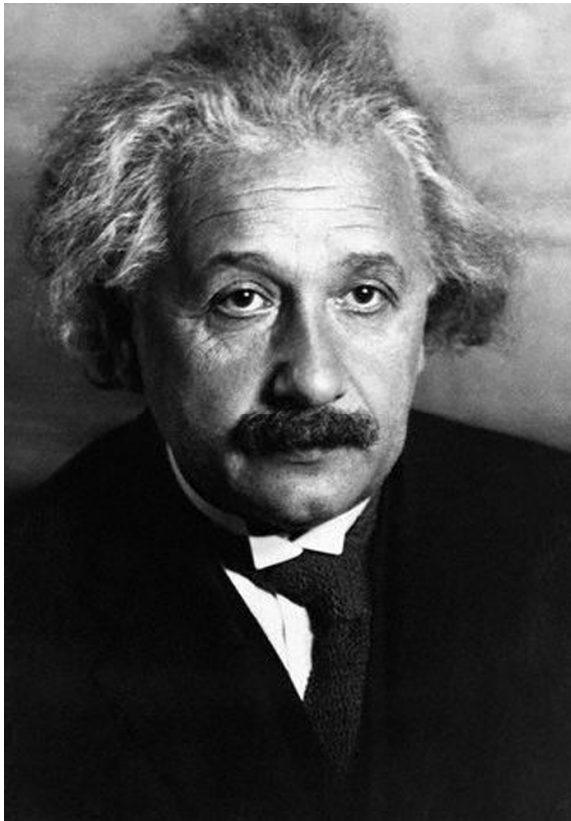


## 6. Fundamentale Krise der Physik

Das bei der Analyse der Wärmestrahlung durch Planck eingeführte Wirkungsquantum  $h$  fand zunächst keine Resonanz. Planck selbst versuchte eine Erklärung im Rahmen der klassischen Elektrodynamik mit dem Ziel, das Quant doch noch zu eliminieren, allerdings ohne Erfolg. Wichtige Stationen der weiteren Diskussionen:

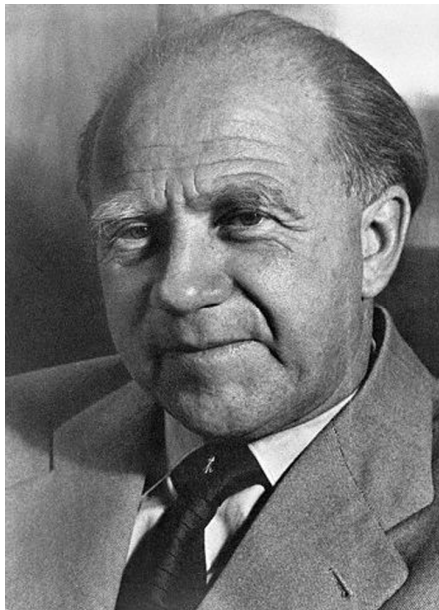
1. Erklärung des Photoeffekts durch Einstein (1905)
2. Lichtquantenhypothese
3. Bohr-Sommerfeldsches Atommodell
4. Welle-Teilchen-Dualismus (de Broglie, 1924)
5. Quantenstatistik (Bose, 1924)
6. Quantenmechanik (Heisenberg, 1925)
7. Heisenbergsche Unschärferelation (1927)
8. Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik
  - Statistische Deutung (Max Born, 1927)
  - Einstein-Bohr-Disput bei der Solvay-Konferenz von 1927
9. Dirac-Gleichung (1927)



Albert Einstein 1879-1955



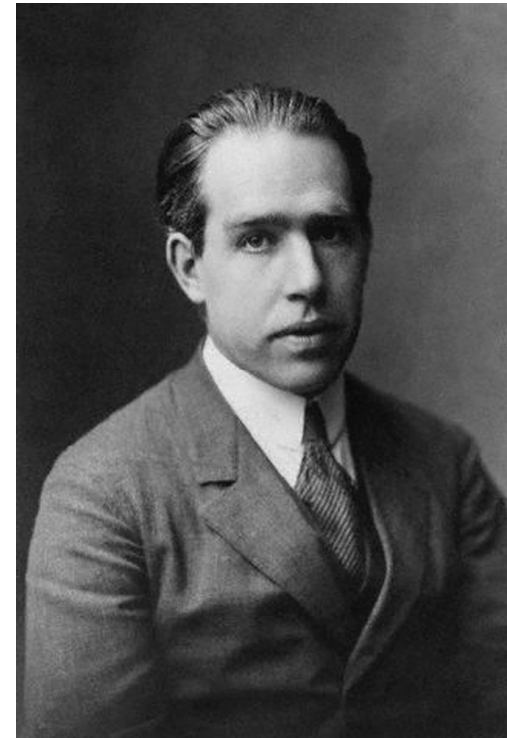
Max Planck 1858-1947



Werner Heisenberg  
1901-1976



Wolfgang Pauli  
1900-1958



Niels Bohr 1885-1962

**Wie Planck Einsteins Relativitätstheorie bekannt gemacht hat, benutzt Einstein Plancks Wirkungsquantum als einen grundlegenden Ansatz und verschafft ihm Aufmerksamkeit in der Physik.**

Über die Wärmestrahlung hinaus. Mit Plancks Wirkungsquantum erklärt Einstein den photoelektrischen Effekt und das Verhalten der spezifischen Wärme von Festkörpern bei tiefen Temperaturen. (Für Ersteres erhielt Einstein den Physik-Nobelpreis, mit Letzterem schuf er das neue Gebiet der Festkörperphysik.)

Nachdem **Niels Bohr** auf der Basis des Wirkungsquantums ein Atommodell entwickeln konnte, das die Spektroskopie der Atome und Moleküle erklärte, **wurde die von Planck begonnene Quantentheorie zu einer tragenden Säule der Physik.**

**Albert Einstein, Biografisches [28]**

\* 14. März 1879, Ulm. Alberts Eltern kommen aus Biberach.

1880 Familie zieht nach München. Vater führt zusammen mit seinem Bruder eine Elektrofabrik.

1888 Luitpold-Gymnasium. Mit einem Hauslehrer liest Einstein Kants Kritik der reinen Vernunft.

1894 Familie siedelt nach Italien um (Mailand, Pavia); Albert bleibt in München.

1895 Albert kommt mit dem autoritären, konservativen Stil des Gymnasiums nicht klar und verlässt es ohne Abschluss; folgt der Familie nach Pavia. Besteht die Aufnahmeprüfung für die ETH Zürich nicht.

1896 Gibt seine württembergische Staatsangehörigkeit ab. Legt an der Kantonsschule Aarau die Matura mit sehr guten Noten ab. Beginn des Studiums an der ETH. Die Mathematikprofessoren Adolf Hurwitz und Hermann Minkowski schätzt er besonders.

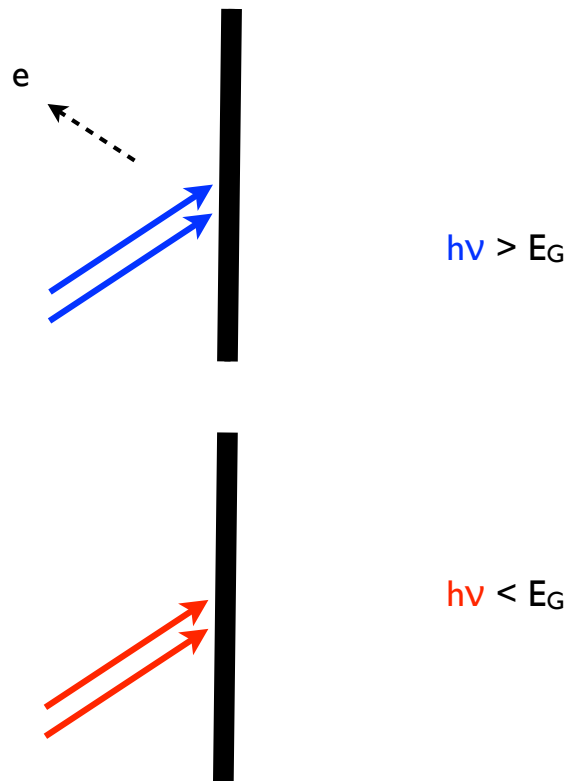
- 1900 Einstein schließt den Lehrer-Studiengang für Mathematik und Physik erfolgreich ab.  
Seine Bewerbung um eine Assistenstelle an der ETH gelingt nicht.  
Er betätigt sich als Hauslehrer.
- 1902 Patentamt in Bern
- 1903 Heirat mit seiner Studienkollegin Mileva Maric
- 1904 Geburt ihres Sohnes Hans Albert Einstein. Dauerstellung am Patentamt.
- 1905 17.03.: „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“  
30.04.: „Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen“.  
Dissertation, angenommen an der Universität Bern.  
11.05.: „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“. (Brownsche Bewegung)  
30.06.: „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“. (Spezielle Relativitätstheorie)  
27.09.: „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“ (Enthält  $E = mc^2$ )
- 1906 Technischer Experte zweiter Klasse
- 1907 Äquivalenzprinzip. Grund-Postulat für die Allgemeine Relativitätstheorie. Führt zur Ablenkung von Licht in einem Gravitationsfeld.
- 1908 PD, Universität Bern
- 1909 apl. Professor, Universität Zürich. Kündigung der Stelle am Patentamt.
- 1910 Geburt des Sohns Eduard Einstein.

- 1911 Professor in Prag
- 1912 Professor an der ETH Zürich
- 1913 Planck und Nernst besuchen Einstein in Zürich  
12.06., Planck, Nernst, Rubens und Warburg schlagen Einstein zur Aufnahme in die Preußische Akademie in Berlin vor. Beschluss am 03.07. Der Kaiser unterschreibt die Berufung am 12.11., Einstein akzeptiert am 07.12.
- 1914 06.04., Einstein kommt mit seiner Familie in Berlin an. Mileva und die Kinder fahren bald wieder in die Schweiz zurück.
  
- 1916 Die Allgemeine Relativitätstheorie ist fertig.
- 1924/1925 Arbeiten zum idealen Quantengas. Zum ersten Mal spielen Quantenkorrelationen die entscheidende Rolle.
- 1933 Einstein am Institute for Advanced Study in Princeton.
- 1935 EPR-Korrelationen
- 1939 2. August: Einstein fordert US-Präsident Roosevelt zum Bau einer Atombombe auf.
- 1955 11.04.: Zusammen mit Bertrand Russell unterschreibt Einstein einen Aufruf zum globalen Verzicht von Kernwaffen. Daraus entwickelt sich die Pugwash-Bewegung.  
18.11., Einstein stirbt.

**„Ich habe hundertmal mehr über Quantenprobleme nachgedacht, als über die allgemeine Relativitätstheorie.“** [28], S. 6.

Diracs Buch „Quantum Mechanics“ war Einsteins ständiger Begleiter, auch bei Ferientaufenthalten.  
(Res Jost: „Das Märchen vom Elfenbeinernen Turm“. Reden und Aufsätze, S. 92. Springer 1995.)

## 6.1 Photoeffekt



Den photoelektrischen Effekt beobachtete bereits Heinrich Hertz bei seinen Experimenten zu den elektromagnetischen Wellen. Wird ultraviolettes Licht auf eine Metallplatte gestrahlt, treten elektrische Ströme auf.

Einstein erklärt den Effekt unter Benutzung des Planckschen Wirkungsquantums [37]. Unterhalb einer Grenzfrequenz des Lichts wird das Metall erwärmt, entsprechend der eingestrahlten Leistung. Oberhalb dieser Grenzfrequenz werden aus dem Metall Elektronen herausgelöst. Das Licht überträgt Impuls auf die Elektronen. Licht verhält sich wie ein Strahl winziger Billiardkugeln.

Damit wird aber der bisher gültige „Charakter“ des Lichts als Welle nicht aufgehoben. Die unzähligen experimentellen Daten dazu können ihre Gültigkeit nicht verlieren. Die verrückte Schlussfolgerung:

**Licht ist sowohl Teilchen, als auch Welle!**

[37] Albert Einstein: „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.“  
Annalen der Physik 17 (1905), S. 132, Leipzig.

## 6.2 Lichtquantenhypothese

Um die Wahl Einsteins in die Preußische Akademie der Wissenschaften am 12. Juni 1913 sicherzustellen, richteten Planck, Warburg<sup>\*)</sup>, Nernst und Rubens eine Petition an den preußischen Erziehungsminister und empfahlen Einstein für einen freigewordenen Platz in der Akademie. Darin heißt es ([34], S. 43/44):

„Zusammenfassend kann man sagen, daß es unter den großen Problemen, an denen die moderne Physik so reich ist, kaum eines gibt, zu dem nicht Einstein in bemerkenswerter Weise Stellung genommen hätte. Daß er in seinen Spekulationen auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie zum Beispiel in seiner Hypothese der Lichtquanta, wird man ihm nicht allzusehr anrechnen dürfen. Denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, läßt sich auch in der exaktesten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.“

Planck assoziiert das Quantum zunächst nur mit der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie. Einstein assoziiert das Lichtquant mit freier elektromagnetischer Strahlung.

<sup>\*)</sup> Emil Warburg, langjähriger Direktor der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Vater des Biochemiker Otto Warburg, Nobelpreisträger in Biochemie.

Einstein in seiner Arbeit zum photoelektrischen Effekt [37]:

„Monochromatische Strahlung von geringer Dichte verhält sich in wärmetheoretischer Beziehung so, wie wenn sie aus voneinander unabhängigen Energiequanten der Größe  $R\beta\nu/N$  bestünde.“  
[  $R\beta\nu/N = h\nu$  ]

Diese Überlegung nimmt Einstein auf der Basis einer Entropie-Betrachtung vor. Sie führt schließlich zur Betrachtung der schwarzen Strahlung als ein thermodynamisches Bose-Gase von Photonen.

Mit einer kritischen Würdigung der Lichtquantenhypothese und ihrer späten Akzeptanz in der Physics Community ab 1920 beschäftigen sich Pais [28], Kapitel 19, und Jammer [34], Abschnitt 1.4.

### 6.3 Bohr-Sommerfeldsches Atommodell

Nach den Rutherford-Geigerschen Experimenten mit Alpha-Strahlen an Goldfolien schälte sich ein Atommodell heraus, das aus einem elektrisch geladenen massiven Kern bestand, umkreist von Elektronen. Wenn wir Zentrifugalkraft und Coloumb-Kraft beim Wasserstoffatom gleichsetzen, gilt (m Masse des Elektrons):

$$m \omega^2 \cdot r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$L = m r v; \quad v = \omega r \Rightarrow$$

$$L = m \omega r^2 = \frac{h}{2\pi};$$

Der Drehimpuls wird gequantelt. Diesen Ausdruck in die obere Gleichung eingesetzt, ergibt:

$$m^2 \omega^2 \cdot r^4 = m r^3 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \Rightarrow r = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ m.}$$

Dieser kleinstmögliche Radius beim Wasserstoffatom ist der sogenannte „Bohrsche Radius“.

Erweiterte Quantenbedingung auf „erlaubte“ Bahnen (nach Bohr):

$$L = m v r_n = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi Z m e^2} \cdot n^2$$

Auf diesen diskreten „Bahnen“ ist die von der Elektrodynamik geforderte elektromagnetische Strahlung der sich beschleunigt bewegenden Elektronen verboten. Ansonsten wäre das Atom nicht stabil, es würde kollabieren. Und mithin die Materie schlechthin. **Bohr setzt die Elektrodynamik außer Kraft!**

Mittels seines Atommodells lässt sich jedoch das Spektrum der Atome erklären. (In der obigen Formel ist Z die Kernladungszahl und n die sogenannte Hauptquantenzahl. Zur Vervollständigung des Atommodells kommen noch weitere Quantenzahlen hinzu.)