

Die Geschichte der Quantentheorie

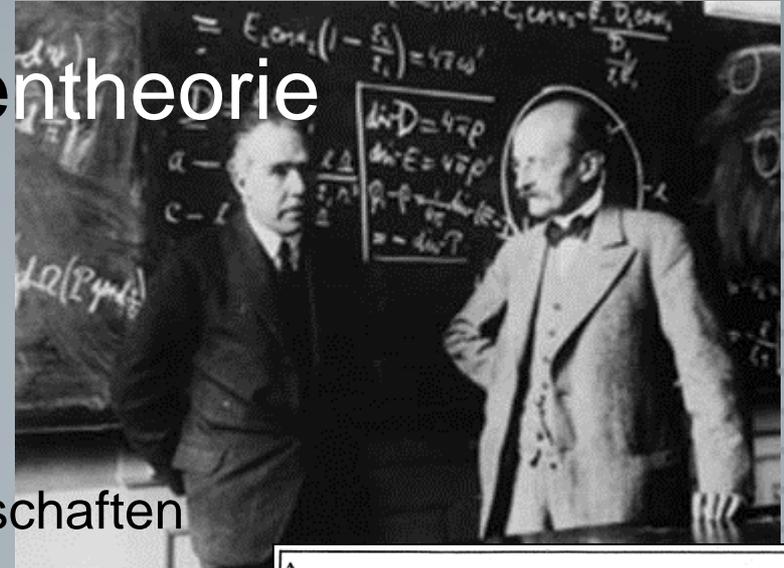
Mythen und Fakten

Oliver Passon

Bergische Universität Wuppertal

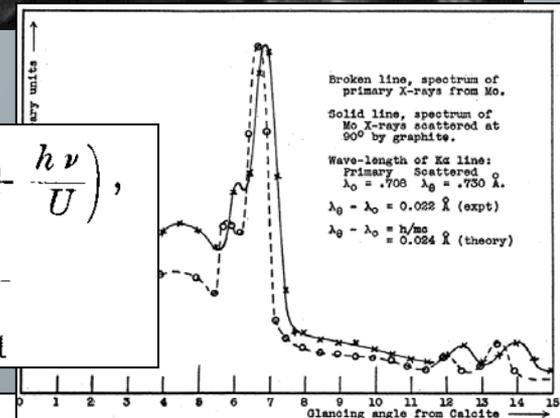
Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften

Physik und ihre Didaktik



$$\frac{1}{\vartheta} = \frac{k}{h\nu} \log \left(1 + \frac{h\nu}{U} \right),$$

$$U = \frac{h\nu}{e^{k\vartheta} - 1}$$



$$W = \left(\frac{v}{v_0} \right)^{\frac{N}{R} \frac{E}{\beta v}}$$

$$\nu = \frac{\pi^2 m e^2 E^2}{2h^3} \left(\frac{1}{f^2(\tau_2)} - \frac{1}{f^2(\tau_1)} \right)$$

Die Physik hat eine ahistorische Lehrtradition

- Keine Beschäftigung mit „Quellen“
- Keine Beschäftigung mit „klassischen“ Positionen

Positiv ausgedrückt:

Physikunterricht (in Schule und Hochschule) zielt primär auf die Vermittlung von

- Kenntnissen und
- Praktiken **aktueller** wissenschaftlicher Theorien

ABER: Der Unterricht ist häufig „historisch gerahmt“

- Historische Bemerkungen in der Einleitung/Exkurs
- Bezeichnungen wie „Newtonsches Axiom“ etc. verweisen auf die historische Dimension
- Fragen der Priorität spielen eine große Rolle (→Belohnungssystem)

Die Qualität dieser historischen Anmerkungen ist in der Regel bescheiden

(und dabei geht es nicht um Vereinfachungen, Ungenauigkeiten, kleinere Fehler etc.)

Phys. Ed. Vol. 14 1979

History and quasi-history in physics education—part 1

M A B WHITAKER

Department of Physics, New University of Ulster, N. Ireland

- „Whig history“: Zielgerichtete Entwicklung zum jetzigen Kenntnisstand (als „Fortschrittsgeschichte“)
- Auswahl nur derjenigen Gegenstände, die aktuelle Bedeutung haben
- Ausblendung der...
 - ...Motive der Forscher
 - ...sozialen und ökonomischen Bedingungen
- „Rationale Rekonstruktion, die so tut, als ob sie sich tatsächlich so ereignet hat“

Beispiele:

- Galileis Fallversuche vom schiefen Turm
- Der angebliche Zusammenhang zwischen dem *Michelson-Morley Ätherdrift-Experiment* und Einsteins Entwicklung der SRT

Warum entsteht quasi-Geschichte?

13.-17. Juli 1970 , MIT: *International Working Seminar on the Role of the History of Physics in Physics Education.*

1. The use and abuse of historical teaching in physics*
by Martin J. Klein

Science Vol 183 1974

Should the History of Science be Rated X?

The way scientists behave (according to historians)
might not be a good model for students.

Stephen G. Brush

Science & Education 1, 349–363, 1992.

A Sense of History: History of Science and the Teaching of Introductory Quantum Theory

HELGE KRAGH*

Warum entsteht quasi-Geschichte?

- **M. J. Klein:** *Strukturelle Gründe* für die Verzerrung, da „Geschichte der Physik“ und „Physik“ verschiedene Ziele verfolgen → Geschichte sollte nicht in den Physikunterricht integriert werden!
- **M. A. B. Whitaker:** *Didaktische Gründe* für Verzerrung. Quasi-Geschichte bringt die „wissenschaftlichen Fakten“ in eine rationale Ordnung, die für Prüfungen besser gelernt werden kann.
- **S. G. Brush:** *Ideologische Gründe* für die Verzerrung. Quasi-Geschichte entwickelt eine (vorgebliche) Tradition, in die sich Studierende (und Lehrende) gerne hineinstellen wollen („neutraler Faktenfinder...“).

Klar: Mehrere (und noch andere) Gründe können gleichzeitig anwesend sein...

Definition von Quasi-Geschichte

„Quasi-Geschichte“ = Historisches Narrativ, das eine **Traditionslinie** erzeugt, nach der die Physik **rational** und **evidenzbasiert** voranschreitet.

„Schlechte Geschichte, aber gute Physik“

„Die“ Quasigeschichte der (frühen) Quantentheorie

1. Die Quantentheorie entstand durch die Erklärung der Schwarzkörperstrahlung durch Max Planck im Jahr 1900. Um die „UV-Katastrophe“ bei hohen Frequenzen zu vermeiden, musste er diskontinuierliche Energien einführen ($\varepsilon = h\nu$).
2. Einstein wendete 1905 Plancks Idee auf Licht an, führte das Lichtquant ein und erklärte damit den photoelektrischen Effekt, der mit der Wellentheorie des Lichts nicht erklärbar ist.
3. Das Bohrsche Atommodell 1913 kombinierte Ideen von Planck und Einstein: Elektronen können sich nur auf diskreten Bahnen aufhalten und senden beim Übergang Photonen aus.
4. Comptons Entdeckung und Erklärung (1922/23) des nach ihm benannten Effektes („Wellenlängenänderung von Röntgenstrahlung bei Streuung an Elektronen“) lieferte den unzweideutigen Beweis für die Lichtquantenhypothese.



= „richtig“



= missverständlich



= umstritten



= „unrichtig“

„Die“ Quasigeschichte der (frühen) Quantentheorie

1. Die Quantentheorie entstand durch die Erklärung der Schwarzkörperstrahlung durch Max Planck im Jahr 1900. Um die „UV-Katastrophe“ bei hohen Frequenzen zu vermeiden, musste er diskontinuierliche Energien einführen ($\varepsilon = h\nu$).
2. Einstein wendete 1905 Plancks Idee auf Licht an, führte das Lichtquant ein und erklärte damit den photoelektrischen Effekt, der mit der Wellentheorie des Lichts nicht erklärbar ist.
3. Das Bohrsche Atommodell 1913 kombinierte Ideen von Planck und Einstein: Elektronen können sich nur auf diskreten Bahnen aufhalten und senden beim Übergang Photonen aus.
4. Comptons Entdeckung und Erklärung (1922/23) des nach ihm benannten Effektes („Wellenlängenänderung von Röntgenstrahlung bei Streuung an Elektronen“) lieferte den unzweideutigen Beweis für die Lichtquantenhypothese.



= „richtig“



= missverständlich



= umstritten



= „unrichtig“

Handelt es sich dabei wirklich um eine „Quasi-Geschichte“?

- **Traditionslinie:** Energiequant \rightarrow Lichtquant \rightarrow Erklärung/Anwendung/Vorhersagen \rightarrow experimentelle Überprüfung
- Anomalie als Auslöser der Theoriendynamik („UV Katastrophe“, „photoelektrischer Effekt“)
- Mythos von der unzweideutigen experimentellen Evidenz (Compton Effekt)
- Vollständige Vernachlässigung sozio-ökonomischer und historischer Rahmenbedingungen...

Zu 1) Schwarzkörperstrahlung, Planck und die Quantisierung der Energie

1. Die Quantentheorie entstand durch die Erklärung der Schwarzkörperstrahlung durch Max Planck im Jahr 1900. Um die „UV-Katastrophe“ bei hohen Frequenzen zu vermeiden, musste er diskontinuierliche Energien einführen ($\varepsilon = h\nu$).

 = „richtig“  = missverständlich  = umstritten  = „unrichtig“

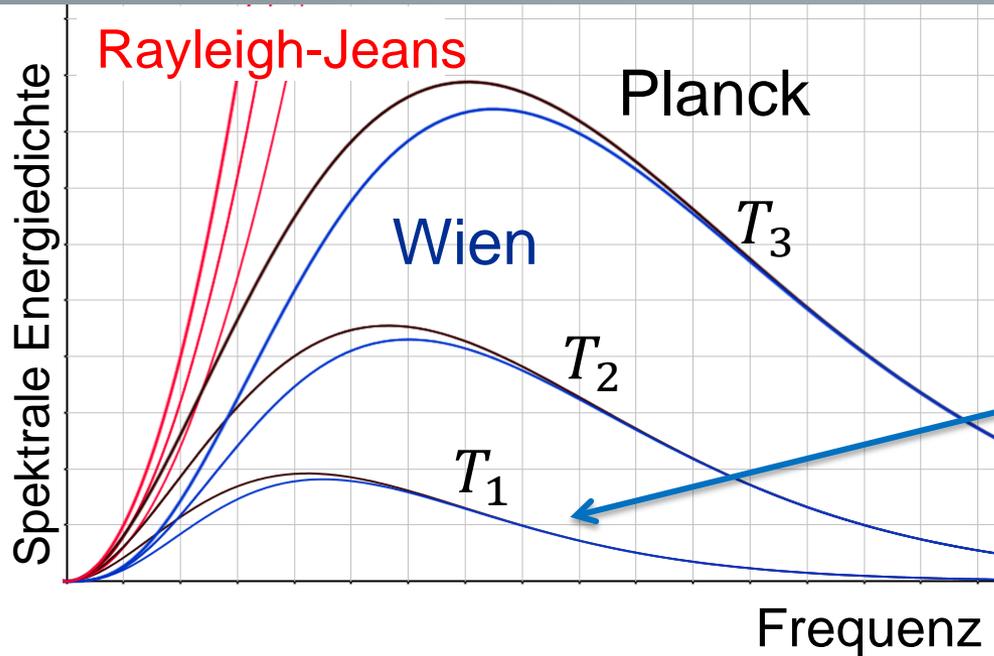
Schwarzer Körper = idealisierter Körper, der sämtliche Strahlung absorbiert

Kirchhoff (1859): Spektrale Energiedichte u sollte durch eine **universelle Funktion** $u(T, \nu)$

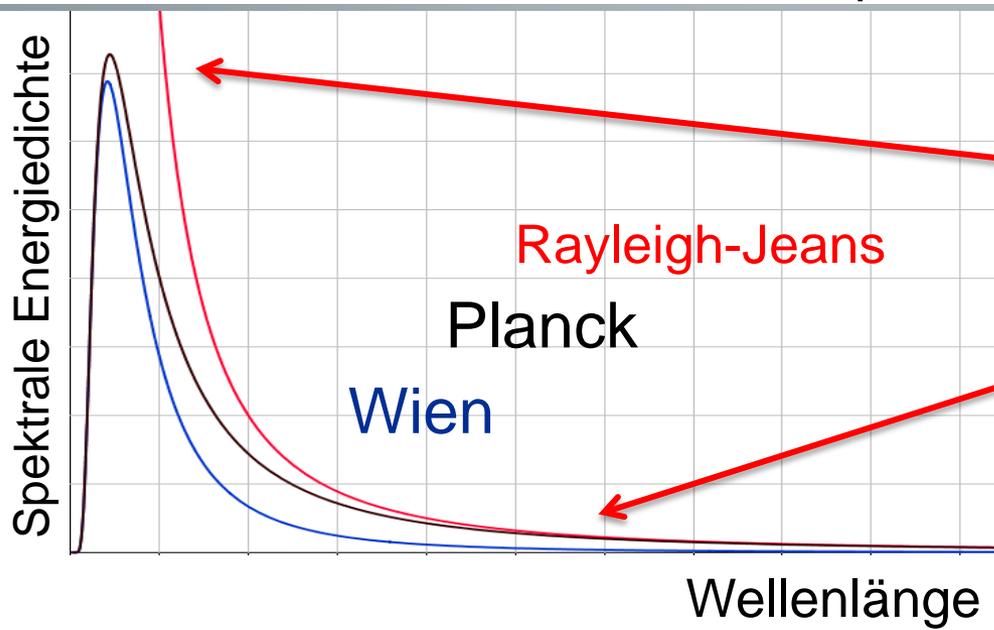
Wien(1893) : $u(T, \nu) = \nu^3 \cdot f(\nu/T)$ (Wiensche Verschiebungsgesetz)

Anmerkung:

$u(T, \nu)$ ist hier Strahlungsenergie pro Volumen und Frequenzintervall, d.h. in $\frac{Js}{m^3}$



Wien beschreibt den Bereich **kleiner** Wellenlängen ($h\nu \gg kT$)

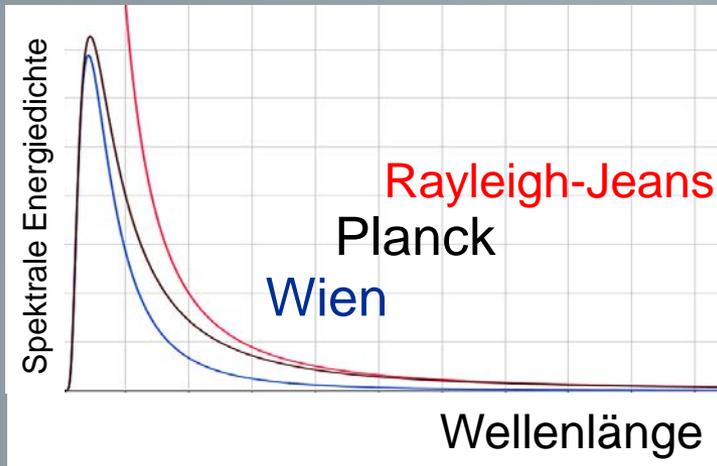


R-J divergiert für kleine Wellenlängen (UV Katastrophe)

R-J beschreibt den Bereich **großer** Wellenlängen ($h\nu \ll kT$)

Das **R-J** Gesetz folgt klassisch aus dem aus dem Gleichverteilungssatz

Interpolierte Planck zwischen den Gesetzen von Wien und Rayleigh-Jeans?



$$u_{\text{R-J}}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT \quad (1905)$$



$$e^x \approx 1 + x \quad \text{bei } x \ll 1$$

$$u_{\text{Planck}}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1900)$$



$$e^x - 1 \approx e^x \quad \text{bei } x \gg 1$$

$$u_{\text{Wien}}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}} \quad (1896)$$

Das Wiensche Strahlungsgesetz ist nur quantentheoretisch zu verstehen

Planck wollte nicht die UV-Divergenz beheben. Z. Bsp. das Versagen des Dulong-Petit Gesetzes kompromittierte das Äquipartitionstheorem.

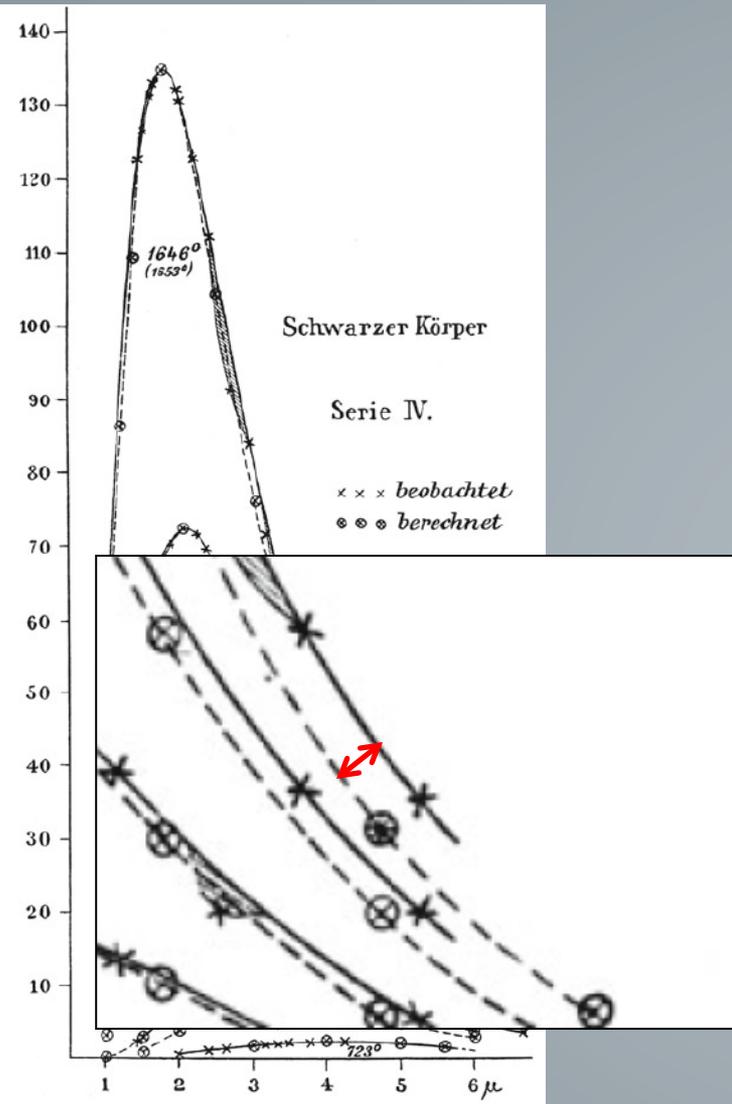
M. J. Klein (1962) *Max Planck and the beginnings of quantum theory. Ar. Hist. Ex.Sci.1: 459-479.*

Plancks Weg zu seinem Strahlungsgesetz

- Modellierung des Körpers durch geladene Oszillatoren
- Beweis, dass für die mittlere Energie eines Oszillators mit Frequenz ν gilt: (1899)

$$u(T, \nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot E(T, \nu)$$

- Suche nach der Energie mittels: $\frac{dS}{dE} = \frac{1}{T}$
- 1899 wendet Planck eine *ad hoc* Entropiefunktion an, die auf das **Wiensche Strahlungsgesetz** führt (in diesem Zusammenhang führt er das spätere Wirkungsquantum h bereits als fundamentale Naturkonstante ein).



- Messungen von Lummer und Pringsheim deuten bereits 1899 auf Abweichungen vom Wien Gesetz hin.
- Rubens und Kurlbaum erweiterten 1900 den Messbereich auf 51.2μ (bei T=1773K). Bei großen Wellenlängen gilt: $u \sim T$.
- Planck kann die Entropiefunktion so modifizieren, dass er im Oktober 1900 (ohne physikalische Begründung) ein neues Strahlungsgesetz angeben kann:

$$u(T, \nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{b\nu}{\exp\left(\frac{a\nu}{T}\right) - 1}$$

Aus: Lummer O., Pringsheim E. (1899) Die Vertheilung der Energie im Spectrum des schwarzen Körpers und des blanken Platins. Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft 1(12):215–235

Am 14. Dezember 1900 trägt Planck eine Begründung der neuen Strahlungsformel vor:

- Er kannte das Resultat – konnte also „rückwärts“ vorgehen (d.h. Entropiefunktion motivieren, die mit $\frac{dS}{dE} = \frac{1}{T}$ auf das gesuchte $u(\nu, T)$ führt)

$$S_\nu = k \ln \frac{\left(1 + \frac{U}{h\nu}\right)^{\left(1 + \frac{U}{h\nu}\right)}}{\left(\frac{U}{h\nu}\right)\left(\frac{U}{h\nu}\right)} \simeq k \ln \frac{\left(1 + \frac{U}{h\nu}\right)!}{\left(\frac{U}{h\nu}\right)!}$$

- Bezugnahme auf Boltzmann (1877): $S = k \log W$
- Gesucht wird die Anzahl der Möglichkeiten die Energie E auf N Resonatoren zu verteilen

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.

Aus der Combinationslehre ergibt sich die Anzahl aller möglichen Complexionen zu

$$\frac{N \cdot (N + 1) \cdot (N + 2) \cdot \dots \cdot (N + P - 1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot P} = \frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)! P!} = W$$

und mit genügender Annäherung $= \frac{(N + P)^{N + P}}{N^N P^P}$.

Beweis (Kamerlingh Onnes und Ehrenfest 1914):

Veranschauliche die Verteilung von P Energieelementen ε auf N Oszillatoren als Zeichenkette: $\varepsilon\varepsilon | |\varepsilon | \varepsilon$ (hier: $N = 4, E = 4\varepsilon$)

Eine solche Zeichenkette enthält P mal das Symbol „ ε “ und $N - 1$ mal das Symbol „|“. Somit können $(N + P - 1)!$ Permutationen gebildet werden. Vertauschungen innerhalb der beiden Symbole führen aber auf die selbe Verteilung. Deshalb Division durch $(N - 1)!$ und $P!$

Plancks Beziehung für die Entropie führt auf das Strahlungsgesetz:

$$u(T, \nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{\epsilon}{\exp\left(\frac{\epsilon}{kT}\right) - 1}$$

Funktion von $\frac{\epsilon}{kT}$, das Wiensche Verschiebungsgesetz erfordert
aber $u(\nu/T) \rightarrow \epsilon = h\nu$

Ist dies die Geburtsstunde der Quantentheorie?

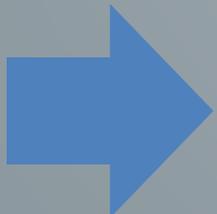
T S Kuhn (1978) „Black-Body Radiation and the Quantum Discontinuity“ UCP: Chicago.

Die zwei Lesarten der Beziehung

$$W = \frac{(P+N-1)!}{(N-1)!P!}$$

- i. **Diskontinuierliche Lesart:** Die Gleichung gibt die Anzahl der Möglichkeiten an, P **diskrete Energieelemente** auf N Resonatoren zu verteilen. Die **diskrete** Emission und Absorption wird dadurch nahegelegt.

- ii. **Kontinuierliche Lesart:** Die Gleichung gibt die Anzahl der Möglichkeiten an, N Resonatoren auf **diskrete „Energiezellen“** zu verteilen (unter Beachtung der Energieerhaltung). Innerhalb jeder „Zelle“ kann der Resonator beliebig liegen. Dadurch sind **kontinuierliche** Strahlungsvorgänge mit diesem Bild vereinbar.



Auf diese Weise wird auch verständlich, warum Plancks Gesetz unmittelbar als experimentell bestätigt galt – aber keine Diskussion über „Quantisierung“ auslöste...

1. Die Quantentheorie entstand durch die Erklärung der Schwarzkörperstrahlung durch Max Planck im Jahr 1900. Um die „UV-Katastrophe“ bei hohen Frequenzen zu vermeiden, musste er diskontinuierliche Energien einführen ($\varepsilon = h\nu$).
2. Einstein **wendete** 1905 **Plancks Idee auf Licht an**, führte das Lichtquant ein und erklärte damit den photoelektrischen Effekt, **der mit der Wellentheorie des Lichts nicht erklärbar ist**.

 = „richtig“  = missverständlich  = umstritten  = „unrichtig“

6. Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.

- Einstein zitiert das Plancksche Strahlungsgesetz in § 2 (von 9) – aber nur um zu zeigen, dass es für $\lambda \rightarrow \infty$ in das „**R-J Gesetz**“ übergeht...
- Seine eigentliche Diskussion basiert auf dem **Wienschen** Strahlungsgesetz
- Er betrachtet Strahlung in einem Volumen V_0 und berechnet die Wahrscheinlichkeit für die Fluktuation in ein Teilvolumen V . Dies vergleicht er mit der Fluktuationswahrscheinlichkeit eines Gases aus n Teilchen:

$$W = \left(\frac{v}{v_0} \right)^n$$

$$W = \left(\frac{v}{v_0} \right)^{\frac{N}{R} \frac{E}{\beta \nu}}$$

entspricht $E/h\nu$

Monochromatische Strahlung von geringer Dichte (innerhalb des Gültigkeitsbereiches der Wienschen Strahlungsformel) verhält sich in wärmetheoretischer Beziehung so, wie wenn sie aus voneinander unabhängigen Energiequanten von der Größe $R\beta\nu/N$ bestünde.

§ 7. Über die Stokessche Regel.

§ 8. Über die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch Belichtung fester Körper.

§ 9. Über die Ionisierung der Gase durch ultraviolettes Licht.

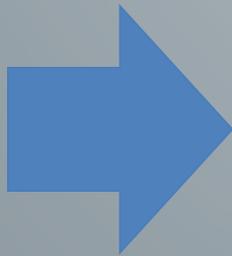
Einstein 1906: Plancks Energiequanten und Einsteins Lichtquanten

12. Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption; von A. Einstein.

In einer letztes Jahr erschienenen Arbeit¹⁾ habe ich gezeigt, daß die Maxwellsche Theorie der Elektrizität in Verbindung mit der Elektronentheorie zu Ergebnissen führt, die mit den Erfahrungen über die Strahlung des schwarzen Körpers im Widerspruch sind.

Diese Beziehung wurde entwickelt für einen Bereich, der dem Bereich der Gültigkeit der Wienschen Strahlungsformel entspricht.

Damals schien es mir, als ob die Plancksche Theorie der Strahlung²⁾ in gewisser Beziehung ein Gegenstück bildete zu meiner Arbeit. Neue Überlegungen, welche im § 1 dieser Arbeit mitgeteilt sind, zeigten mir aber, daß die theoretische Grundlage, auf welcher die Strahlungstheorie von Hrn. Planck ruht, sich von der Grundlage, die sich aus der Maxwell'schen Theorie und Elektronentheorie ergeben würde, unterscheidet, und zwar gerade dadurch, daß die Plancksche Theorie implizite von der eben erwähnten Lichtquantenhypothese Gebrauch macht.



- Einstein vertritt die „diskontinuierliche Lesart“
- Einstein vermutet also, dass seine Lichtquanten den Planckschen Energiequanten entsprechen!

8. Vereinfachte Ableitung der kombinatorischen Formel, welche der Planckschen Strahlungstheorie zugrunde liegt;
von P. Ehrenfest u. H. Kamerlingh Onnes.

Anhang.

Der Gegensatz zwischen der Energiestufenhypothese von Planck und der Energiequantenhypothese von Einstein.

Man identifizierte nämlich die Planckschen „Energieelemente“ weitgehend mit den Einsteinschen „Lichtquanten“ und sagte dementsprechend: der Unterschied zwischen Planck und Einstein besteht darin, daß der letztere auch im leeren Raume die Existenz unabhängiger Energiequanta annimmt, der erstere aber nur im Inneren der Materie, in den Resonatoren.

Bsp.: $P = 3$ auf $N = 2$

Einstein: $2^3 = 8$ unterscheidbare Verteilungen

Planck: $\frac{(3+2-1)!}{(3)!(2-1)!} = 4$ unterscheidbare Verteilungen

	A	B	C
I	1	1	1
II	1	1	2
III	1	2	1
IV	1	2	2
V	2	1	1
VI	2	1	2
VII	2	2	1
VIII	2	2	2

Zusammenfassend: Die Einsteinsche Auffassung führt notwendig zur Entropieformel (α); damit notwendig zur Wienschen Strahlungsformel und sicher nicht zur Planckschen. *Der formelle Kunstgriff von Planck (Verteilung von P Energieelementen ϵ über die N Resonatoren) kann nicht im Sinne der Einsteinschen Lichtquanten interpretiert werden.*

Leiden, Oktober 1914.

Einsteins nach dem Vorbild der statistischen Mechanik gebildeten **unterscheidbaren** und **lokalisierbaren** Lichtquanten entsprechen nicht dem „Photon“ des heutigen Verständnisses

So **radikal** die Lichtquantenhypothese war – in dieser Hinsicht war sie noch **zu** klassisch...und ihre Ablehnung rationaler als häufig behauptet

Bis zur Entdeckung des **Compton-Effekts** hatte die Lichtquantenhypothese auch kaum Anhänger...

1. Die Quantentheorie entstand durch die Erklärung der Schwarzkörperstrahlung durch Max Planck im Jahr 1900. Um die „UV-Katastrophe“ bei hohen Frequenzen zu vermeiden, musste er diskontinuierliche Energien einführen ($\varepsilon = h\nu$).
2. Einstein wendete 1905 Plancks Idee auf Licht an, führte das Lichtquant ein und erklärte damit den photoelektrischen Effekt, der mit der Wellentheorie des Lichts nicht erklärbar ist.
3. Das Bohrsche Atommodell 1913 kombinierte Ideen von Planck und Einstein: Elektronen können sich nur auf diskreten Bahnen aufhalten und senden beim Übergang Photonen aus.
4. Comptons Entdeckung und Erklärung (1922/23) des nach ihm benannten Effektes („Wellenlängenänderung von Röntgenstrahlung bei Streuung an Elektronen“) lieferte den unzweideutigen Beweis für die Lichtquantenhypothese.



= „richtig“



= missverständlich

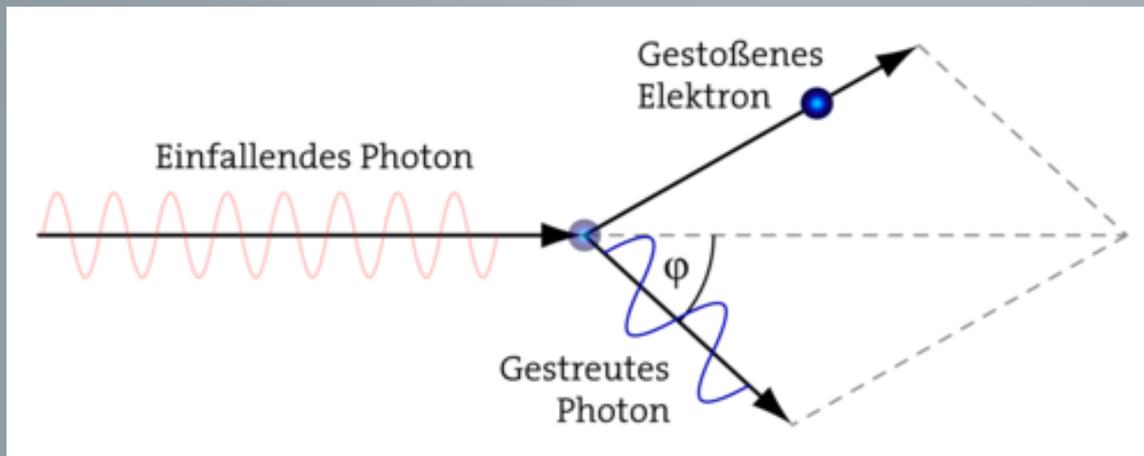


= umstritten



= „unrichtig“

Der Compton-Effekt und die Teilchennatur des Lichts



$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0e c} (1 - \cos \varphi).$$

Streuung von „punktförmigen Photonen“ an „Elektronen“ analog zur klassischen Mechanik (1923 – zwei Jahre vor Entdeckung der Quantenmechanik)

“It was Compton who suggested the name photon for the light quantum. His discovery and explanation of the Compton effect earned him a share of the Nobel Prize in Physics in 1927.”

Compton-Effekt - Wikipedia | The Nobel Prize in Physics ...

Suchen

This website uses cookies to improve user experience. By using our website you consent to all cookies in accordance with our [Cookie Policy](#). [I UNDERSTAND](#)

Nobelprize.org

The Official Web Site of the Nobel Prize

Video | Podcast | About Us | Search

Home | Nobel Prizes and Laureates | Nomination | Ceremonies | Alfred Nobel | Educational | Events

Nobel Prizes and Laureates

Physics Prizes | 1927

About the Nobel Prize in Physics 1927
Summary
[Presentation Speech](#)

▶ [Arthur H. Compton](#)
▶ [C.T.R. Wilson](#)

All Nobel Prizes in Physics
All Nobel Prizes in 1927

The Nobel Prize in Physics 1927

Arthur H. Compton, C.T.R. Wilson

Share this: [f](#) [G+](#) [t](#) [+](#) [e](#) 5



2016 Nobel Laureates

Join us on Facebook

Nobel Women

To cite this page

The Nobel Prize in Physics 1927 was divided equally between Arthur Holly Compton "for his discovery of the effect named after him" and Charles Thomson Rees Wilson "for his method of making the paths of electrically charged particles visible by condensation of vapour".



“[...] the Compton effect has, through the latest evolutions of the atomic theory, got rid of the original explanation based upon a corpuscular theory. The new wave mechanics, in fact, lead as a logical consequence to the mathematical basis of Compton's theory. Thus the effect has gained an acceptable connection with other observations in the sphere of radiation.” (Nobel Prize, 1927)

Karl M. G. Siegbahn

**9. Über den Comptoneffekt;
von E. Schrödinger**

Wir zeigen, daß sich in enger Anlehnung an das oben genannte Brillouinsche Resultat eine wellenmechanische Deutung der Comptonschen Beziehungen geben läßt, welche nicht minder einfach ist als die quantenmäßige Impuls-Energiebetrachtung.

Siehe auch: J. Strnad 1986 „The Compton effect - Schrödinger's treatment“ *Eur. J. Phys.* **7**: 217-221
(Eine solche **semiklassische** Behandlung ist auch für den Photoeffekt möglich...)

Die kinematische Rechnung klärt den Zusammenhang zwischen Energie und Streuwinkel. Für die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Streuwinkels gilt:

**Über die Streuung von Strahlung
durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen
Quantendynamik von Dirac.**

Von **O. Klein** und **Y. Nishina** in Kopenhagen.

(Eingegangen am 30. Oktober 1928.)

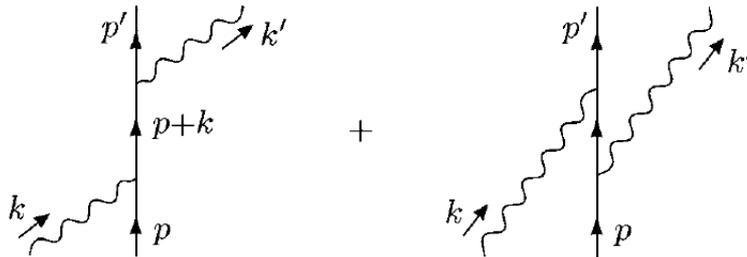
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \text{ Klein-Nishina} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{m^2} \left(\frac{E'}{E} \right)^2 \left[\frac{E'}{E} + \frac{E}{E'} - \sin^2 \theta \right]$$

mit:
$$\frac{E'}{E} = \frac{1}{1 + \frac{E}{m}(1 - \cos \theta)}$$

Relativistische und quantenmechanische Behandlung, die den Spin berücksichtigt – das Strahlungsfeld aber klassische behandelt (semiklassische Theorie) – also „ohne Photonen“.

5.5 Compton Scattering

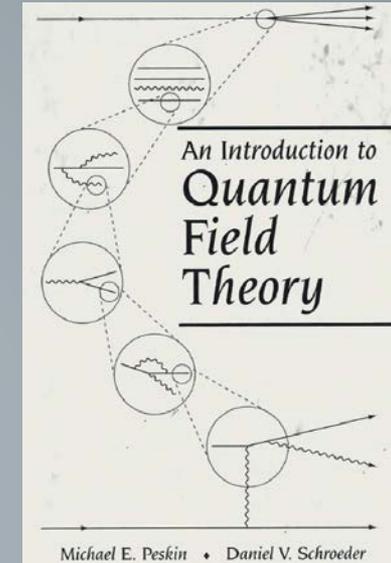
This is our first example of a calculation involving two diagrams:



$$\frac{d\sigma}{d \cos \theta} = \frac{\pi \alpha^2}{m^2} \left(\frac{\omega'}{\omega}\right)^2 \left[\frac{\omega'}{\omega} + \frac{\omega}{\omega'} - \sin^2 \theta\right], \quad (5.91)$$

where ω'/ω is given by (5.89). This is the (spin-averaged) *Klein-Nishina formula*, first derived in 1929.[†]

[†]O. Klein and Y. Nishina, *Z. Physik*, **52**, 853 (1929).



Die Klein-Nishina Formel gewinnt man auch in 1. Ordnung QED
Das Photon der QED ist aber kein „Teilchen“ im **üblichen** Sinne...

“It is quite natural to call these excitations *particles*, since they are discrete entities that have the proper relativistic energy momentum relation. (By a *particle* we do not mean something that must be localized in space; \hat{a}_k^\dagger creates particles in momentum eigenstates.) p. 22

Zusammenfassung I

1. Planck führt 1900 zur Erklärung der Schwarzkörperstrahlung das „Energieelement“ $\varepsilon = h\nu$ ein. Ob damit eine physikalische Quantisierung der Energie verknüpft war ist unter Wissenschaftshistorikern umstritten.
2. Einsteins Lichtquantenphypothese basiert auf dem Wienschen Strahlungsgesetz und einer Analogie zur kinetischen Gastheorie. Seine Lichtquanten sollten nicht mit dem aktuellen Photonbegriff verwechselt werden, denn sie sind lokalisiert und unterscheidbar.
3. Bohrs Atommodell greift Einsteins Theorie der spezifischen Wärme auf. Das Lichtquant lehnt er bis 1925 ab. Die Strahlung folgt der Bohrschen Frequenzbedingung – wird jedoch klassisch beschrieben.
4. Der Compton-Effekt überzeugt zunächst viele Physiker von der Richtigkeit der Lichtquantenhypothese. Mit dem Aufkommen der Quantenmechanik differenziert sich das Bild. Tatsächlich erlaubt sie die Beschreibung von Photo- und Compton-Effekt „ohne Photonen“. Erst die spontane Emission ist ein genuiner QED-Effekt, der die Quantisierung des Strahlungsfeldes erfordert.

Zusammenfassung II

- Die Gründe für die Entstehung von Quasi-Geschichte (didaktisch/ideologisch) machen eine implizite Voraussetzung: **Die „wissenschaftlichen Fakten“ der Quasi-Geschichte müssen „korrekt“ sein**
- Die Quasi-geschichte der (frühen) QT verletzt diese Voraussetzung!
 - Identifikation von Energiequanten mit Lichtquanten ist falsch
 - Photo- und Comptoneffekt sind ohne Quantisierung des Strahlungsfeldes erklärbar!
 - Es gibt keine einfache Traditionslinie von „Lichtquanten“ zu den „aktuellen Photonen“ der QED

Gründe:

- Lichtelektrischer Effekt kann bequem im Klassenraum bzw. Hörsaal vorgeführt werden – seine „Erklärung“ ist intuitiv
- Die Darstellung folgt einer (unvollständigen) Rezeptionsgeschichte