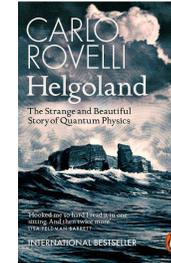
Max Planck führte die Konstante h (von *Hilfsgröße*) im Jahr 1900 zunächst nur als Hilfsmittel zur Lösung des Problems der Beschreibung des Strahlungsverhaltens schwarzer Körper (auch bezeichnet als Schwarzkörperstrahlung oder Hohlraumstrahlung) ein. Nach der klassischen Ableitung (\rightarrow Rayleigh-Jeans-Gesetz) hätte die Stärke mit steigender Frequenz immer größer werden müssen (was der Realität widerspricht und als Ultraviolett Katastrophe bezeichnet wird).

Planck setzte in seiner Rechnung voraus, dass Strahlung der Frequenz ν nur in Energiepaketen der Größe $E = h\nu$ emittiert und absorbiert werden kann. Das Wirkungsquantum ist hier eine Proportionalitätskonstante, deren Größe sich aus der Messung an der experimentell



h

$$pq - qp = \frac{\hbar}{2\pi i} 1.$$



als er sich im Sommer 1925 auf die Insel Helgoland zurückzieht.

Und dort hat er die zündende Idee, auf die man nur in der grenzenlosen Radikalität seiner Zwanziger kommt. Die Idee, die dazu bestimmt ist, die gesamte Physik, die gesamten Naturwissenschaften, unsere gesamte Konzeption von der Welt auf den Kopf zu stellen. Die Idee, die die Menschheit, wie ich glaube, nach wie vor nicht verdaut hat.



„Akt der Verzweiflung“? oder Schritt in langfristigem Forschungsprogramm



in München



in Ann Arbor



in Kiel (?)



in Berlin, ca 1918



Parallelen 1900 | 1925

- keine Revolutionen, sondern Prozesse
- Relevanz erst im Nachhinein
- Teamwork | „virtuelles“ Teamwork
PTR-Teamwork
„drei Holsteiner“...



„drei Holsteiner“ und ein Göttinger

Adolf Leopold



Carl Runge



Max Planck

Bernhard Karsten



Plancks Karriere

- *1858
- 21 1879 Dr. 
- 22 1880 Habilitation
- 5 Jahre PD
- 27 1885 ao. Prof Kiel
- 31 1889 ao. Prof Berlin
- 34 1892 o. Prof Berlin
- 42 1900 h
- 60 1918 NP

Thermodynamik,
ihre Grundprinzipien (Energie, Entropie)
und Anwendungen

Plancks Karriere

- *1858
- 21 1879 Dr. 
- 22 1880 Habilitation
- 5 Jahre PD
- 27 1885 ao. Prof Kiel
- 31 1889 ao. Prof Berlin
- 34 1892 o. Prof Berlin
- 42 1900 h
- 60 1918 NP



„Ich war eigentlich damals der einzige Theoretiker und hatte es daher nicht so ganz leicht, wie ich mit meiner Entropie hervorkam, und die war damals nicht sehr beliebt, weil sie ein mathematisches Gespenst war.“

Brieftagebuch zwischen Max Planck, Carl Runge, Bernhard Karsten und Adolf Leopold

eingeleitet und annotiert
von
Klaus Hentschel und Renate Tobies

Kiel, 15. Juli 88.

Allerdings bin ich jetzt Stroh Wittwer geworden, aber zum Briefschreiben habe ich noch viel weniger Zeit als sonst, denn das eheliche Leben ist entschieden reiner Zeitgewinn. Sonst geht es mir gut, Frau u. Kind sind am Tegernsee, wohin ich möglichst bald nachreisen werde. Das Colleg ist diesen Sommer schlecht geraten: Die Optik kam garnicht zu Stande, mechanische Wärmetheorie lese ich vor 2 Zuhörern, u. das Schlimmste ist, dass diese schlechten Zeiten wegen der Ueberfüllung im Lehramtsfach wohl noch ziemlich lange dauern werden. Gearbeitet habe ich in der letzten Zeit ziemlich fleissig, u. werde jetzt etwas pausiren u. meine Collegienhefte revidiren u. ergänzen. Nun wird wohl auch nächstens Deine Spectral-Arbeit erscheinen, Carl. Höchst interessant wäre es ja, wenn dabei etwas herauskäme, u. ein schöner Abschluss so vieler erfolgloser Bemühungen.– Die Balmer'sche Formel für die Wasserstofflinien, die ich einmal im Naturforscher las, hat mir damals aus irgend einem Grunde (ich glaube wegen einer Willkür im Einsetzen ganzer Zahlen) nicht sehr imponirt, obwohl sie ja sehr genaue Werthe liefert. Im Ganzen bin ich aber auch der Ansicht, dass die Spectralanalyse uns die wichtigsten Aufschlüsse über die Natur der Elemente zu liefern bestimmt ist; wenn man nur erst einmal den Faden gefunden hat; u. warum sollst Du ihn nicht finden? Gestern habe ich mit Adolph den Einzug unseres Kaisers u. die grosse Flottenparade mit angesehen, die er von seiner Yacht Hohenzollern bei Belle vue vor der Abreise nach Kronstadt abnahm. Es war ein stolzer Anblick, der das Herz jedes Deutschen mit Hochgefühl erfüllen musste. Das Gegenstück bildet der amtliche Bericht des Krankheitsver-

Plancks Karriere



- *1858
- 21 1879 Dr.
- 22 1880 Habilitation
- 5 Jahre PD
- 27 1885 ao. Prof Kiel
- 31 1889 ao. Prof Berlin
- 34 1892 o. Prof Berlin
- 42 1900 h
- 60 1918 NP

Wiensches Strahlungsgesetz

$$S = -\frac{U}{av} \log\left(\frac{U}{ebv}\right) \quad u, dv = \frac{8\pi v^3}{c^3} b \exp\left(-\frac{av}{T}\right) dv$$

Plancks Karriere



- *1858
- 21 1879 Dr.
- 22 1880 Habilitation
- 5 Jahre PD
- 27 1885 ao. Prof Kiel
- 31 1889 ao. Prof Berlin
- 34 1892 o. Prof Berlin
- 42 1900 h
- 60 1918 NP

~~$$S = -\frac{U}{av} \log\left(\frac{U}{ebv}\right) \quad u, dv = \frac{8\pi v^3}{c^3} b \exp\left(-\frac{av}{T}\right) dv$$~~

$$S = k \left[\left(1 + \frac{U}{hv}\right) \log\left(1 + \frac{U}{hv}\right) - \frac{U}{hv} \log\left(\frac{U}{hv}\right) \right] \quad u, dv = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \cdot \frac{dv}{e^{k\phi} - 1}$$

quantum-history.de

Quantum History Wall

1885 Das Linienspektrum der Wasserstoffs – aus architektonischer Perspektive

1888 Die Wellenlängen der Spektrallinien

1895 Wie verhalten sich Spektrallinien in einem Magnetfeld?

1896 Der Schwarze Körper erklärt die Lichtfarben

1902 Die Frequenz bestimmt den Photoeffekt, nicht die Intensität

1902 Das Gesetz des radioaktiven Zerfalls

Dezember 1900 Eine neue universelle Konstante mit einer Bedeutung

spätes 19. Jahrhundert Elektrisches Licht – Big Business der Physik?

15

quantum-history.de

Quantum History Wall

Dezember 1900 Eine neue universelle Konstante mit einer Bedeutung

Die Strahlungsgleichung, die eine perfekte Übereinstimmung mit den neuesten experimentellen Werten lieferte, hatte Max Planck bereits im Oktober 1900 mit den formalen Konstanten c und C niedergeschrieben. Doch erst im Dezember 1900 führte er die später nach ihm benannte Konstante h ein, jene universelle Konstante, die die Energiekomponente charakterisierte und garantierte, dass Energie und Frequenz proportional waren ($E = h\nu$). Gleichzeitig sorgte die Boltzmann-Konstante k dafür, dass die Entropie eines Zustands proportional zu seiner Wahrscheinlichkeit war ($S = k \log W$).

$$u, dv = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \cdot \frac{dv}{e^{k\phi} - 1}$$

Plancks Strahlungsformel aus seiner Arbeit vom Dezember 1900 mit der Verwendung von h und k . Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2 (1900), S. 237-245 (PDF)

Verwandte Ereignisse

1895 Der Schwarze Körper erklärt die Lichtfarben

1911 h wird Bestimmungselement des Atoms

Weiterführende Literatur

Max Planck: Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum, *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2* (1900) 237-245 (PDF)

Nadia Robotti, Massimiliano Badino: Max Planck and the 'Constants of Nature', *Annals of Science* 58 (2001) 137-162 (Link)

Hans Kangro: *Early history of Planck's radiation law*, London: Taylor & Francis 1976.

Thomas S. Kuhn: *Black-Body Theory and the Quantum Disconti-*

16

1900 vs. 1925

- 1925:** lang ersehnte neue Theorie (Born, Heisenberg...) mit neuartiger mathematischer und physikalischer Struktur
- 1900:** keine ontologische Interpretation durch Planck erst 1908 "diskrete Energiezustände" erst 1913 Ende der Versuche kontinuierlicher Energieaustausch
- 1913** immer noch skeptisch gegenüber "Lichtquanten" (Einstein)

anlässlich der Wahl Einsteins in die Berliner Akademie:

Dass dieser „in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie z. B. in seiner Hypothese der Lichtquanten, wird man ihm nicht allzu schwer anrechnen dürfen; denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, lässt sich auch in der exaktesten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.“

Brieftagebuch zwischen Max Planck, Carl Runge, Bernhard Karsten und Adolf Leopold

eingeleitet und annotiert von Klaus Hentschel und Renate Tobies

Göttingen 18. 11. 07.
Deinen Aufsatz, Max, zur Dynamik bewegter Systeme finde ich sehr fein. Es ist doch ein Triumph, dass man so weit gekommen ist, und selbst so feststehende Dogmata wie die Konstanz der Masse überwunden hat. Ich möchte aber gerne wissen, was Du Dir von den Elementarquanten der Energie für Vorstellungen machst. In Deinem Aufsatz Drude Bd. 4. ist es nicht viel mehr als ein mathematisches Hilfsmittel, dem eine anschauliche Bedeutung nicht zukommt. In Wien's Aufsatz über die Energie der Spectrallinien kommt eine Anschauung davon vor; ob Du die wohl theilst?

Die „drei Holsteiner“ und ein Göttinger

Grunewald, 23. II. 08.
Nochmals sei hier meinen Wünschen für Bernhards zweite (er lässt sich Zeit) Ausdruck gegeben, sowie dem Dank für die Karte, welche Gottlob Gutes über Mutter u. Kind berichtete. Möchte es so weitergehen.
Bezüglich Carl's Frage nach meinen Vorstellungen bezüglich des Elementarquantums muss ich zunächst bekennen, dass dieselben zur Zeit noch ziemlich dürftig sind; doch möchte ich Folgendes bemerken. Vor Allem ist daran festzuhalten, dass das Elementarquantum nicht die Dimension einer Energie, sondern die einer 'Wirkung' (Energie mal Zeit) hat, dass also seine vollständige Erklärung nicht durch Betrachtung eines Zustandes, sondern nur durch Betrachtung eines Vorganges erfolgen kann. Mit anderen Worten:] Wir haben es hier nicht mit einer Atomistik im Raum, sondern mit einer Atomistik in der Zeit zu thun, indem Vorgänge, die wir für gewöhnlich als stetig in der Zeit betrachten, in Wirklichkeit zeitliche Unstetigkeiten aufweisen. Vielleicht liessen sich die Minkowskischen Betrachtungen (Raum mit den 4 Coordinaten x, y, z, t) mit Erfolg für eine Veranschaulichung des Wirkungsatoms verwerthen. Interessant war mir immer, dass diese Naturkonstante auch dann invariant

Max Planck

*1858



- 21 1879 Dr.
- 22 1880 Habilitation
5 Jahre PD
- 27 1885 ao. Prof Kiel
- 31 1889 ao. Prof Berlin
- 34 1892 o. Prof Berlin
- 42 1900 h
- 60 1918 NP

Max Planck

*1858



- 21 1879 Dr.
- 22 1880 Habilitation
5 Jahre PD
- 27 1885 ao. Prof Kiel
- 31 1889 ao. Prof Berlin
- 34 1892 o. Prof Berlin
- 42 1900 h
- 60 1918 NP

Erwin Schrödinger

*1887



- 23 1910 Dr.
- 27 1914 Habilitation
6 Jahre PD
- 28 1920 ao. P. Breslau
- 34 1921 o. P. Zürich
- 39 1926 $i\hbar\psi = H\psi$
- 46 1933 NP

Max Born

*1882



- 23 1906 Dr.
- 26 1909 Habilitation
5 Jahre PD
- 32 1914 ao. P. Berlin
- 36 1919 o.P. Frankfurt
- 38 1921 o.P. Göttingen
- 42 1925 $pq - qp = \frac{h}{2\pi i} 1$.
- 72 1954 NP

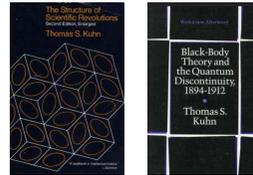
Fazit

- Normalisierung der "Revolutionen": Prozess, nicht Event

vgl. Thomas Kuhn

- Wissenschaftsgeschichte und das Schrumpfen des Genialen

- ein realistisches Bild, für bessere Motivationen und Bilder von der Wissenschaft



Max Planck und die Quantentheorie

Arne Schirmmacher

Humboldt-Universität zu Berlin

