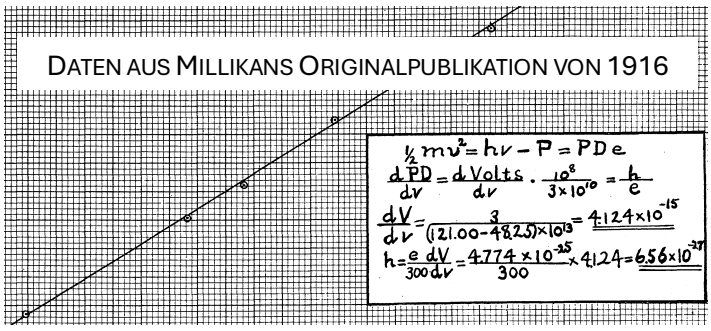
Hans Peter Dreyer
Ebnat-Kappel, hp.dreyer@thurweb.ch

Max Planck, Albert Einstein, Arnold Sommerfeld und die frühe Quantenphysik des Lichts

Die Wellentheorie des Lichtes ist, menschlich gesprochen, Gewissheit. (H. Hertz, 1889)
Der Herrgott hat – wie es scheint – doch den Rank gefunden. (A. Einstein, 1910)

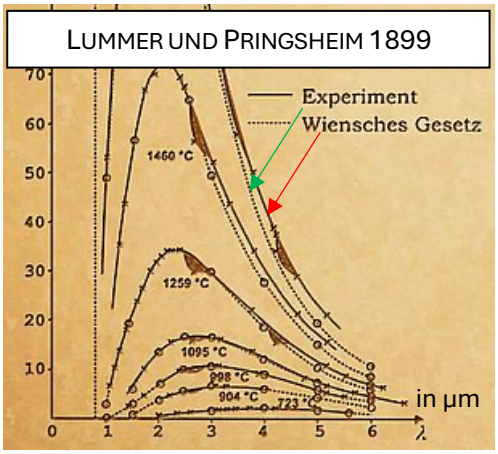
Am 10. Juli 1910 schreibt der junge Extraordinarius Albert Einstein aus Zürich dem etablierten, elf Jahre älteren Ordinarius Arnold Sommerfeld nach München: *Hoch geehrter Herr Kollege! (…) Der Schwerpunkt der ganzen Frage scheint mir darin zu liegen: 'Lassen sich die Energiequanten einerseits und das Huygens'sche Prinzip andererseits vereinigen?' Der Schein ist dagegen, aber der Herrgott hat – wie es scheint – doch den Rank gefunden.* Die beiden Physiker haben sich ein Jahr früher, an der Naturforschertagung in Salzburg, persönlich kennengelernt. Dort war Einsteins Vortrag «Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung» der Höhepunkt der Veranstaltung. Nun reist Sommerfeld mit seinem Assistenten Debye nach Zürich und diskutiert – auch in der legendären Öpfelchammer – den Widerspruch zwischen dem vielfach bestätigten Wellenbild und Einsteins revolutionärem Quantenbild des Lichts.
Zwanzig Jahre früher hatte Heinrich Hertz festgehalten: *An diesen Dingen* [der Erklärung des Verhaltens der elektromagnetischen Strahlung] *ist ein Zweifel nicht mehr möglich, eine Widerlegung dieser Anschauung ist für den Physiker undenkbar. Die Wellentheorie des Lichtes ist, menschlich gesprochen, Gewissheit.* Seit Young und Fresnel bildete die von Huygens entworfene Wellentheorie des Lichts die gültige Lehrmeinung. Newtons Partikeltheorie war überwunden. Diese Geisteshaltung schimmerte auch noch in Plancks Empfehlungsschreiben anlässlich Einsteins Berufung nach Berlin durch: *Dass Einstein in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie z. B. in seiner Hypothese der Lichtquanten, darf man ihm nicht allzu schwer anrechnen; denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, lässt sich auch in der exaktesten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.*



Einsteins Lichtquanten entstanden aus einer theoretischen Analyse von Plancks Strahlungsgesetz. Direkte experimentelle Evidenz gab es nicht. Andrew Millikan, der jahrelang sorgfältige Messungen zum Photoeffekt durchgeführt und Plancks Konstante mit neuer Genauigkeit bestimmt hatte, kam 1916 zum konservativen Schluss: *Yet the semi-corpuscular theory by which Einstein arrived at his equation seems at present to be wholly untenable.*

Parallel zu den Arbeiten an der Allgemeinen Relativitätstheorie denkt Einstein unermüdlich und von der Kritik unbeeindruckt über den Teilchenaspekt des Lichts nach und schreibt seinem Patentamt-Freund Michele Besso: *Es ist mir ein prächtiges Licht über die Absorption und Emission der Strahlung aufgegangen. In einem Elementarprozess (…) wird stets der Impuls hf/c auf das Molekül übertragen, und zwar bei Energieaufnahme in*

der Fortpflanzungsrichtung des Lichtbündels, bei der Energieabgabe in der entgegengesetzten Richtung. Lichtquanten sind also nicht nur Energie- sondern auch Impuls-Portionen. In seiner berühmten Biografie findet Abraham Pais, es sei erstaunlich, dass Einstein nicht viel früher auf diesen Gedanken gestossen sei.
Nur langsam setzt sich die Quantentheorie im allgemeinen Physikbetrieb durch. Es vergehen beinahe zwanzig Jahre bis in Stockholm entschieden wird: *The Nobel Prize in Physics 1918 was awarded to Max Karl Ernst Ludwig Planck 'in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta'.* Die Quantisierung des Lichts wird aber weiterhin nicht als gesichert eingestuft, denn drei Jahre später erhält Einstein den Nobelpreis *für seine Verdienste um die Theoretische Physik und besonders für seine Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effekts* – nicht aber für die Entdeckung des Lichtquants, und schon gar nicht für die Relativitätstheorie, wie oft geglaubt wird.
Während Einstein sich in Japan auf einer Weltreise befindet, streiten die Schweiz und das Deutsche Reich darüber, wer die Ehrung stellvertretend entgegennehmen darf. Und im fernen Urbana führt Arthur Holly Compton interessante Experimente mit Röntgenstrahlung durch. Arnold Sommerfeld – auf seiner ersten Amerikareise – macht dort bei einem Treffen den Experimentator mit der Quantenphysik vertraut, analysiert die Daten und folgert daraus in einem Brief an Bohr: *Hiernach würde die Wellentheorie für Röntgenstrahlung fallen zu lassen sein.* Nun kippt die Waage zugunsten des Teilchenaspekts des Lichts. Compton hält 1923 in einer Publikation fest: *This remarkable agreement between experiment and theory indicates clearly that scattering is a quantum phenomenon and can be explained without introducing any new hypothesis as to the size of the electron or any new constants; also that a radiation quantum carries with it momentum as well as energy.* Bald setzt sich für das *radiation quantum* das Wort *Photon* durch. Die von seinem «Erfinder» G. N. Lewis – in einem anderen Umfeld! – angestrebte Ähnlichkeit von Phot**on** mit Elektr**on** und Prot**on** lässt den Teilchenaspekt des Lichts dominieren und verdrängt den gleichberechtigten Wellenaspekt und damit auch die spezifisch quantenphysikalische Welle-Teilchen-Dualität.



Zurück zum Anfang der Quantenphysik! Er zeigt, dass manchmal genaue Messungen ganze Theorien – hier die klassische Thermodynamik – zum Einsturz bringen können: Zur Jahrtausendwende lässt sich Max Planck von seinen mit Wärmestrahlung experimentierenden Kollegen überzeugen, dass das Strahlungsgesetz von Wien (nicht zu verwechseln mit Wiens Verschiebungsgesetz) verbessert werden müsse. Es gibt die Messwerte für grosse Wellenlängen im IR nicht richtig wieder, wie das Bild zeigt. Planck gelingt es, wie er selbst sagte, eine *Krücke zu konstruieren,* eine *glücklich erratene Interpolationsformel.* In seiner berühmten Formel für die Strahlungsleistungsdichte J verbindet er das Gesetz von Wien, das offenbar bei kurzen Wellenlängen gilt, mit einem Gesetz von Rayleigh, das für grosse Wellenlängen Übereinstimmung mit den Messwerten liefert:

$$J_S(\lambda,T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\cdot\frac{d\lambda}{e^{hc/\lambda kT}-1}$$

In Plancks Gesetz taucht erstmals die «Hilfsgrösse h» auf, die später als «Planck'sches Wirkungsquantum» bezeichnet wird und die in der ganzen Quantenphysik eine Rolle spielt. Einstein bezeichnet sie im Gedankenaustausch mit Sommerfeld noch als «zweite universelle Konstante», neben der Lichtgeschwindigkeit c. Die Einzelheiten von Plancks Herleitung sind nur noch für Wissenschaftshistoriker von Bedeutung, denn sie

beruht auf der klassischen Boltzmann-Statistik, die bloss für klassische, unterscheidbare Objekte gilt. Heute ist klar, dass die Photonen ununterscheidbare Quantenobjekte sind, die der Bose-Einstein-Statistik, einer Quantenstatistik, gehorchen müssen. Die Verteilung der Strahlungsleistung auf die Wellenlängen als Funktion der Temperatur herzuleiten, bleibt Aufgabe der Hochschulphysik.

Plancks revolutionärer Gedanke, dass die hypothetischen Erzeuger der Strahlung Energie nur in Portionen, in Energiequanten *hf* abgeben und aufnehmen sollten, ist allgemein verständlich. Hier setzt im März 1905 der Artikel eines unbekannten Patentprüfers aus Bern an. In den Annalen der Physik denkt er *Über einen die Erzeugung und Verwandlung von Licht betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* nach. Bei der Analyse der «Erzeugung und Verwandlung von Licht» erweise es sich als zweckmässig, die Lichtenergie selbst als gequantelt zu anzunehmen. Mit dieser Hypothese könne man heuristisch, also mit begrenztem Wissen, zur Erklärung einer ganzen Gruppe von Erscheinungen kommen, nicht nur zu einer besseren Begründung für Plancks Gesetz der Wärmestrahlung. Im Zentrum dieser Gruppe steht nicht der äussere lichtelektrische Effekt, das Herausschlagen von Elektronen durch Einwirkung von Licht, das heute in den Schulen als Ausgangsexperiment dient. Ebenso wichtig ist für Albert Einstein das Gesetz der Fluoreszenz: Dass Fluoreszenzlicht immer eine grössere Wellenlänge hat als das einfallende Licht, ergibt sich daraus, dass die einfallenden Quanten im Kristall Energie verlieren und die Fluoreszenz-Lichtquanten energieärmer sind.
Dieser Artikel ist der einzige, den Einstein selbst als «revolutionär» einstuft. Mit gutem Grund: Als ETH-Physiker weiss er, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist. Nun behauptet er, das sei nur die halbe Wahrheit. Licht sei auch körnig: *Es scheint mir nun in der Tat, dass die (…) Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, dass die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei.* Angesichts des offensichtlichen Paradoxons, dass etwas sowohl wellenartig ausgebreitet als auch teilchenartig lokalisiert sein soll, bleibt er vorsichtig und verwendet Formulierungen wie: *Es scheint mir … Unter der Annahme … Nach der Auffassung …*
Im Verlaufe der nächsten Berner Jahre beschäftigt Einstein sich weiter mit diesem paradoxen Sachverhalt, der damals noch nicht «Welle-Teilchen-Dualität» heisst. Der Wellenaspekt der Strahlung ist unumstritten. Es muss also darum gehen, die experimentelle Basis für den Teilchenaspekt auf eine solidere Grundlage zu stellen. In diesem Zusammenhang erfindet er ein «Maschinchen» zur Messung kleinster Ladungen, das er patentieren lässt. Es erfüllt aber weder prinzipielle noch finanzielle Hoffnungen. Gleichzeitig erhält Einstein von der Universität Bern 1908 die Lehrerlaubnis, nicht aufgrund seiner verschiedenen Publikationen, sondern erst, nachdem er eine separate Schrift eingereicht hat. Ihr Titel lautet: *Folgerungen aus dem Energieverteilungsgesetz der Strahlung schwarzer Körper, die Konstitution der Strahlung betreffend.* Die handgeschriebene Habilitationsarbeit ist verschollen! Man kann aber vermuten, dass es bei der «Konstitution» um die Welle-Teilchen-Dualität geht, die Einstein ein Jahr später beim grossen Auftritt in Salzburg publik macht. Ähnlich wie bei seinen Arbeiten zur Brown'schen Bewegung findet er auf der Basis der Thermodynamik mit einem Gedankenexperiment ein neues Argument für die Gleichberechtigung von Wellen- und Teilchenaspekt. Er vergleicht die Schwankungen des Strahlungsdrucks auf ein Spiegelchen der Fläche *A*, das nur eine bestimmte Frequenz *f* reflektiert und für alle übrigen Frequenzen durchlässig ist, mit den Schwankungen des Gasdrucks. Im Feld mit der mittleren Strahlungsdichte ρ findet er für das mittlere Schwankungsquadrat der Energiedichte $\overline{\Delta^2}$ einen Ausdruck mit zwei gleichberechtigten Summanden:

$$\overline{\Delta^2} = \frac{1}{c}\left[h\rho f + \frac{c^3}{8\pi}\frac{\rho^2}{f^2}\right] df A\tau$$

Im gedruckten Kommentar in der Physikalischen Zeitschrift schreibt Einstein: *Wieder müsste sich nach der jetzigen Theorie der Ausdruck auf das zweite Glied reduzieren (Schwankungen durch Interferenz).* Anders gesagt: Die klassische Physik beschreibt nur den reinen Wellenaspekt des Lichts. Der Teilchenaspekt steckt im ersten Summanden mit dem Faktor *h*, der für die neue Quantenphysik charakteristisch ist: *Wäre das erste Glied alleine vorhanden, so liessen sich die Schwankungen (…) vollständig erklären durch die Annahme, dass die Strahlung aus voneinander unabhängig beweglichen, wenig ausgedehnten Komplexen von der Energie hf bestehe.*
Die beiden Summanden sind mathematisch gleichberechtigt durch ein +-Zeichen verbunden, was Einstein in Salzburg am Schluss seiner Ausführungen zu einer vorsichtigen, aber bemerkenswerten Formulierung veranlasst: *Ich wollte durch dasselbe* [Bild mit singulären Punkten, die von einem Kraftfeld umgeben sind] *nur kurz veranschaulichen, dass die beiden Struktureigenschaften (Undulationsstruktur und Quantenstruktur), (…)* ***nicht*** *als miteinander* ***un****vereinbar anzusehen sind* [Hervorhebung HPD].

1. SOLVAY-KONGRESS, BRUXELLES 1911

Einstein darf am 1. Solvay Kongress, an dem auch Planck und Sommerfeld teilnehmen, das Schlussreferat halten. Hinsichtlich der Dualität bleibt er vorsichtig: *Ich bestehe auf dem provisorischen Charakter dieses Konzepts* [von anscheinend teilchenartigen Lichtquanten], *das mit den experimentell nachgewiesenen Konsequenzen der Wellentheorie nicht verträglich ist.*
Erst mehrere Jahrzehnte später ist die Zeit reif für die Synthese in der Quantenelektrodynamik (QED). Sie fasst die bloss qualitative Welle-Teilchen-Dualität der elektromagnetischen Strahlung quantitativ in einer neuartigen Weise mathematisch genau. An der Entwicklung der QED arbeitet eine ganze Gruppe von Physikern. Sie führt zu einem Strauss von Nobelpreisen und öffnet ein weites Feld für die Theoretische und die Experimentalphysik.
Einstein erlebt diese Entwicklung nur noch am Rand. 1955 schreibt er Besso, seinem Freund aus der glücklichen Berner Zeit: *Die ganzen fünfzig Jahre bewusster Grübelei haben mich der Antwort der Frage ‚Was sind Lichtquanten?' nicht nähergebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich.* – Die philosophische Frage nach dem Wesen der Dualität des Lichts bleibt offen. Sie ist auch für Lernende spannend, die sich weniger für mathematisierende Physik begeistern können. Und bestimmt bleibt gültig, was Arnold Sommerfeld im Vorwort einer der vielen Auflagen seines Buchs «Atombau und Spektrallinien» schreibt:

Unter allen erstaunlichen Entdeckungen unseres Jahrhunderts ist sie [die Welle-Teilchen-Dualität aller Quantenobjekte] *die erstaunlichste.* (A. Sommerfeld, 1930)