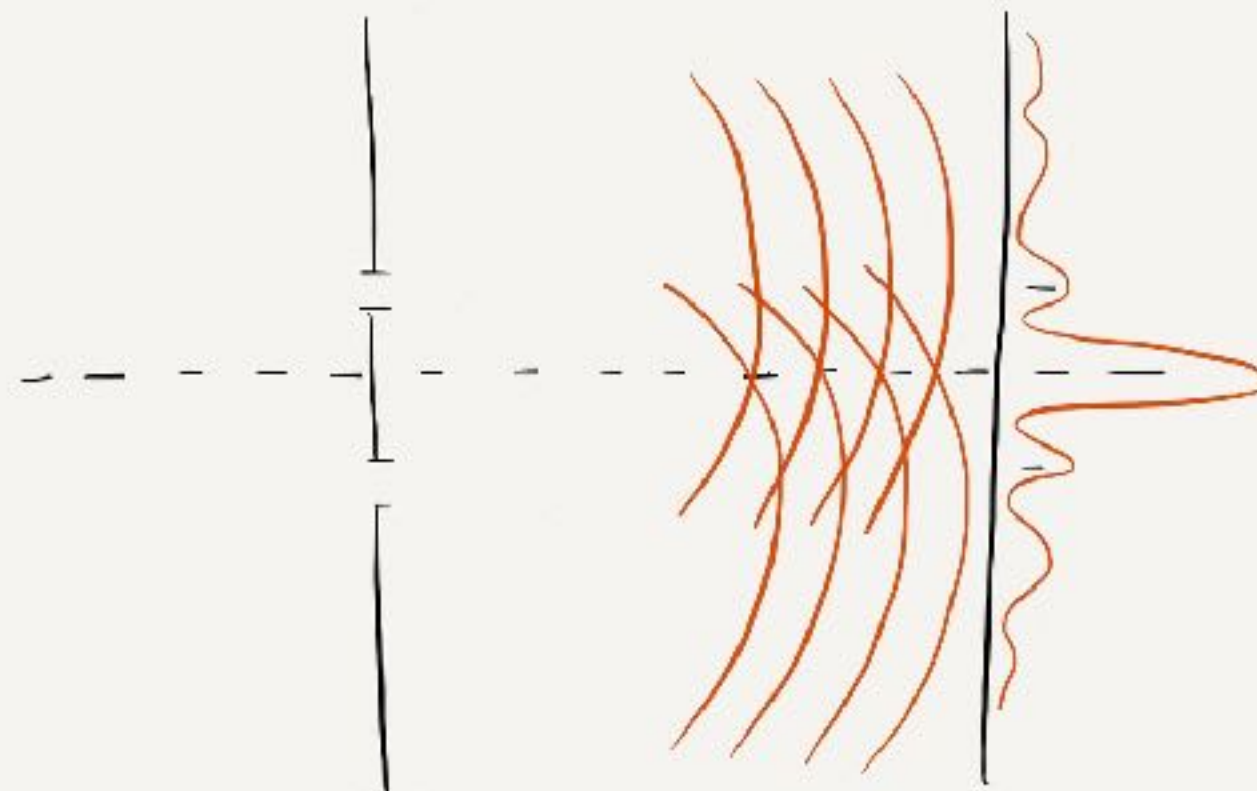


# Quantenphysik



# Geschichte der Quantenphysik

1877 - 1925

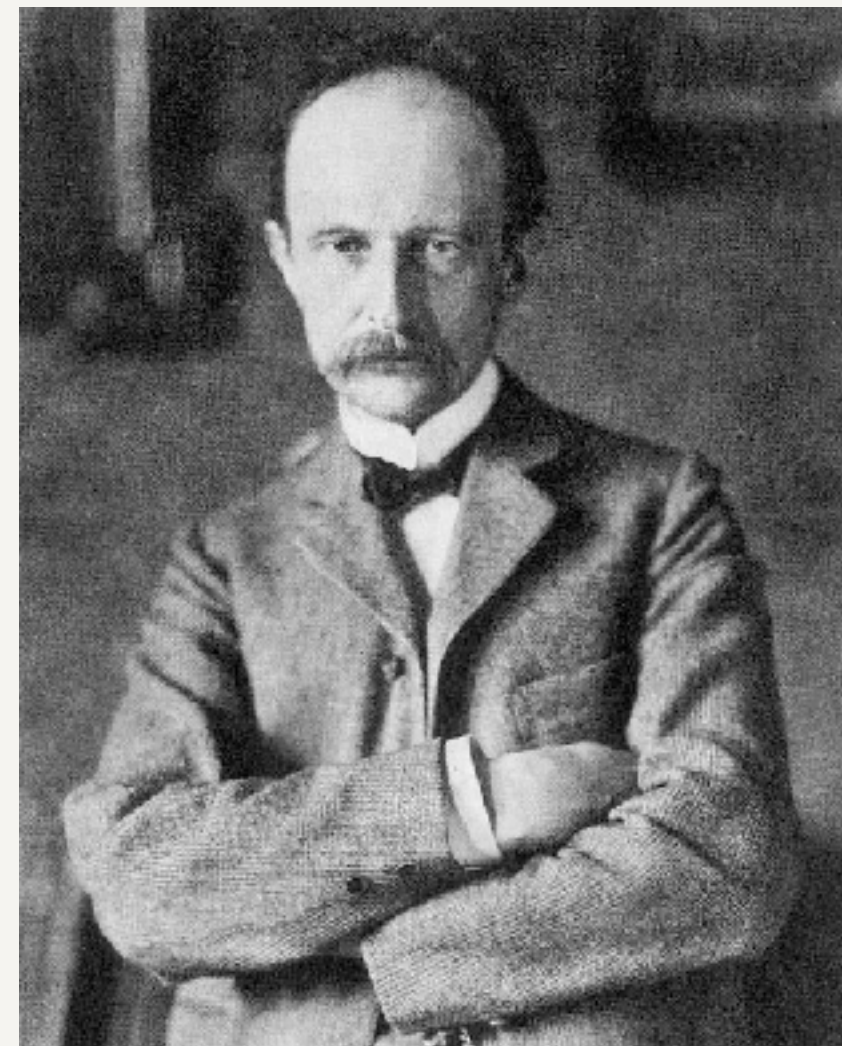
Vor-Geschichte

# Eine unübliche Einführung...

# Die übliche Einführung 1900

- 14. Dezember 1900: **Max Planck** stellt seine berühmte Strahlungsformel mit Quantisierung der Energie vor.

Max Planck  
1858 - 1947



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

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

(Vgl. oben S. 235.)

M. H.! Als ich vor mehreren Wochen die Ehre hatte,  
Ihre Aufmerksamkeit auf eine neue Formel zu lenken, welche

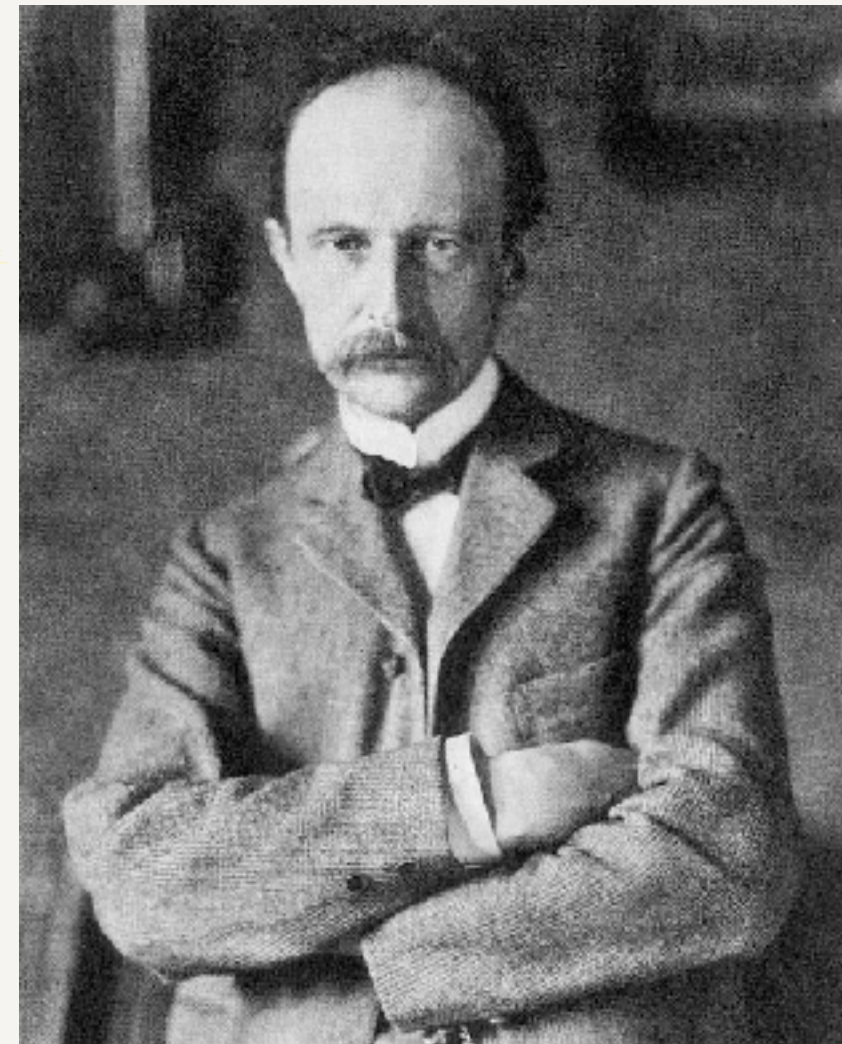
[1] Max Planck, „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum“, Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft 2 (1900), S. 237 - 245  
Online z.B. [hier](#).

Quelle: [University of California, Irvine](#)

# Die übliche Einführung 1900

Max Planck  
1858 - 1947

„Wir betrachten aber – und das 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  $\nu$  der Resonatoren multiplicirt ergibt das Energieelement  $\epsilon$  in erg, und durch Division von  $E$  durch  $\epsilon$  erhalten wir die Anzahl  $P$  der Energieelemente [. . .].“



[1] Max Planck, „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum“, Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft 2 (1900), S. 237 - 245  
Online z.B. [hier](#).

Quelle: University of California, Irvine  
[Max Planck, ca. 1900](#)



# Die übliche Einführung

1900

Max Planck  
1858 - 1947

„Wir betrachten aber – und das 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  $\nu$  der Resonatoren multiplicirt ergibt das Energieelement  $\epsilon$  in erg, und durch Division von  $E$  durch  $\epsilon$  erhalten wir die Anzahl  $P$  der Energieelemente [ . . . ].“

STOP



[1] Max Planck, „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum“, Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft 2 (1900), S. 237 - 245  
Online z.B. [hier](#).

Quelle: University of California, Irvine  
[Max Planck, ca. 1900](#)

# Die übliche Einführung 1900

seitig direct zu beeinflussen. Da somit die Entropie eines Resonators durch die Art der gleichzeitigen Energieverteilung auf viele Resonatoren bedingt ist, so vermutete ich, dass sich diese Grösse durch Einführung von Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen, deren Bedeutung für den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik Hr. L. BOLTZMANN<sup>1)</sup> zuerst aufgedeckt hat, in die elektromagnetische Theorie der Strahlung würde berechnen lassen müssen. Diese Vermutung hat sich bestätigt; es ist mir möglich geworden, einen Ausdruck für die Entropie eines monochromatisch schwingenden Resonators, und somit auch für die Verteilung der Energie im stationären Strahlungszustand, d. h. im Normalspectrum, auf deductivem Wege zu ermitteln, wobei

1) L. BOLTZMANN, namentlich Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien (II) 76. p. 373. 1877.

# Die Zahl der lebendigen Kräfte ist eine diskrete 1877

Ludwig Boltzmann  
1844 - 1906

## I. Die Zahl der lebendigen Kräfte ist eine diskrete.

Wir wollen zunächst annehmen, jedes Molekül sei nur imstande, eine bestimmte endliche Anzahl von Geschwindigkeiten anzunehmen, z. B. die Geschwindigkeiten

$$0, \frac{1}{q}, \frac{2}{q}, \frac{3}{q} \dots \frac{p}{q},$$

wobei  $p$  und  $q$  beliebige endliche Zahlen sind. Beim Zusammenstoße zweier Moleküle soll zwischen den beiden zusammenstoßenden Molekülen ein Austausch der Geschwindigkeiten stattfinden, jedoch so, daß nach dem Zusammenstoße jedes der beiden Moleküle immer wieder eine der oben angeführten Geschwindigkeiten, entweder

$$0, \text{ oder } \frac{1}{q}, \text{ oder } \frac{2}{q} \text{ usw. bis } \frac{p}{q}$$



Quelle: [Wikipedia](#)

[2] Ludwig Boltzmann, „Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über die das Wärmegleichgewicht“, namentlich Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien (II) (1877) 76, S. 373  
Online z.B. [hier](#).



# Die Zahl der lebendigen Kräfte ist eine diskrete 1877

diger Kräfte anzunehmen. Zu noch größerer Vereinfachung nehmen wir an, daß die Reihe der lebendigen Kräfte, welche jedes Molekül anzunehmen imstande ist, eine arithmetische Progression bildet, z. B. folgende:

$$0, \varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon \dots p\varepsilon.$$

Die größte mögliche lebendige Kraft  $p\varepsilon$  wollen wir mit  $P$  bezeichnen.

## Ludwig Boltzmann hat die Quantenphysik erfunden!?

[2] Ludwig Boltzmann, „Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über die das Wärmegleichgewicht“, namentlich Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien (II) (1877) 76, S. 373  
Online z.B. [hier](#).

# Die Zahl der lebendigen Kräfte ist eine diskrete 1877

- Schon Boltzmann musste 1877 die Energie quantisieren.
- Genau wie bei Planck war es nur ein mathematischer Trick:

diger Kräfte anzunehmen. Zu noch größerer Vereinfachung nehmen wir an, daß die Reihe der lebendigen Kräfte, welche jedes Molekül anzunehmen imstande ist, eine arithmetische Progression bildet, z. B. folgende:

$$0, \varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon \dots p\varepsilon.$$

Die größte mögliche lebendige Kraft  $p\varepsilon$  wollen wir mit  $P$  bezeichnen.

„Es entspricht diese Fiktion freilich keinem realisierbaren mechanischen Probleme, wohl aber einem Probleme, welches mathematisch viel leichter zu behandeln ist, und welches sofort wieder in das zu lösende Problem übergeht, wenn man  $p$  [ . . . ] ins Unendliche wachsen läßt.“

[2] Ludwig Boltzmann, „Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über die das Wärmegleichgewicht“, namentlich Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien (II) (1877) 76, S. 373  
Online z.B. [hier](#).

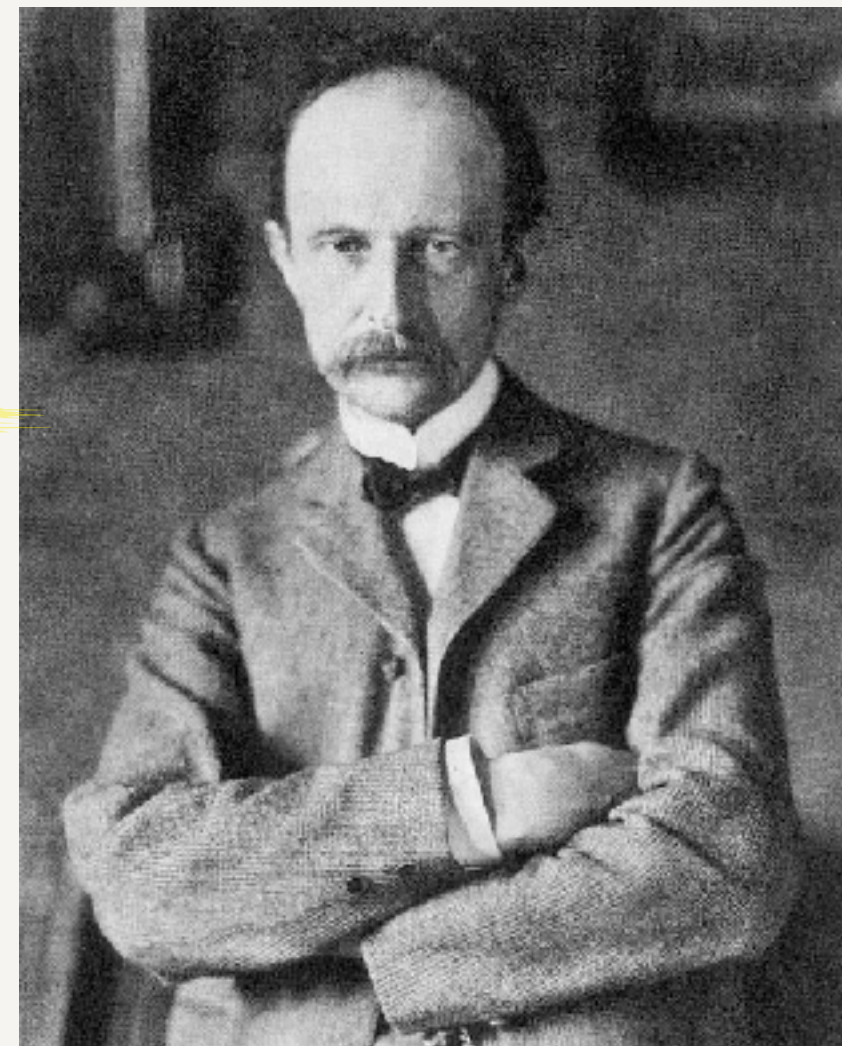
# Nun zurück zur üblichen Darstellung...

## 1900

„Wir betrachten aber – und das 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  $\nu$  der Resonatoren multiplicirt ergibt das Energieelement  $\epsilon$  in erg, und durch Division von E durch  $\epsilon$  erhalten wir die Anzahl P der Energieelemente [ . . . ].“

$$\epsilon = h \cdot \nu$$

Max Planck  
1858 - 1947



[1] Max Planck, „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum“, Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft 2 (1900), S. 237 - 245  
Online z.B. [hier](#).

Quelle: University of California, Irvine  
[Max Planck, ca. 1900](#)

# Einsteins Photoeffekt

## 1905

Albert Einstein  
1879 - 1955

$$\varepsilon = h \cdot \nu$$

- Albert Einstein gebrauchte diesen Zusammenhang 1905 um den **photoelektrischen Effekt** zu erklären.
- Insbesondere erklärte es warum die Frequenz des Feldes und nicht dessen Amplitude für die kinetische Energie der Elektronen verantwortlich ist.
- Er erhielt hierfür den Nobelpreis in Physik 1922 - nicht für die Relativitätstheorie.



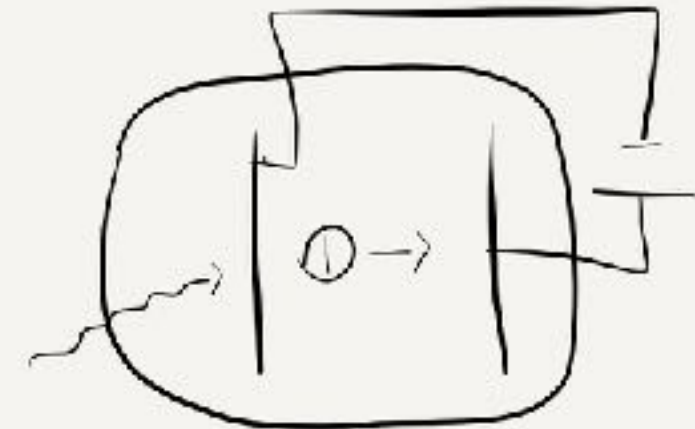
Quelle: [Wikipedia](#)



# HSD Äußerer photoelektrischer Effekt

## 1887

- **Einzelne Elektronen** werden durch die Energie **eines einzelnen Photons** aus dem Metall (Halbleiter) heraus ‚geschlagen‘. Sie überwinden dabei die Austrittsarbeit  $W_A$ .
- In evakuierten Photokathoden werden die austretenden Elektronen durch eine Gegenspannung gebremst.
- Überschüssige Energie des Photons  $\epsilon$  wird in kinetische Energie des Elektrons umgewandelt.



$$\epsilon = h \cdot \nu = W_A + E_{\text{kin}}$$

- Die maximale Gegenspannung hängt nur von der **Frequenz** des Lichtes ab, nicht von dessen Intensität!

# Bohr'sches Atommodell 1913

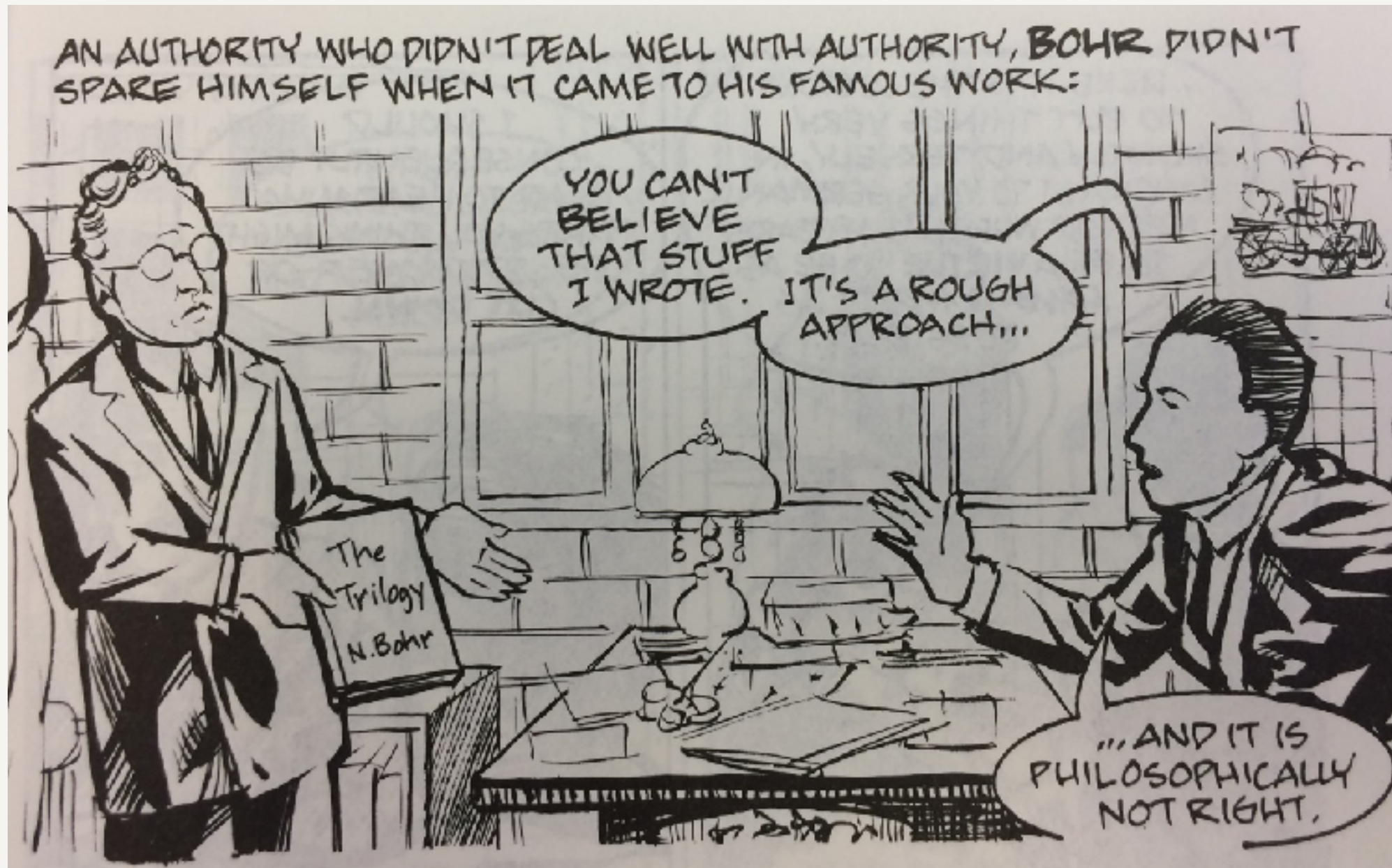
Niels Bohr  
1885 - 1962

- 1913: letztes anschauliches Atommodell.
- Erstes quantisiertes Modell
- Leider **falsch!**
- Elektronen umlaufen den Atomkern auf festen Bahnen mit konstanten Energien.
- Beim Übergang von einer Bahn auf eine andere können Photonen absorbiert oder emittiert werden.



Quelle: [Wikipedia](#)

# Bohr'sches Atommodell 1913



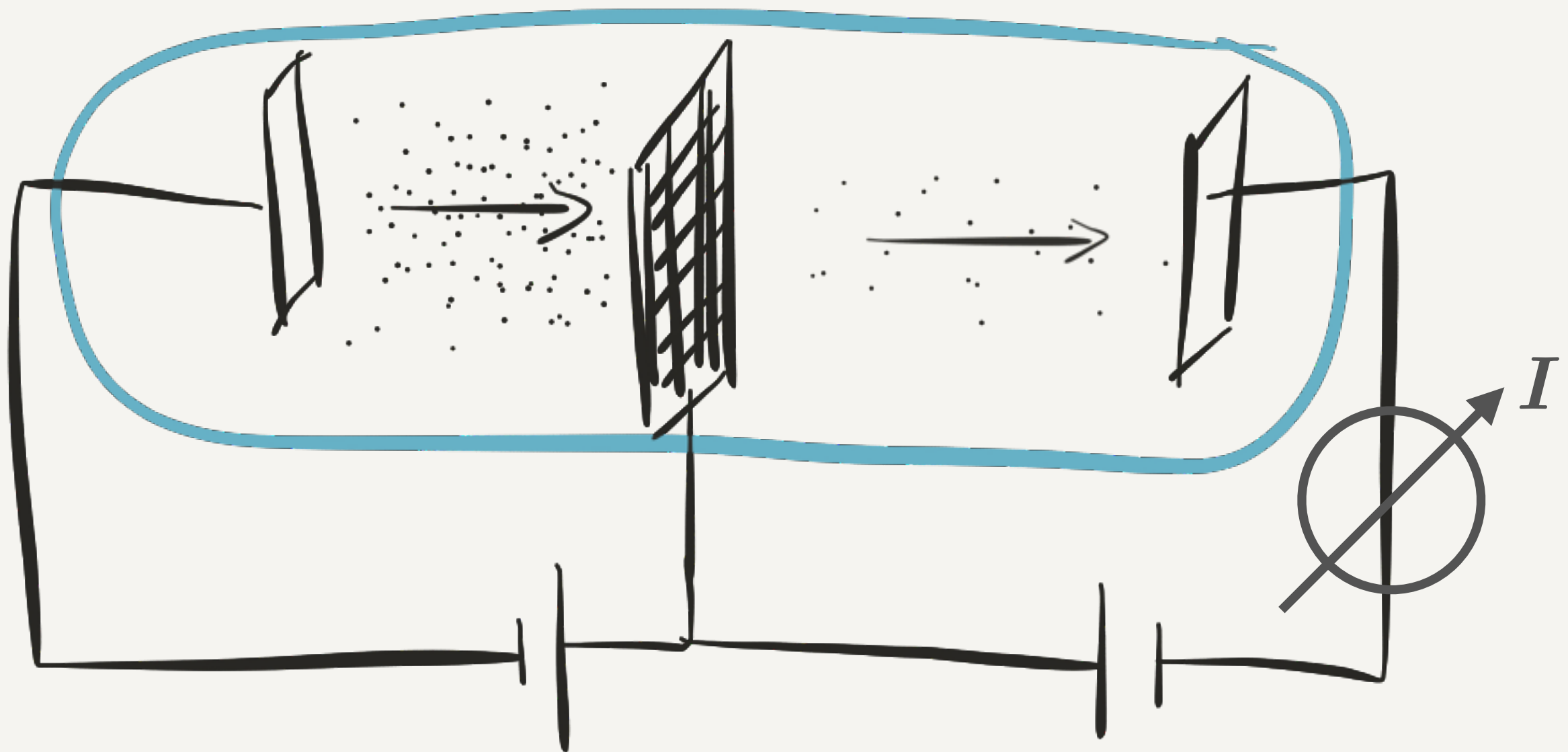
Aus: "Suspended in Language" von Jim Ottaviani und Leland Purvis, [G.T. Labs](#)

# Franck-Hertz-Versuch 1914

Glühelektrode

Gitter

Auffang-Elektrode

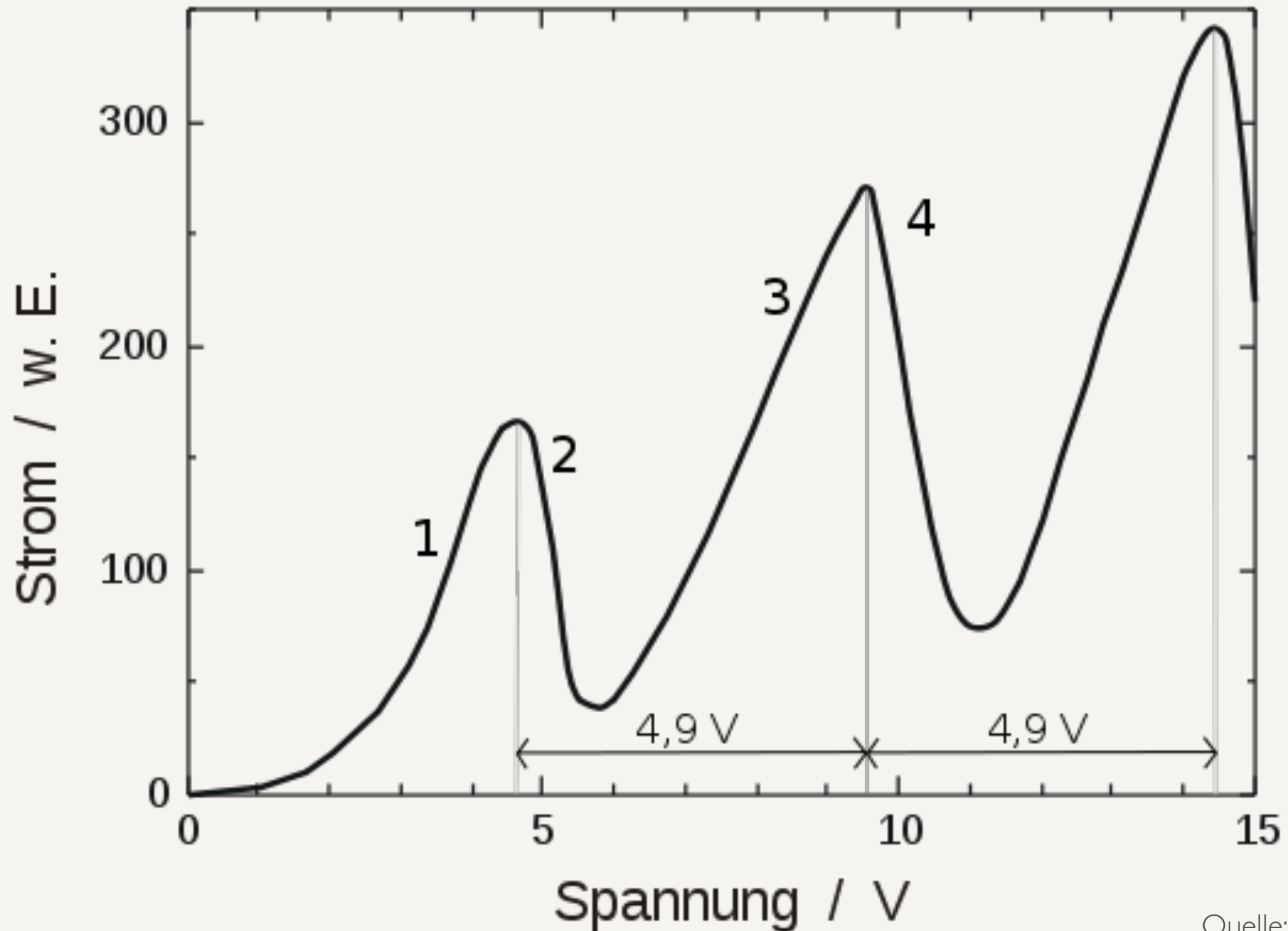


Beschleunigungsspannung

Leichte Gegenspannung



# Franck-Hertz-Versuch 1914

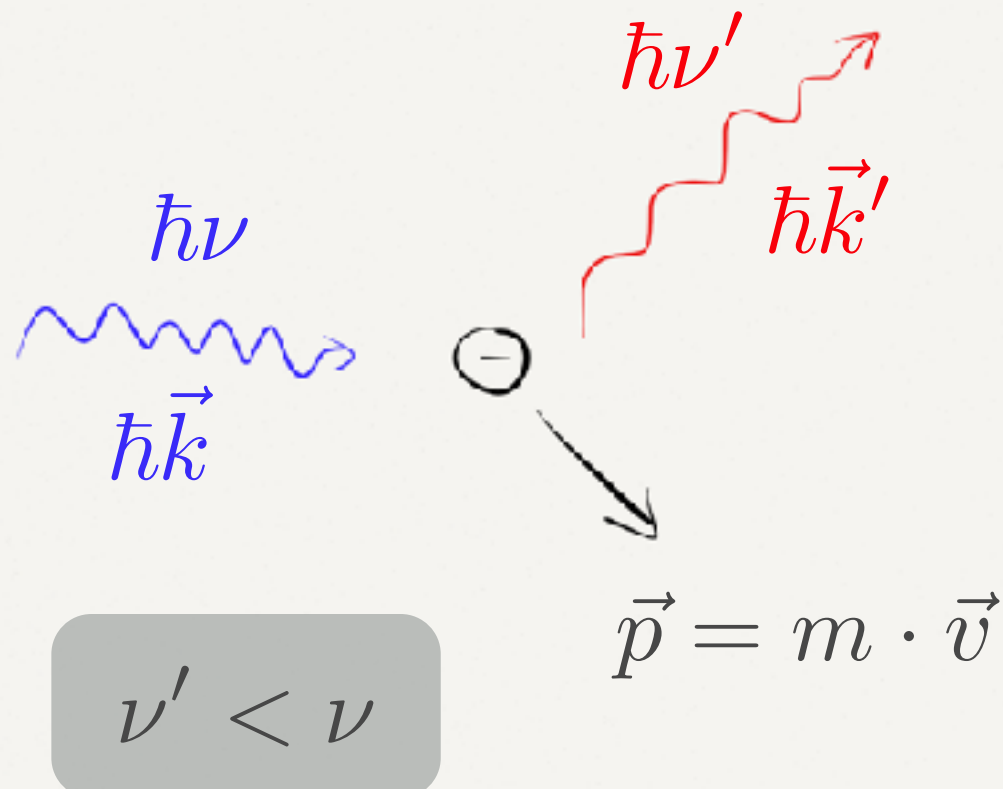


Quelle: [Wikipedia](#)

# Der Compton-Effekt 1922

Arthur Compton  
1892 - 1962

- Das zweite Experiment welches den Teilchen-Charakter von Photonen zeigt.



Quelle: [Wikipedia](#)

Jetzt wird's spannend. Wenn Wellen  
Teilcheneigenschaften haben, müssten  
dann nicht auch...

# Materiewellen

## 1924

Louis de Broglie  
1892 - 1987

- Der Welle-Teilchen-Dualismus wird zum ersten Mal von der Seite der Materie betrachtet.
- Die Gutachter der Dissertation trauten sich nicht die Arbeit zu beurteilen.
- Albert Einstein und Max Born fanden die Arbeit gut, die damit akzeptiert wurde (+ Nobelpreis 1929).



Quelle: [Wikipedia](#)



# Materiewellen 1924

Louis de Broglie  
1892 - 1987

Teilchen

Energie

$$E = mc^2 = h\nu$$

Impuls

$$\vec{p} = mv = \hbar\vec{k}$$

Welle



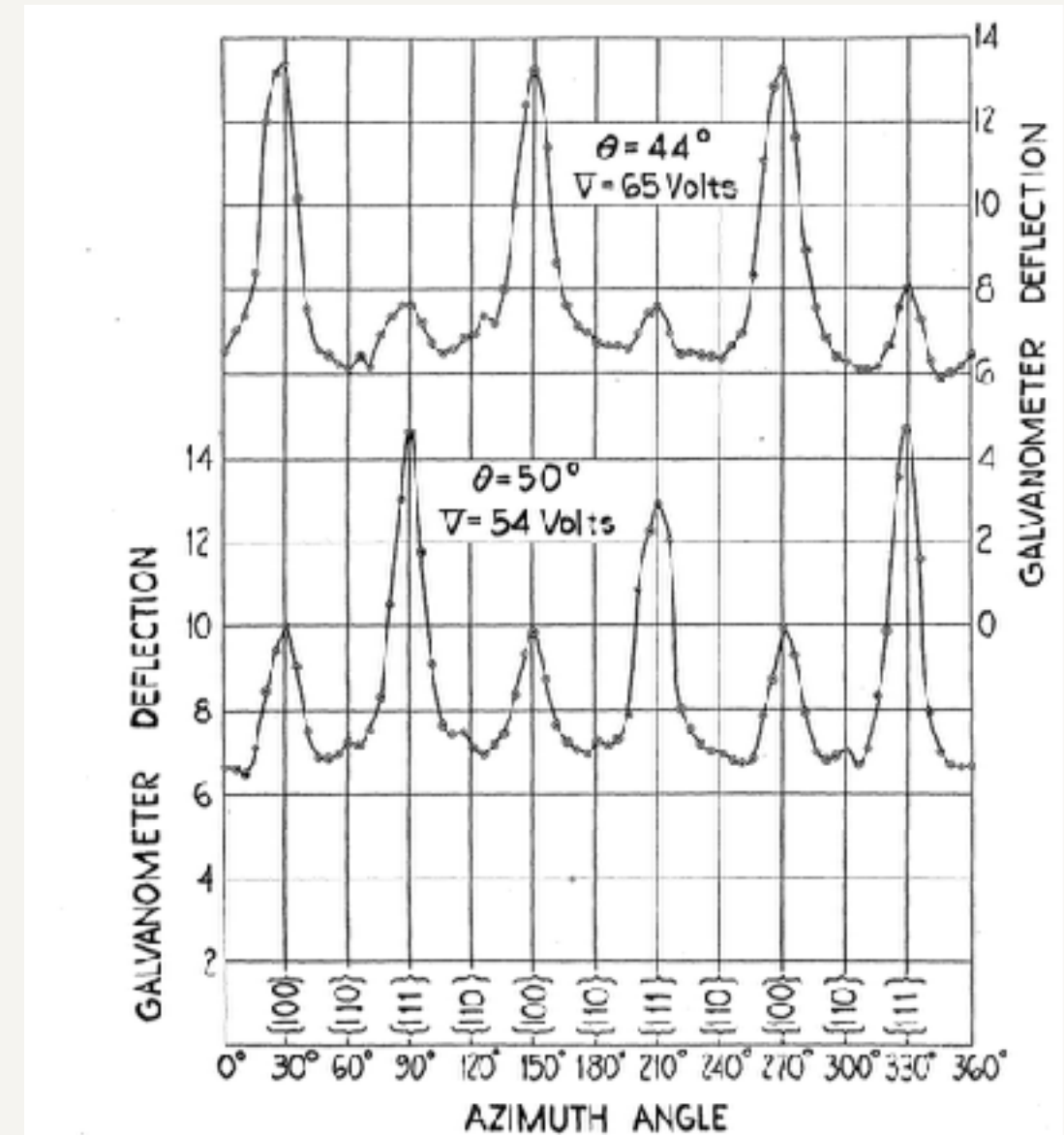
Quelle: [Wikipedia](#)

# Nachweis der Materiewellen 1927

- Der Nachweis der Beugung von Elektronen an atomaren Kristallgittern gelang 1927.
- Die Interpretation als Interferenz von Elektronen mit einer Wellenlänge passte genau zur Formel von de Broglie:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} = \hbar \vec{k} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{h}{m \cdot |\vec{v}|}$$



[3] Davisson, Germer, „Diffraction of Electrons by a Crystal of Nickel“, *Physical Review* **30** (1927), p. 705

# Heisenberg und Bohr

## Parentthese

# Bohr-Festspiele 1922

- 1922 nahm Bohr als einer der berühmtesten Physiker der Zeit die Einladung zu einem Vortrag nach Göttingen an.
- Deutschland hatte als Aggressor gerade den ersten Weltkrieg verloren.
- Der Versailler Vertrag nach dem „War to end all wars“ war gerade 3 Jahre unterschrieben!
- Bohr wurde mit riesiger Begeisterung empfangen und alle waren da - daher der Name **Bohr-Festspiele**





Aus: "Suspended in Language" von Jim Ottaviani und Leland Purvis, [G.T. Labs](#)



# Bohr-Festspiele 1922

## 21 Jahre!!

Werner Heisenberg  
1901 - 1976



Quelle: [Wikipedia](#)

Aus: "Suspended in  
Language" von Jim  
Ottaviani und Leland  
Purvis, [G.T. Labs](#)

# Bohr und Heisenberg

- Heisenberg wurde im folgenden Assistent von Bohr in Kopenhagen.
- Zusammen entwickelten Sie die Quantenmechanik und die Kopenhagener Deutung.
- Sie entwickelten eine tiefe Freundschaft zueinander.

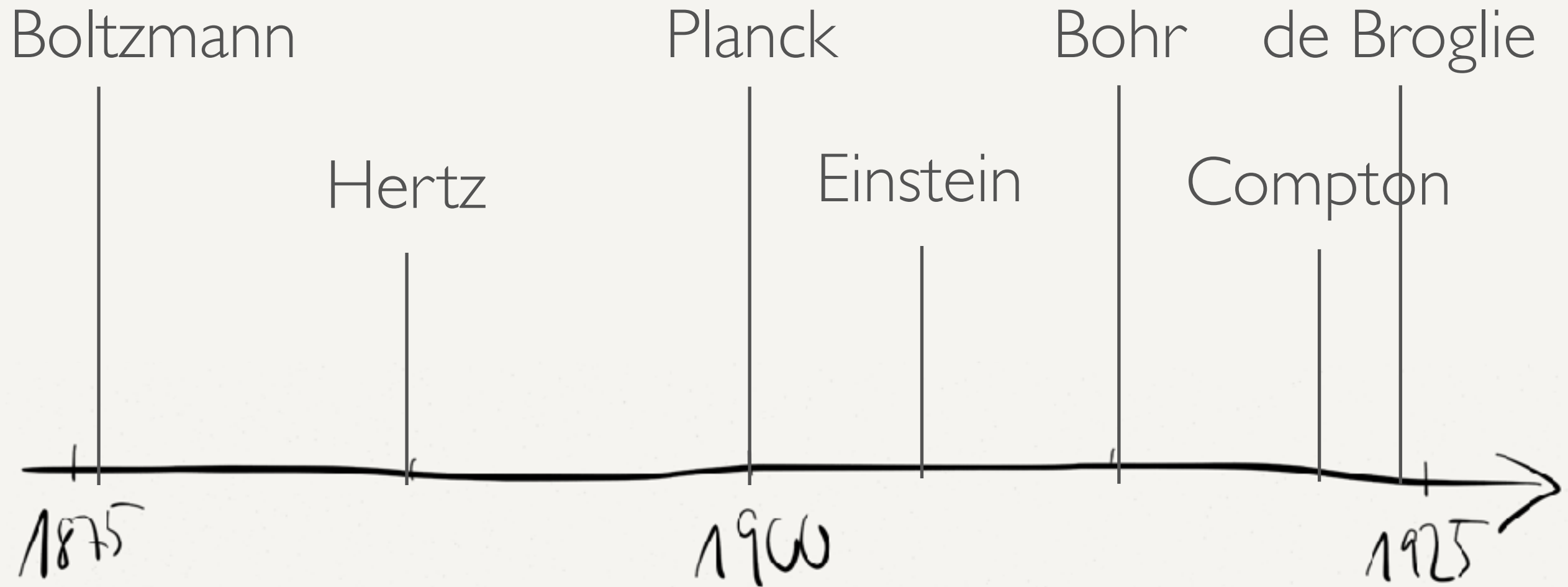


Quelle: [Niels-Bohr-Archiv](#), Kopenhagen

1925 - 1930

Die Zeitenwende

# Was bisher geschah...





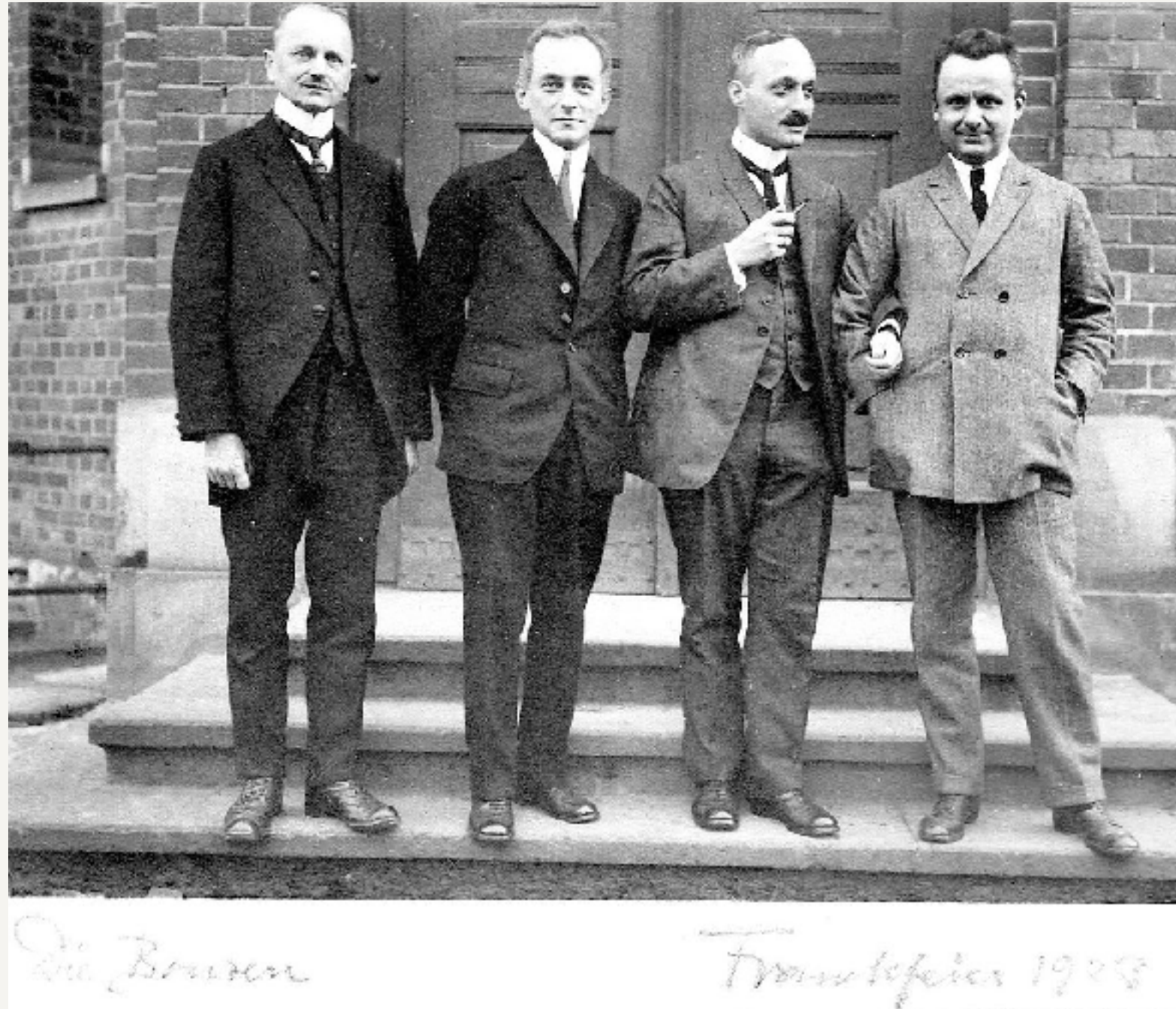
# Stand 1925

- Es gibt mehrere Experimente die deutliche Quanteneigenschaften zeigen:
  - ▶ Photoelektrischer Effekt
  - ▶ Franck-Hertz-Versuch
  - ▶ Stern-Gerlach-Versuch
  - ▶ Compton-Streuung
- Das einzige theoretische Modell (Bohr) ist falsch.

## **Was nun?**

# Matrizen-Mechanik

# Das goldene Jahrzehnt in Göttingen 1920 - 1930



[http://de.wikipedia.org/wiki/Max\\_Born#/media/File:Frankenfeier\\_1923\\_Die\\_Bonzen.jpg](http://de.wikipedia.org/wiki/Max_Born#/media/File:Frankenfeier_1923_Die_Bonzen.jpg)

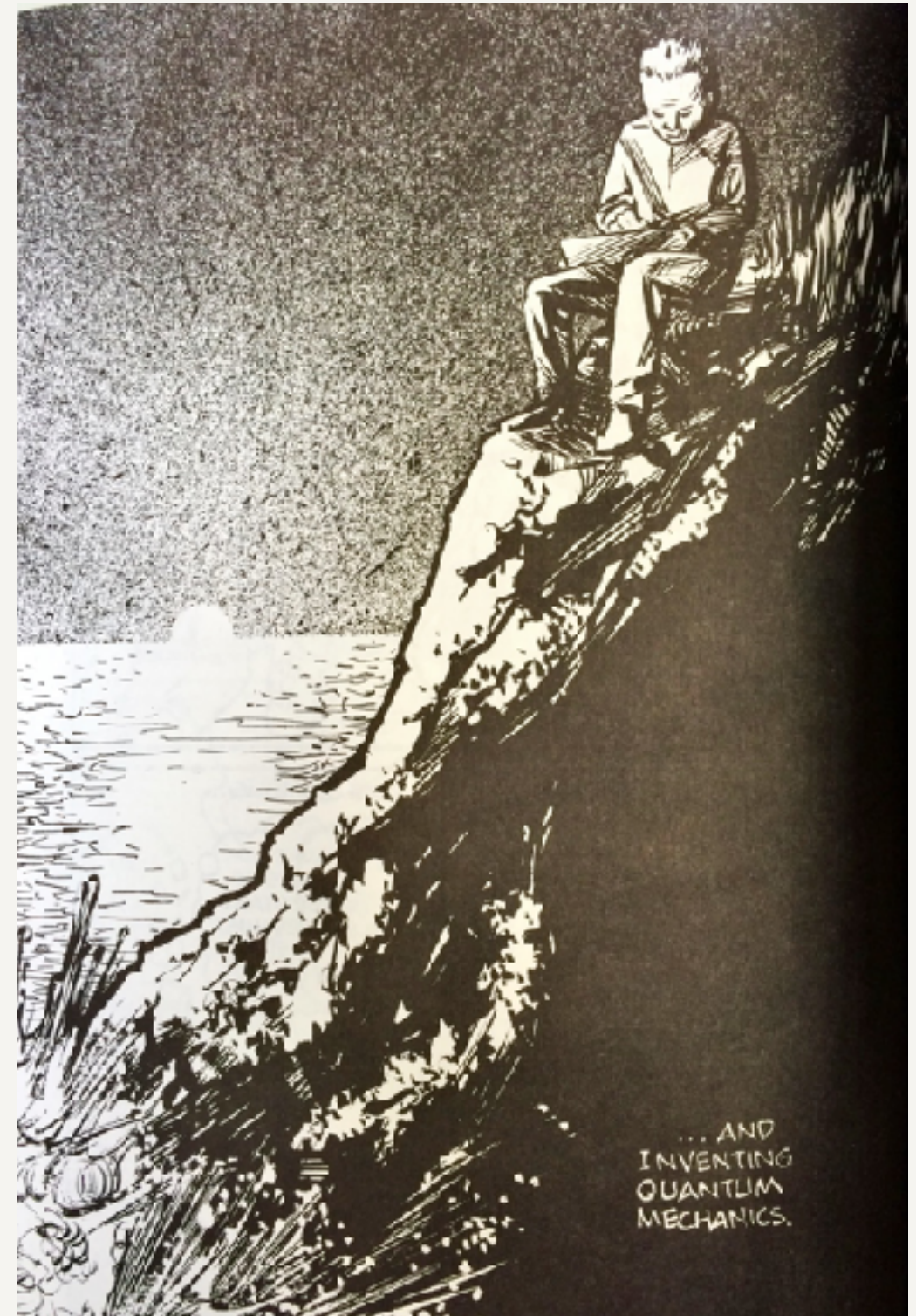


# Heuschnupfen

## 1925

- 1924 wurde Heisenberg Assistent von Max Born in Göttingen.
- 1925 wurde sein Heuschnupfen so stark, dass er die Sommerzeit auf Helgoland verbrachte.
- Dort entwickelte er den Kern dessen, was wir heute als moderne Quantenmechanik verstehen.

Aus: "*Suspended in Language*" von Jim Ottaviani und Leland Purvis, [G.T. Labs](#)





# Bergsteigen im Nebel

## 1925

879

### Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.

Von W. Heisenberg in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.

Bekanntlich läßt sich gegen die formalen Regeln, die allgemein in der Quantentheorie zur Berechnung beobachtbarer Größen (z. B. der Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden, der schwerwiegende Einwand erheben, daß jene Rechenregeln als wesentlichen Bestandteil Beziehungen enthalten zwischen Größen, die scheinbar prinzipiell nicht beobachtet werden können (wie z. B. Ort, Umlaufzeit des Elektrons),



[4] Werner Heisenberg, „Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehung.“, Zeitschrift für Physik **33** (1925), S. 879  
Online z.B. [hier](#).

Aus: "Suspended in Language" von Jim Ottaviani und Leland Purvis, [G.T. Labs](#)



# Matrizen-Mechanik 1925

Max Born  
1882 - 1970

- Max Born war als ordentlicher Professor der Chef-Entwickler der Quantenmechanik in Göttingen.



[5] Born, Jordan, „Zur Quantenmechanik.“, Zeitschrift für Physik **34** (1925),  
S. 858  
Online z.B. [hier](#).

Quelle: [Wikipedia](#)

# Matrizen-Mechanik 1925

Max Born  
1882 - 1970

858

## Zur Quantenmechanik.

Von **M. Born** und **P. Jordan** in Göttingen.

(Eingegangen am 27. September 1925.)

Die kürzlich von Heisenberg gegebenen Ansätze werden (zunächst für Systeme von einem Freiheitsgrad) zu einer systematischen Theorie der Quantenmechanik entwickelt. Das mathematische Hilfsmittel ist die Matrizenrechnung. Nachdem diese kurz dargestellt ist, werden die mechanischen Bewegungsgleichungen aus einem Variationsprinzip abgeleitet und der Beweis geführt, daß auf Grund der Heisenbergschen Quantenbedingung der Energiesatz und die Bohrsche Frequenzbedingung aus den mechanischen Gleichungen folgen. Am Beispiel des anharmonischen Oszillators wird die Frage der Eindeutigkeit der Lösung und die Bedeutung der Phasen in den Partialschwingungen erörtert. Den Schluß bildet ein Versuch, die Gesetze des elektromagnetischen Feldes der neuen Theorie einzufügen.



[5] Born, Jordan, „Zur Quantenmechanik.“, Zeitschrift für Physik **34** (1925),  
S. 858  
Online z.B. [hier](#).

Quelle: [Wikipedia](#)

# Matrizen-Mechanik 1925

Pascual Jordan  
1892 - 1987

- Heisenberg berechnete die Wahrscheinlichkeit der Übergänge innerhalb eines Atoms von einem Energie-Niveau zum anderen.
- Praktischerweise war das mathematische Institut in Göttingen in der Bunsenstraße nur ein paar Schritte vom Institut für theoretische Physik entfernt.
- So konnte Pascual Jordan Heisenberg zeigen, dass er etwas gebraucht hatte was die Mathematiker als Matrizen bezeichnen.
- Jordan war erst im mathematische Institut und dann bei Born aktiv.



[6] Born, Heisenberg, Jordan, „Zur Quantenmechanik. II.“, Zeitschrift für Physik **35** (1926), S. 557  
Online z.B. [hier](#).

Quelle: [Wikipedia](#)

# Matrizen-Mechanik 1925

Pascual Jordan  
1892 - 1987

557

## Zur Quantenmechanik. II.

Von **M. Born**, **W. Heisenberg** und **P. Jordan** in Göttingen.

(Eingegangen am 16. November 1925.)

Die aus Heisenbergs Ansätzen in Teil I dieser Arbeit entwickelte Quantenmechanik wird auf Systeme von beliebig vielen Freiheitsgraden ausgedehnt. Die Störungstheorie wird für nicht entartete und eine große Klasse entarteter Systeme durchgeführt und ihr Zusammenhang mit der Eigenwerttheorie Hermitescher Formen nachgewiesen. Die gewonnenen Resultate werden zur Ableitung der Sätze über Impuls und Drehimpuls und zur Ableitung von Auswahlregeln und Intensitätsformeln benutzt. Schließlich werden die Ansätze der Theorie auf die Statistik der Eigenschwingungen eines Hohlraumes angewendet.



[6] Born, Heisenberg, Jordan, „Zur Quantenmechanik. II.“, Zeitschrift für Physik **35** (1926), S. 557  
Online z.B. [hier](#).

Quelle: [Wikipedia](#)

# Quantenmechanik 1925

879

## Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.

Von **W. Heisenberg** in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beobachtungen der beobachtbaren Größen basiert.

858

Bekanntlich läßt sich gegen die formale der Quantentheorie zur Berechnung beobachteter Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden erheben, daß jene Rechenregeln als Beziehungen enthalten zwischen Größen, die beobachtet werden können (wie z. B. Ort, U

## Zur Quantenmechanik.

Von **M. Born** und **P. Jordan** in Göttingen.

(Eingegangen am 27. September 1925.)

Die kürzlich von Heisenberg gegebenen Ansätze werden (zunächst für Systeme von einem Freiheitsgrad) zu einer systematischen Theorie der Quantenmechanik entwickelt. Das mathematische Hilfsmittel ist die Matrizenrechnung. Diese kurz dargestellt ist, werden die mechanischen Bewegungen auf einem Variationsprinzip abgeleitet und der Beweis geführt, daß die Heisenbergschen Quantenbedingung der Energiesatz und die Unschärferelation aus den mechanischen Gleichungen folgen. Am Beispiel des harmonischen Oszillators wird die Frage der Eindeutigkeit der Lösung der Bewegungsgleichungen erörtert. Ein Versuch, die Gesetze des elektromagnetischen Feldes der Quantenmechanik anzufügen.

557

## Zur Quantenmechanik. II.

Von **M. Born**, **W. Heisenberg** und **P. Jordan** in Göttingen.

(Eingegangen am 16. November 1925.)

Die aus Heisenbergs Ansätzen in Teil I dieser Arbeit entwickelte Quantenmechanik wird auf Systeme von beliebig vielen Freiheitsgraden ausgedehnt. Die Störungstheorie wird für nicht entartete und eine große Klasse entarteter Systeme durchgeführt und ihr Zusammenhang mit der Eigenwerttheorie hermitescher Formen nachgewiesen. Die gewonnenen Resultate werden zur Ableitung der Sätze über Impuls und Drehimpuls und zur Ableitung von Auswahlregeln und Intensitätsformeln benutzt. Schließlich werden die Ansätze der Theorie auf die Statistik der Eigenschwingungen eines Hohlraumes angewendet.



# Born'sche Wahrscheinlichkeitsinterpretation 1926

- In dem Artikel interpretiert Max Born zum ersten Mal explizit die Wellenfunktion als Wahrscheinlichkeitsverteilung.
- Das Quadrat der Wellenfunktion liefert die Wahrscheinlichkeit für ein Messergebnis.
- Eine Messung liefert ein nach der Verteilung gewichtetes **zufälliges** Ergebnis.

# Heisenberg'sche Unschärferelation 1927

- Nach seiner Assistenz in Göttingen ging Heisenberg zu Bohr nach Kopenhagen und entwickelte dort die Unschärferelation.
- Experimentell: komplementäre Messgrößen (Ort/Impuls, Energie/Zeit) können nicht beliebig genau gemessen werden.
- Fundamental: kein System kann beliebig genau **sein!**

172

## **Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.**

Von **W. Heisenberg** in Kopenhagen.

Mit 2 Abbildungen. (Eingegangen am 23. März 1927.)

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst exakte Definitionen der Worte: Ort, Geschwindigkeit, Energie usw. (z. B. des Elektrons) aufgestellt, die auch in der Quantenmechanik Gültigkeit behalten, und es wird gezeigt, daß kanonisch konjugierte Größen simultan nur mit einer charakteristischen Ungenauigkeit bestimmt werden können (§ 1). Diese Ungenauigkeit ist der eigentliche Grund für das Auftreten statistischer Zusammenhänge in der Quantenmechanik. Ihre mathematische Formulierung gelingt mittels der Dirac-Jordanschen Theorie (§ 2). Von den so gewonnenen Grundsätzen ausgehend wird gezeigt, wie die makroskopischen Vorgänge aus der Quantenmechanik heraus verstanden werden können (§ 3). Zur Erläuterung der Theorie werden einige besondere Gedankenexperimente diskutiert (§ 4).

# Kopenhagener Interpretation 1927

- Mit diesen Schritten war die Formulierung der Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik abgeschlossen:
  - ▶ die neue Matrizen-Mechanik als mathematische Grundlage
  - ▶ die Born'sche Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion
  - ▶ die Heisenberg'sche Unschärferelation
- Wir werden diese Interpretation später ausführlich behandeln.

# Wellen-Mechanik

# Materiewellen

## 1924

- Kurze Erinnerung: Louis de Broglie postulierte Welleneigenschaften von Materie.
- Die Welleneigenschaften von Elektronen wurden daraufhin 1927 von Davisson und Germer nachgewiesen.

Teilchen

$$\vec{p} = mv = \hbar \vec{k}$$

Welle

Louis de Broglie  
1892 - 1987



Quelle: [Wikipedia](#)



# Wellen-Mechanik 1926

Später mehr Details zur DGL!

- Schrödinger suchte die Differentialgleichung für welche die Materie-Wellen eine Lösung waren.
- Die nach ihm benannte Schrödinger-Gleichung verfolgt mathematisch einen eher klassischen Ansatz (Hamilton-Funktion) und war dadurch zugänglicher.
- Sie beschreibt allerdings nur eine Untermenge an physikalischen Möglichkeiten, sogenannte reine Zustände.

Erwin Schrödinger  
1887 - 1961



Quelle: [Wikipedia](#)

# Wellen-Mechanik 1926

- Schrödinger war Zeit seines Lebens auf der Suche nach einer „kontinuierlichen“ bzw. deterministischen Quantenmechanik.
- „Wenn es doch bei dieser verdammten **Quantenspringerei** bleiben soll, so bedaure ich, mich überhaupt jemals mit der Quantentheorie abgegeben zu haben.“

Erwin Schrödinger  
1887 - 1961



Quelle: [Wikipedia](#)

[7] Werner Heisenberg „Der Teil und das Ganze“, dtv München, S. 94

# Äquivalenz 1926 - 1930

- Schon 1926 zeigte Schrödinger selber die mathematische Äquivalenz von Wellen- und Matrizenmechanik.
- Ab 1927 formulierte Paul Dirac eine relativistische Form der Schrödingergleichung und führte eine neue abstraktere Notation ein.
- Diese bis heute gültige Notation wurde im Lehrbuch „Principles of Quantum Mechanics“ von 1930 formalisiert.

Paul A. M. Dirac  
1902 - 1984



Quelle: [Wikipedia](#)

[8] Paul A.M. Dirac „Principles of Quantum Mechanics“, Oxford University Press (1930)

1930 - heute

Interpretationen



# Schrödingers Katze

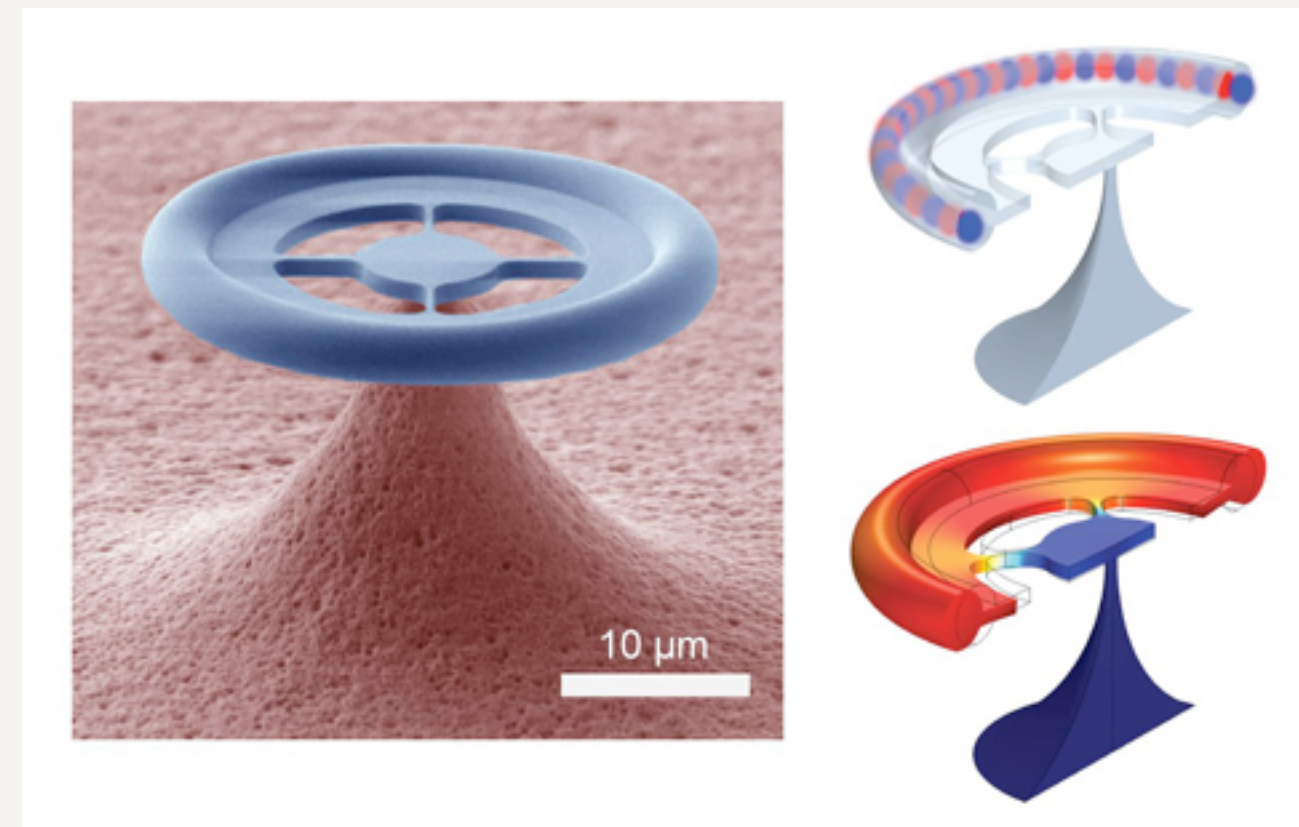
## 1935

- Schrödinger schreibt 1935 eine Zusammenfassung der aktuellen Situation der Quantenmechanik.
- Dort gebraucht er folgendes Beispiel als Begründung die Wellenfunktion nicht als „Abbild der Wirklichkeit gelten zu lassen“.

Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muß): in einem GEIGERSchen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, daß im Lauf einer Stunde *vielleicht* eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, daß die Katze noch lebt, *wenn* inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiftet haben. Die  $\psi$ -Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, daß in ihr die lebende und die tote Katze (s. v. v.) zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind.

# Moderne Schrödinger-Katzen 2012

- Diese mit dem bloßen Auge sichtbare Objekt ist in einen quantenmechanischen Überlagerungszustand gebracht worden.



E.Verhagen\*, S. Deléglise\*, S. Weis\*, A. Schliesser\* and T.J. Kippenberg  
"Quantum-coherent coupling of a mechanical oscillator to an optical cavity mode"  
[Nature 482, 63-67](#)

# Das EPR-Paradoxon 1935

- Einstein, Podolsky und Rosen versuchen die Unvollständigkeit der QM zu demonstrieren.
- Dazu konstruierten sie seltsame Zwei-Teilchen-Überlagerungszustände, die später „**verschränkte Zustände**“ genannt werden (engl. *entangled states*)

„In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. **A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty,** without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality.“

# Das EPR-Paradoxon 1935

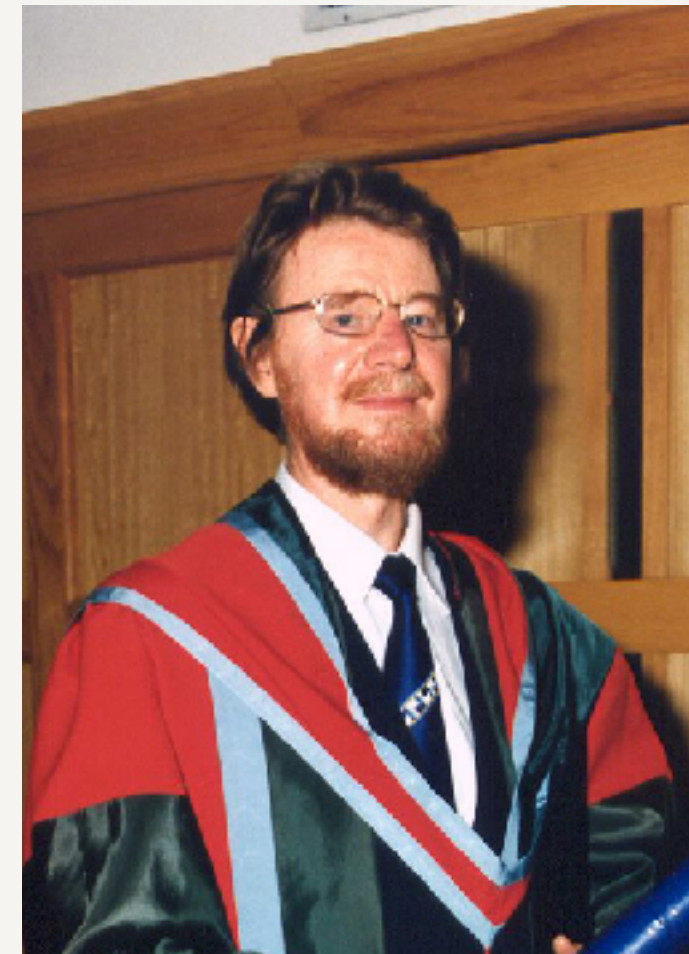




# Die Bell'sche Ungleichung 1964

- John Bell griff das EPR-Argument auf und formulierte eine **experimentell überprüfbare Ungleichung** über Determinismus in der Quantenphysik.
- Demnach kann keine Quantentheorie gleichzeitig **realistisch und lokal** sein.
- Das gilt für **alle Zeiten** weil sonst nachfolgende Theorien aktuelle Messergebnisse verletzen müssten!

John S. Bell  
1928 - 1990



Quelle: [Wikipedia](#)

# Pilot-Wellen 1952

David Bohm  
1917 - 1992

- Ursprünglich von de Broglie vorgeschlagen
- Von David Bohm unabhängig wiederentdeckt und ausgebaut zu einer vollständigen, alternativen **Formulierung** der Quantenmechanik.
- Macht aus der QM eine **deterministische** Theorie.



Quelle: [Wikipedia](#)

# Viele-Welten-Interpretation 1957

Hugh Everett  
1930 - 1982

- Um das Problem mit dem Kollaps der Wellenfunktion zu lösen führte Everett die Viele-Welten-Interpretation ein.
- In ihr wird jedes mögliche Ereignis einer Superposition in unterschiedlichen parallelen Universen **realisiert**.



Quelle: [Wikipedia](#)

# Literatur

- [1] Max Planck, „*Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum*“, Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft 2 (1900), S. 237 - 245, [Wikipedia](#)
- [2] Ludwig Boltzmann, „*Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über die das Wärmegleichgewicht*“, namentlich Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien (II) (1877) **76**, S. 373, [Google](#)
- [3] Davisson, Germer, „*Diffraction of Electrons by a Crystal of Nickel*“, [Physical Review 30 \(1927\), p. 705](#)
- [4] Werner Heisenberg, „*Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehung.*“, Zeitschrift für Physik **33** (1925), S. 879
- [5] Born, Jordan, „*Zur Quantenmechanik.*“, Zeitschrift für Physik **34** (1925), S. 858
- [6] Born, Heisenberg, Jordan, „*Zur Quantenmechanik. II.*“, Zeitschrift für Physik **35** (1926), S. 557
- [7] Werner Heisenberg „*Der Teil und das Ganze*“, dtv München, S. 94
- [8] Paul A.M. Dirac „*Principles of Quantum Mechanics*“, Oxford University Press (1930)



# Stern-Gerlach-Versuch 1922