



Diese Veranstaltung wird aufgezeichnet und als Medien-Cast über KIT - ILIAS bereit gestellt

Nur zur KIT-internen vorlesungsbegleitenden Nutzung, Weitergabe & anderweitige Verwendung ist untersagt

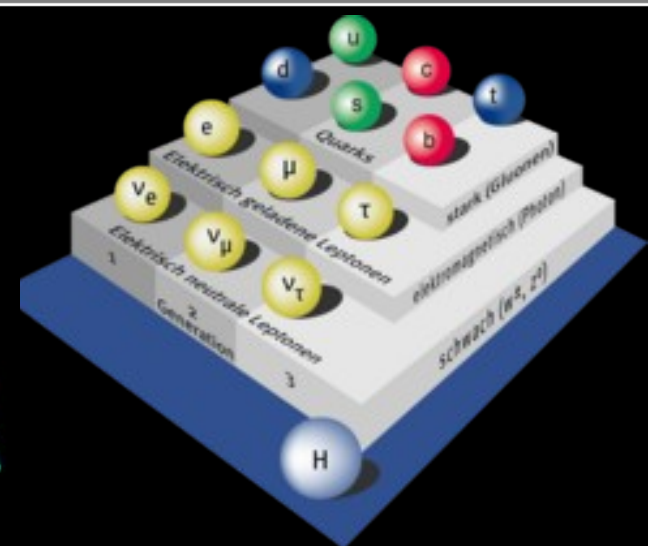
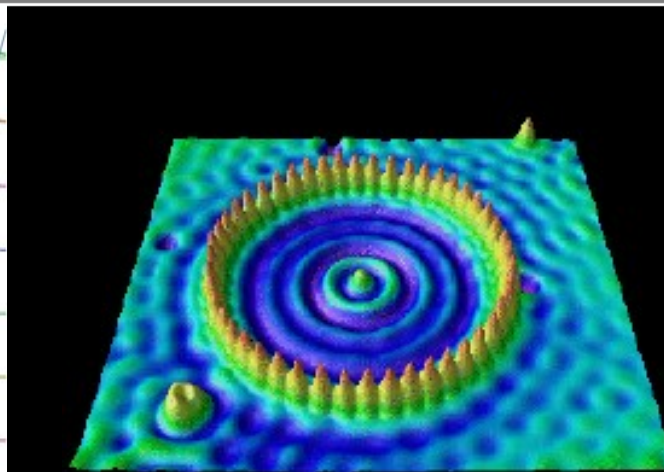
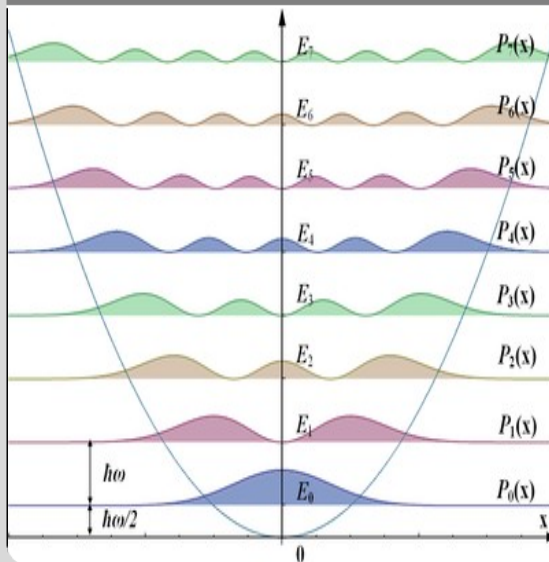
Vorlesung **Moderne Physik (L)**

Schlüsselexperimente der Quantenphysik

Günter Quast

Fakultät für Physik
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

SS '20



Inhaltsübersicht VL Moderne Physik

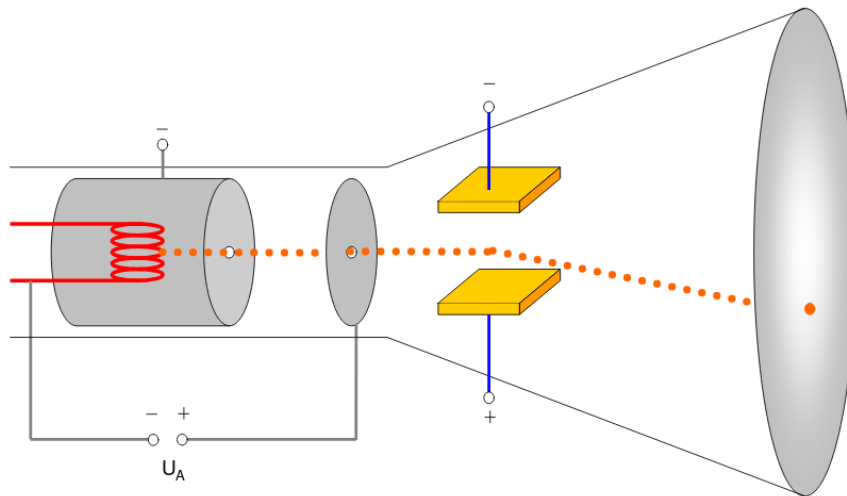
- 1) Einführung
- 2) Wiederholung wichtiger Konzepte der klassischen Physik
- 3) Spezielle Relativitätstheorie
- 4) **Schlüsselexperimente und Grundlagen der Quantenphysik**
- 5) Die Schrödingergleichung
- 6) Anwendungen der Schrödingergleichung
- 7) Das Wasserstoff-Atom
- 8) Atome mit mehreren Elektronen
- 9) Wechselwirkung von Licht und Materie
- 10) Grundlagen der Festkörperphysik
- 11) Kern- und Teilchenphysik
- 12) Ausblick

Messgrößen in der Physik sind typischerweise kontinuierliche Größen.

Allerdings wurden gegen Ende des 19. Jahrhunderts Größen entdeckt, die nur als Vielfaches einer kleinsten Größe, eines „**Quantums**“ auftreten:

- In der Chemie gab das „**Gesetz der konstanten Proportionen**“ Hinweise auf den Aufbau der Materie aus kleinsten, unteilbaren Bestandteilen, den Atomen.
- Der „**Ölfleckversuch**“, also die Ausbreitung einer kleinen Menge Öls auf einer Wasseroberfläche, gab Hinweise auf die Größenordnung von Atomen
(s. Übungsaufgabe)

- In der **Braun'schen Röhre** (oder **Kathodenstrahlröhre**) werden negative Ladungsträger von einer Glühkathode emittiert und können in einer Vakuumröhre durch Anlegen elektrischer und magnetischer Felder abgelenkt und untersucht werden.



Video:
Kathodenstrahlröhre



Video:
e/m- Bestimmung

[Link zum Video](#)

■ Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = Q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

■ E-Feld:

- Beschleunigung des Strahls
- Ablenkung parallel zu E-Feld

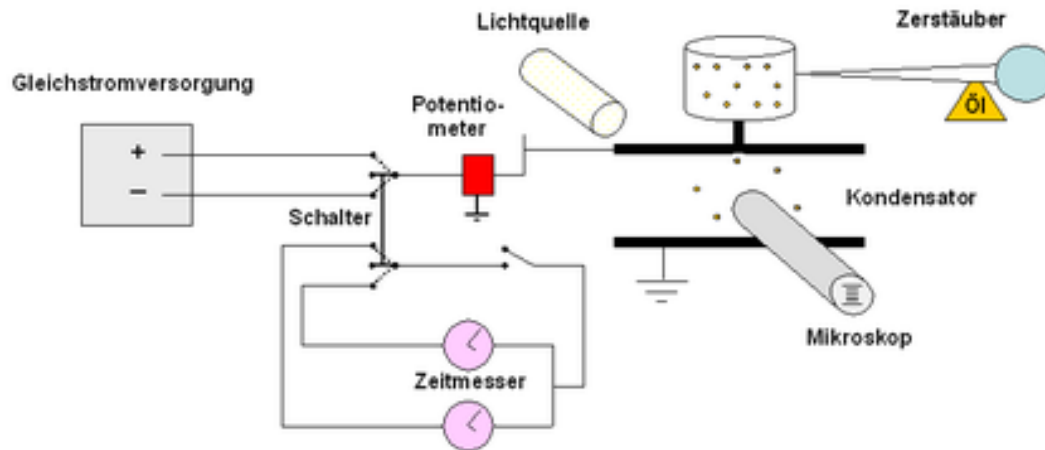
- B-Feld: Ablenkung senkrecht zu B-Feld und Bewegungsrichtung

Beobachtung: Im homogenen Magnetfeld bewegen sich alle Ladungsträger auf der gleichen Kreisbahn

→ **Verhältnis aus Ladung und Masse, e/m, ist für alle gleich !**

Der **Millikan-Versuch**: Beobachtung von **geladenen Öltröpfchen**

- im **Schwerefeld** der Erde
- und im **elektrischen Feld** eines Plattenkondensators



**Video: Seifenblasen
im elektrischen Feld**

[Link zum Video](#)

Bei konstanter Kraft bewegen sich die Tröpfchen wegen der Stokes'schen Reibung mit konstanter Geschwindigkeit

Unbekannte: **Masse** und **Ladung** der Tröpfchen

→ (mindestens) **zwei Messungen** pro Tröpfchen benötigt,
um Ladung zu bestimmen !



**Video:
Millikan-Versuch**

Zusammenstellung der benötigten Zusammenhänge

Wirkende Kräfte:

- Gewichtskraft: $F_G = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g$ Öl
- Auftriebskraft: $F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_L g$ Luft
- Coulombkraft: $F_C = qE = \frac{qU}{d}$
- Stokesche Reibungskraft: $F_R = 6\pi\eta r v$ Viskosität der Luft

1. Einstellen des Gleichgewichts: $F_G = F_C + F_A$

2. Ausschalten des E-Feldes → Tröpfchen sinkt mit v : $F_G = F_R + F_A$

2 → Radius r kann berechnet werden:

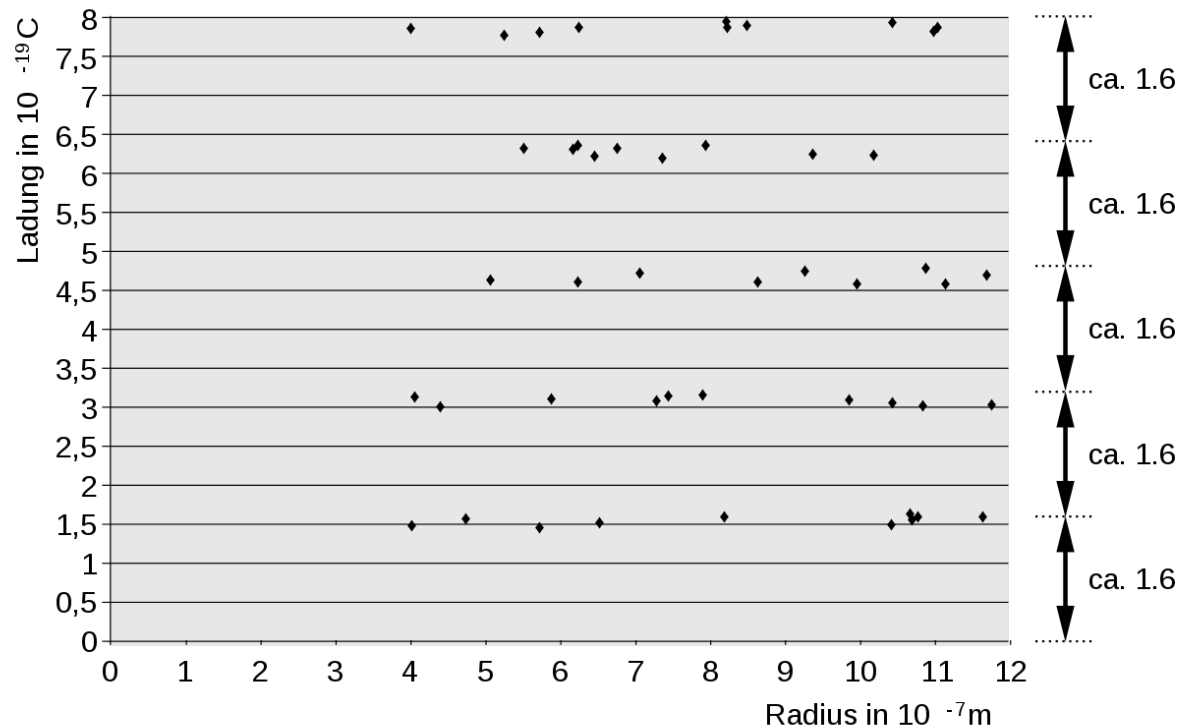
$$r = \sqrt{\frac{9v\eta}{2(\rho_0 - \rho_L)g}}$$

1 → Gleichgewichtszustand liefert Ladung:

$$q = \frac{9\pi d}{U} \sqrt{\frac{2\eta^3 v^3}{(\rho_0 - \rho_L)g}}$$

Vermessen vieler Tröpfchen liefert

Häufigkeitsverteilung der Tröpfchenladungen :



Ergebnisse streuen um vielfache einer festen Ladungsgröße,
der „Elementarladung“ e

heute genauester Wert: **$e = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$**

(im neuen Einheitensystem so als exakter Wert definiert)

Schwarzkörper-Strahlung

Schwarzer Strahler:

- **Absorbiert elektromagnetische Strahlung** jeglicher Wellenlänge
(realer Körper: wirft Teil zurück und erscheint z.B. blau).
- **Emittiert Wärmestrahlung** (elektromagnetisch), deren Intensität und Spektrum unabhängig von der Beschaffenheit des Körpers ist und nur von seiner Temperatur abhängt.

Schwarzkörper-Strahlung

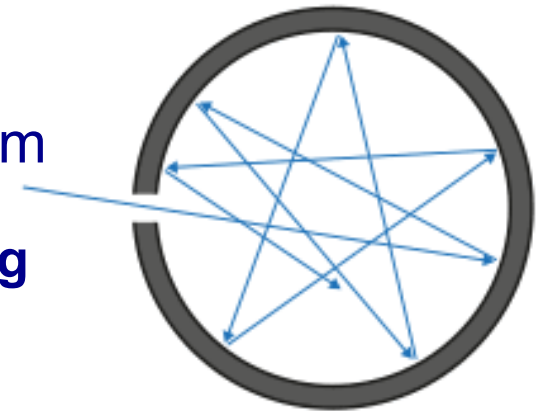
Schwarzer Strahler:

- **Absorbiert elektromagnetische Strahlung** jeglicher Wellenlänge (realer Körper: wirft Teil zurück und erscheint z.B. blau).
- **Emittiert Wärmestrahlung** (elektromagnetisch), deren Intensität und Spektrum unabhängig von der Beschaffenheit des Körpers ist und nur von seiner Temperatur abhängt.

– Nahezu perfekter schwarzer Körper:

ein **Hohlraum**

→ **Untersuchung der Hohlraumstrahlung**



Schwarzkörper-Strahlung

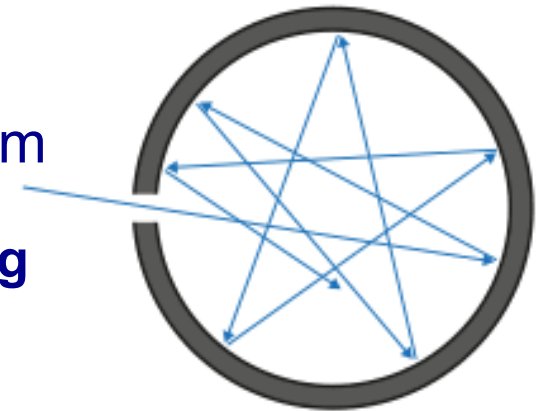
Schwarzer Strahler:

- **Absorbiert elektromagnetische Strahlung** jeglicher Wellenlänge (realer Körper: wirft Teil zurück und erscheint z.B. blau).
- **Emittiert Wärmestrahlung** (elektromagnetisch), deren Intensität und Spektrum unabhängig von der Beschaffenheit des Körpers ist und nur von seiner Temperatur abhängt.

– Nahezu perfekter schwarzer Körper:

ein **Hohlraum**

→ **Untersuchung der Hohlraumstrahlung**



Übrigens: unser Universum ist ein perfekter Schwarzer Körper !

Situation um 1900: zwei Versionen des Strahlungsgesetzes,
in Übereinstimmung mit Messungen nur für bestimmte Grenzfälle

Bestimmung der spektralen Strahlungsdichte S

Rayleigh-Jeans-Gesetz, 1905

- Leistung durch stehende Wellen im Hohlraum

$$S_\nu = \frac{2\nu^2}{c^2} k_B T \quad k_B: \text{Boltzmann-} \\ \text{konstante}$$

$$k_B = 1.38605(24) \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

→ **Problem:** passt nicht für große ν
+ „Ultraviolett Katastrophe“ (Ehrenfest, 1911)

$$S = \int_0^\infty d\nu S_\nu \rightarrow \infty$$

Situation um 1900: zwei Versionen des Strahlungsgesetzes,
in Übereinstimmung mit Messungen nur für bestimmte Grenzfälle

Bestimmung der spektralen Strahlungsdichte S

Rayleigh-Jeans-Gesetz, 1905

- Leistung durch stehende Wellen im Hohlraum

$$S_\nu = \frac{2\nu^2}{c^2} k_B T \quad k_B: \text{ Boltzmann- konstante}$$

$$k_B = 1.38605(24) \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

→ **Problem:** passt nicht für große ν
+ „Ultraviolett katastrophe (Ehrenfest, 1911)

$$S = \int_0^\infty d\nu S_\nu \rightarrow \infty$$

Wiensches Strahlungsgesetz, 1896

- Empirisch → Herleitung?

$$S_\nu \propto \nu^3 \exp\left(-\frac{\beta\nu}{k_B T}\right)$$

Hilfskonstante

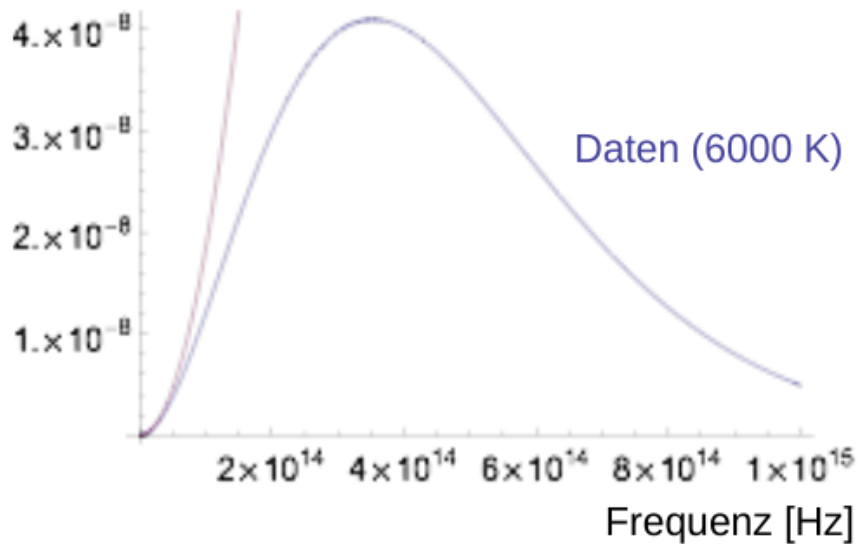
- Planck (zunächst) aus Thermodynamik (2. Hauptsatz, Entropie):

$$S_\nu = \frac{2\beta\nu^3}{c^2} \exp\left(-\frac{\beta\nu}{k_B T}\right)$$

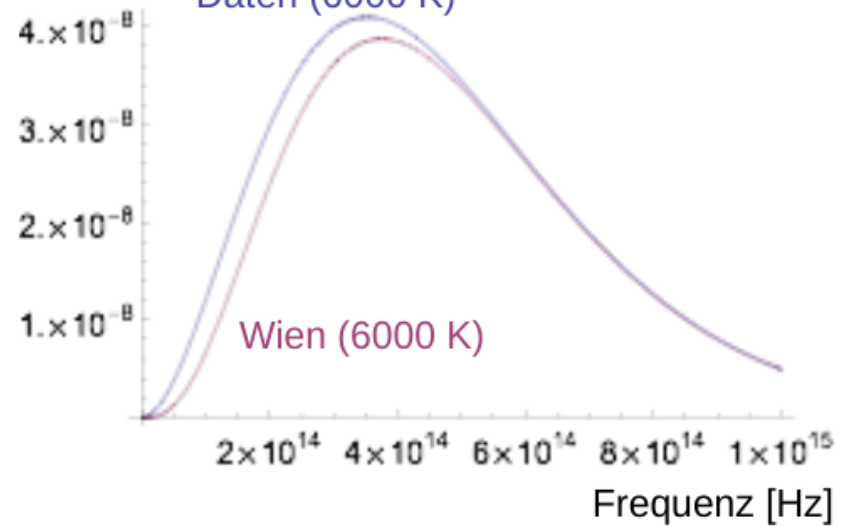
→ **Problem:** passt nicht für kleine ν

Spektrale Strahlungsdichte [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{Hz}^{-1}$]

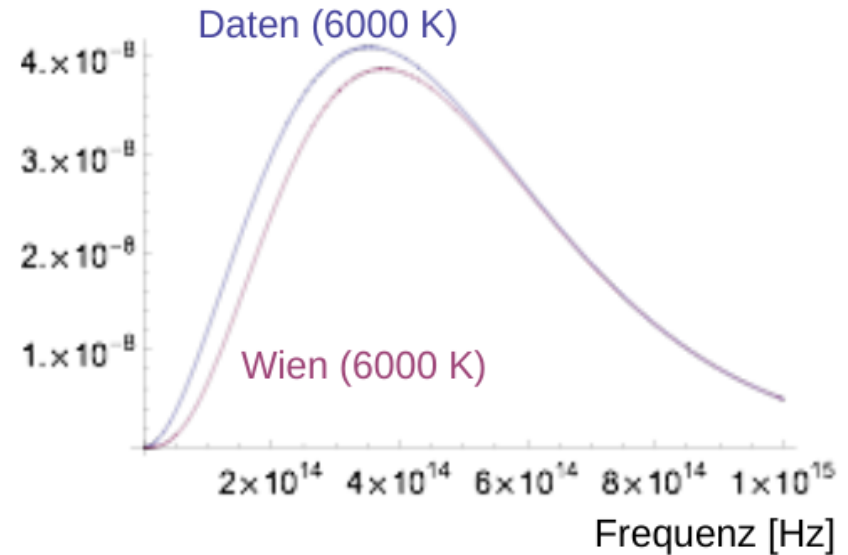
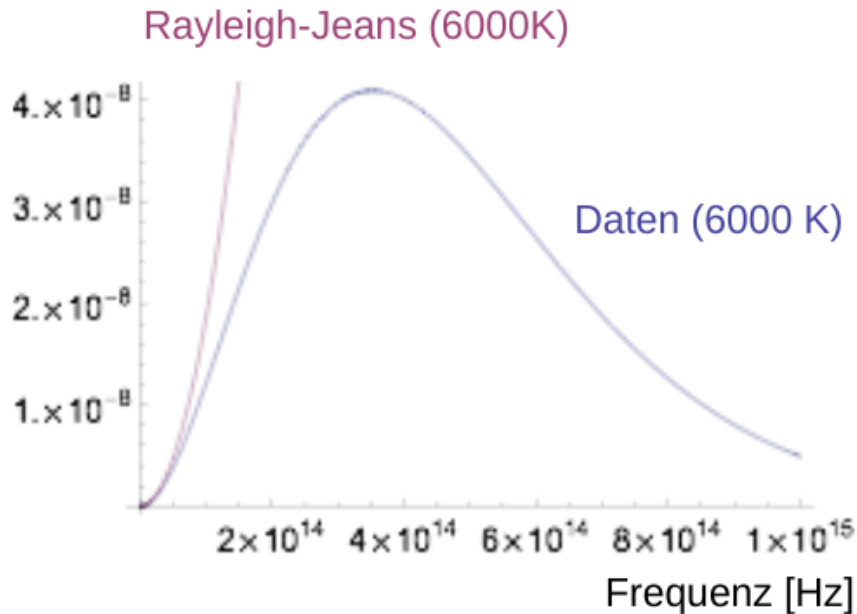
Rayleigh-Jeans (6000K)



Daten (6000 K)

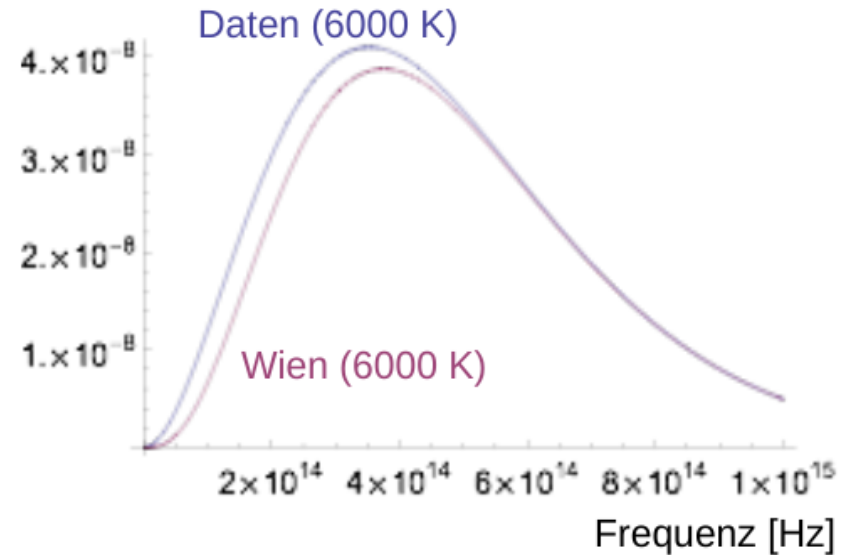
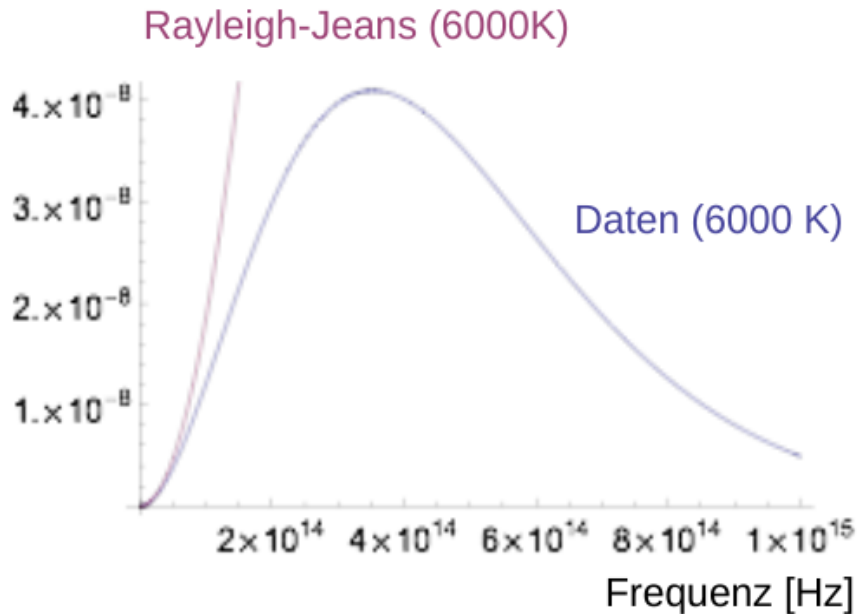


Spektrale Strahlungsdichte [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{Hz}^{-1}$]



Max Planck gelingt im Jahr 1900 die Lösung
– er postuliert, dass elektromagnetische
Strahlung nur in „Quanten“ der Größe
 $h \cdot \nu$ abgegeben oder aufgenommen wird.

Spektrale Strahlungsdichte [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{Hz}^{-1}$]



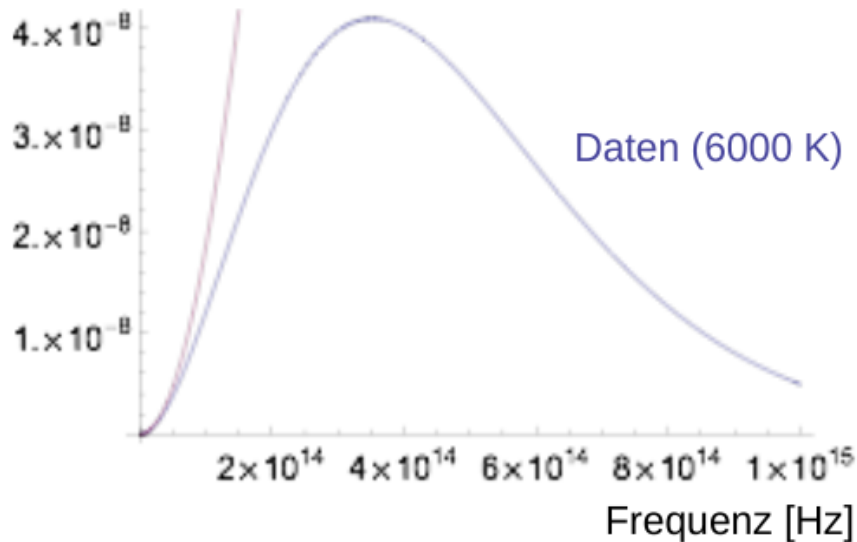
Max Planck gelingt im Jahr 1900 die Lösung – er postuliert, dass elektromagnetische Strahlung nur in „**Quanten**“ der Größe **$h \cdot \nu$** abgegeben oder aufgenommen wird.

$$S_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left[\frac{h\nu}{k_B T}\right] - 1}$$

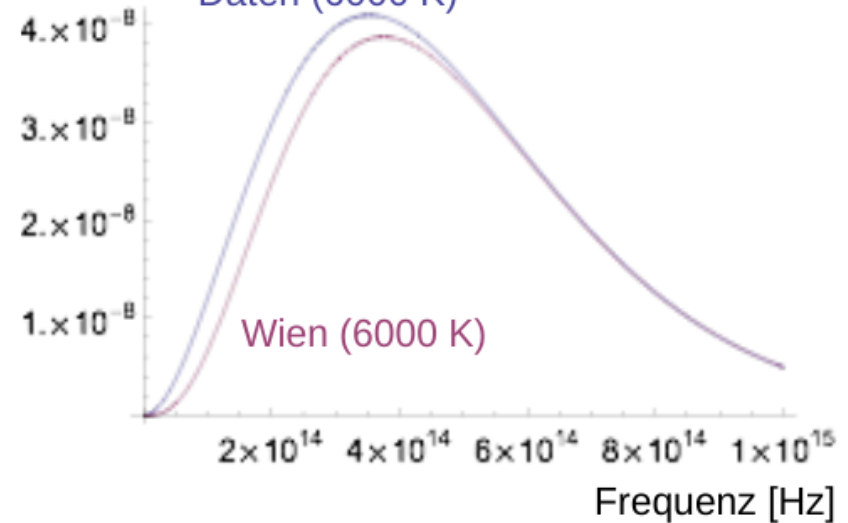
Planck'sche Strahlungsformel

Spektrale Strahlungsdichte [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{Hz}^{-1}$]

Rayleigh-Jeans (6000K)



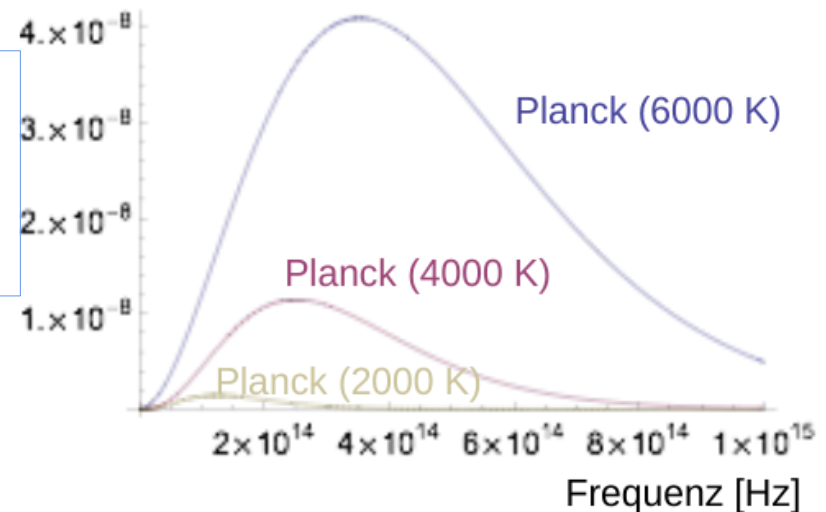
Daten (6000 K)



Max Planck gelingt im Jahr 1900 die Lösung – er postuliert, dass elektromagnetische Strahlung nur in „Quanten“ der Größe $h \cdot \nu$ abgegeben oder aufgenommen wird.

$$S_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left[\frac{h\nu}{k_B T}\right] - 1}$$

Planck'sche Strahlungsformel



Die zu Ehren von Max Planck heute „**Planck'sches Wirkungsquantum**“ genannte Größe h hat den Wert:

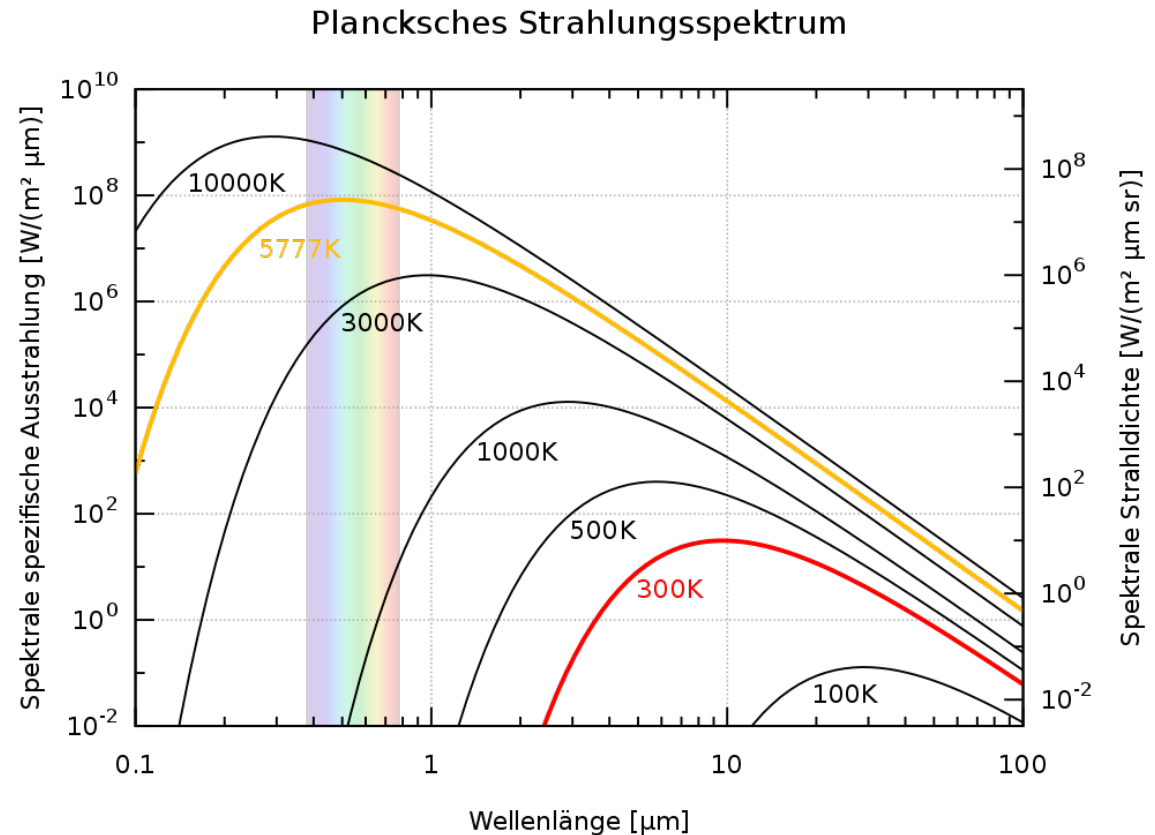
$$h = 6.62607015 \text{ e-34 Js} = 4.135667696... \text{ e-15 eV s}$$

(im neuen Einheitensystem so als exakter Wert definiert)

Die zu Ehren von Max Planck heute „**Planck'sches Wirkungsquantum**“ genannte Größe h hat den Wert:

$$h = 6.62607015 \text{ e-34 Js} = 4.135667696... \text{ e-15 eV s}$$

(im neuen Einheitensystem so als exakter Wert definiert)



Die zu Ehren von Max Planck heute „**Planck'sches Wirkungsquantum**“ genannte Größe h hat den Wert:

$$h = 6.62607015 \text{ e-34 Js} = 4.135667696... \text{ e-15 eV s}$$

(im neuen Einheitensystem so als exakter Wert definiert)

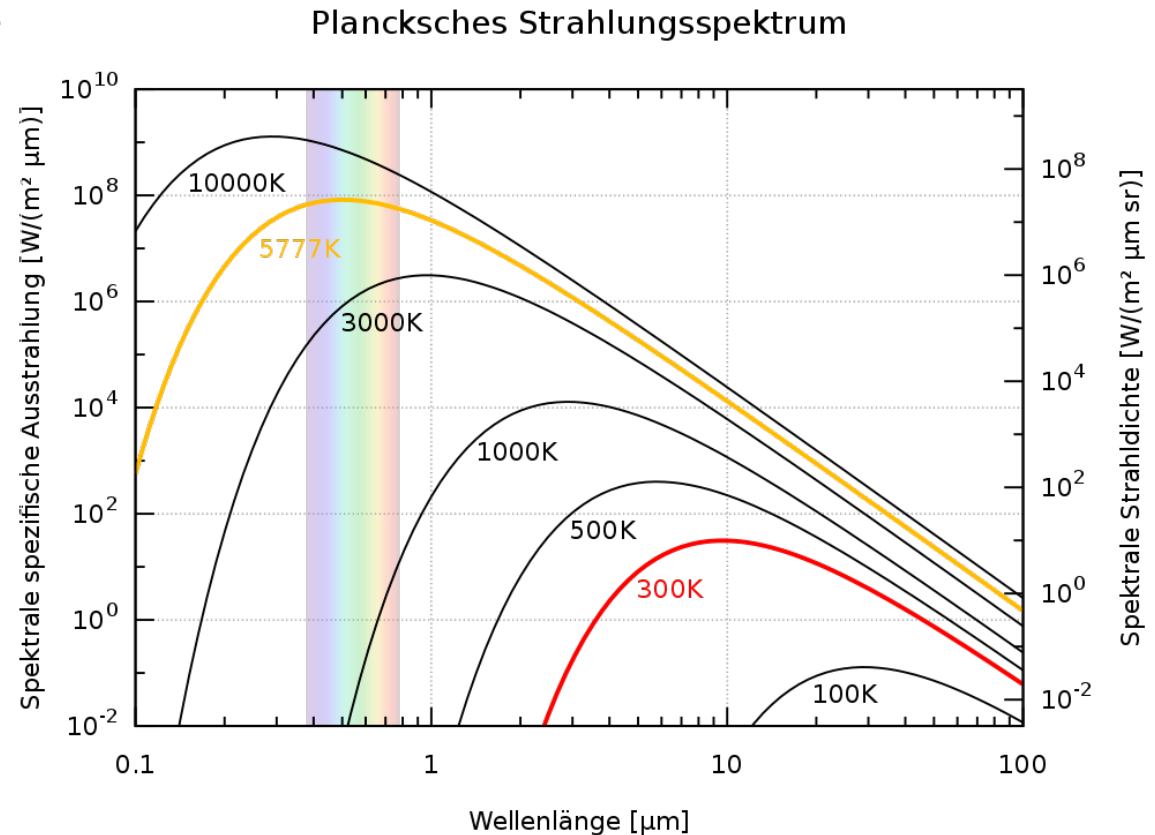
Das Planck'sche Strahlungsgesetz beinhaltet das

- Wien'sche Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,8 \mu\text{mK}}{T}$$

- und das Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$P_{\text{ges}} \propto T^4$$



oder „Lichtelektrischer Effekt“

Beobachtung: eine elektrisch negativ geladene Metallplatte entlädt sich bei Bestrahlung mit (geeignetem) Licht



Video: Photoeffekt mit Zinkplatte

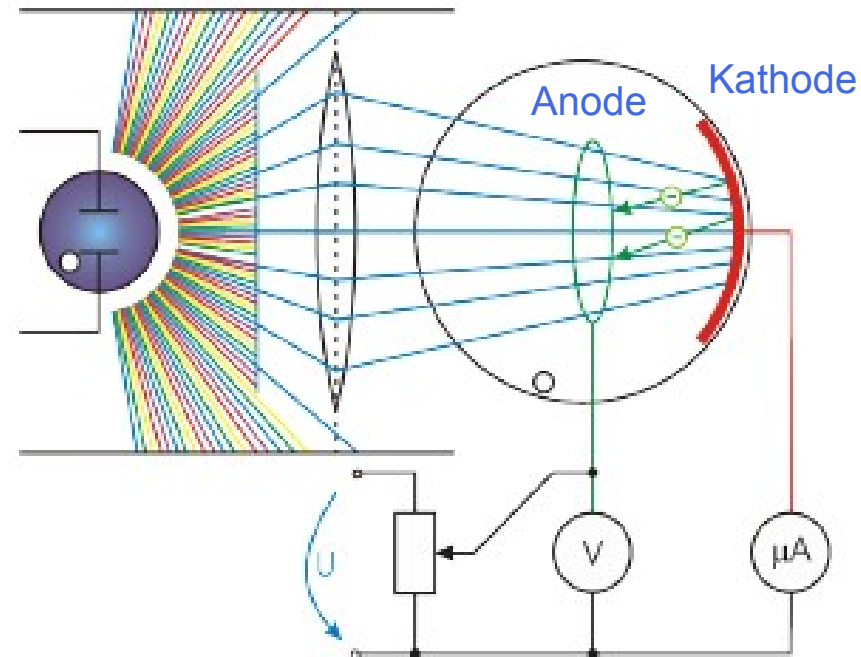
[Link zum Video](#)

Quantitative Untersuchung:

Bestrahlung von Metallplatte mit Licht genau definierter Wellenlänge und Bestimmung der Maximalenergie der herausgelösten Elektronen

Energiebestimmung der Elektronen:

- Anlegen einer Gegenspannung
- oder Kondensator zwischen Anode und Kathode und Messung der Kondensatorspannung



oder „Lichtelektrischer Effekt“

Beobachtung: eine elektrisch negativ geladene Metallplatte entlädt sich bei Bestrahlung mit (geeignetem) Licht

- **kein Effekt** auf positiv geladene Platte
- **kein Effekt**, wenn Licht zu langwellig



Video: Photoeffekt mit Zinkplatte

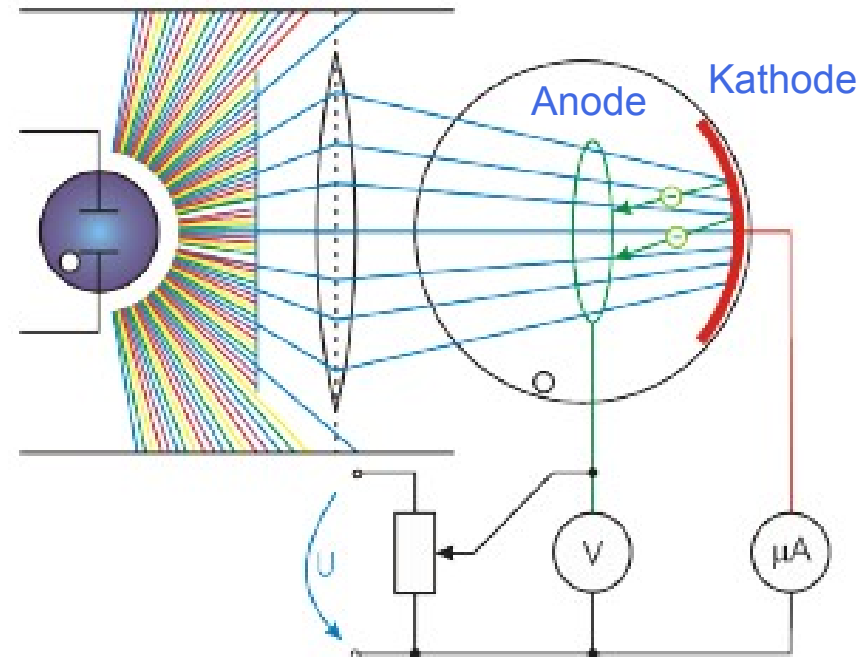
[Link zum Video](#)

Quantitative Untersuchung:

Bestrahlung von Metallplatte mit Licht genau definierter Wellenlänge und Bestimmung der Maximalenergie der herausgelösten Elektronen

Energiebestimmung der Elektronen:

- Anlegen einer Gegenspannung
- oder Kondensator zwischen Anode und Kathode und Messung der Kondensatorspannung



oder „Lichtelektrischer Effekt“

Beobachtung: eine elektrisch negativ geladene Metallplatte entlädt sich bei Bestrahlung mit (geeignetem) Licht



**Video: Photoeffekt
mit Zinkplatte**

[Link zum Video](#)

oder „Lichtelektrischer Effekt“

- Beobachtung:** eine elektrisch negativ geladene Metallplatte entlädt sich bei Bestrahlung mit (geeignetem) Licht
- **kein Effekt** auf positiv geladene Platte
 - **kein Effekt**, wenn Licht zu langwellig



**Video: Photoeffekt
mit Zinkplatte**

[Link zum Video](#)

oder „Lichtelektrischer Effekt“

Beobachtung: eine elektrisch negativ geladene Metallplatte entlädt sich bei Bestrahlung mit (geeignetem) Licht

- **kein Effekt** auf positiv geladene Platte
- **kein Effekt**, wenn Licht zu langwellig



**Video: Photoeffekt
mit Zinkplatte**

[Link zum Video](#)

Quantitative Untersuchung: Bestrahlung von Metall mit Licht genau definierter Wellenlänge und Bestimmung der Maximalenergie der ausgelösten Photoelektronen

oder „Lichtelektrischer Effekt“

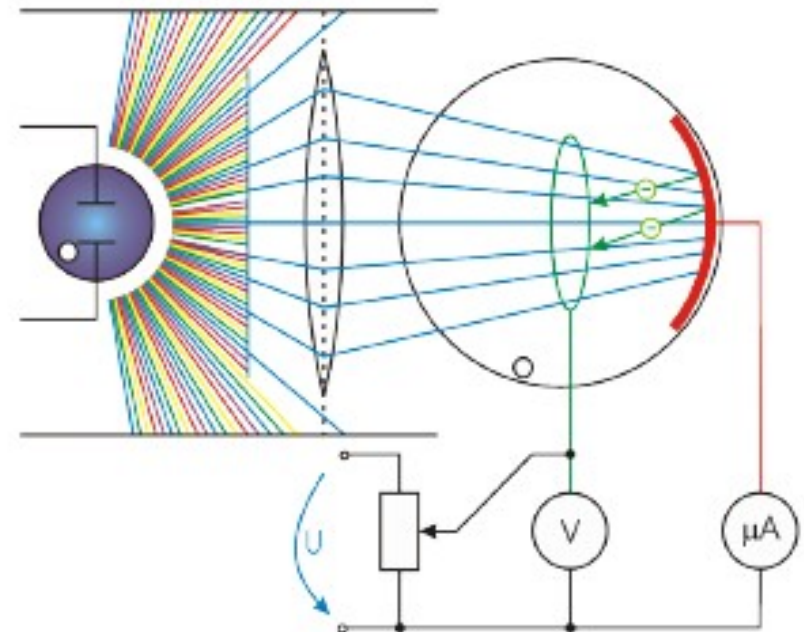
- Beobachtung:** eine elektrisch negativ geladene Metallplatte entlädt sich bei Bestrahlung mit (geeignetem) Licht
- **kein Effekt** auf positiv geladene Platte
 - **kein Effekt**, wenn Licht zu langwellig



Video: Photoeffekt mit Zinkplatte

[Link zum Video](#)

Quantitative Untersuchung: Bestrahlung von Metall mit Licht genau definierter Wellenlänge und Bestimmung der Maximalenergie der ausgelösten Photoelektronen



oder „Lichtelektrischer Effekt“

Beobachtung: eine elektrisch negativ geladene Metallplatte entlädt sich bei Bestrahlung mit (geeignetem) Licht

- **kein Effekt** auf positiv geladene Platte
- **kein Effekt**, wenn Licht zu langwellig



Video: Photoeffekt mit Zinkplatte

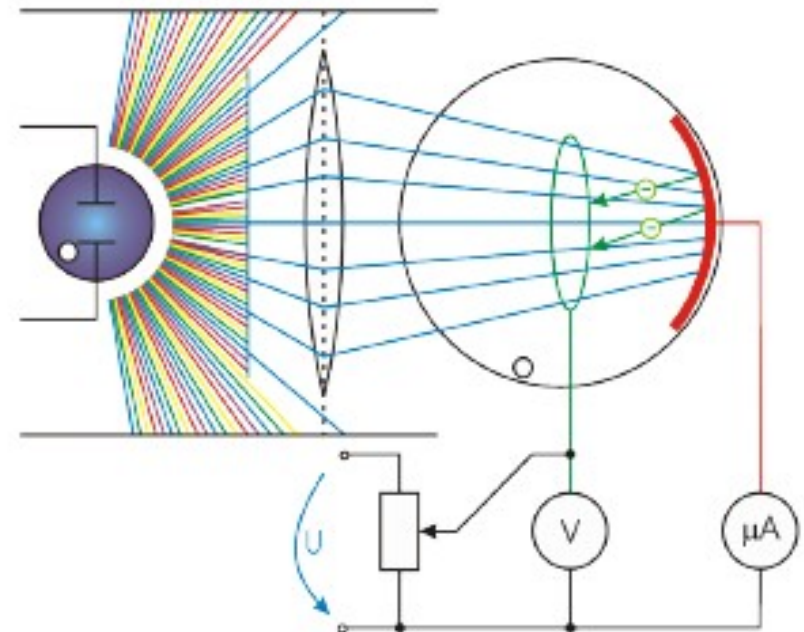
[Link zum Video](#)

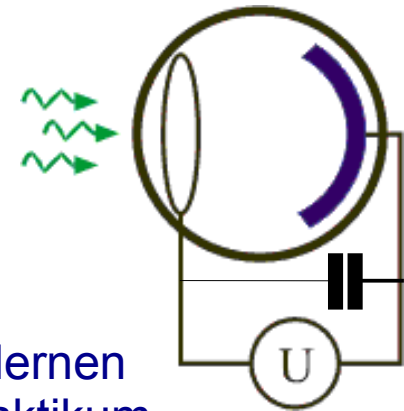
Quantitative Untersuchung: Bestrahlung von Metall mit Licht genau definierter Wellenlänge und Bestimmung der Maximalenergie der ausgelösten Photoelektronen

Klassische Erwartung

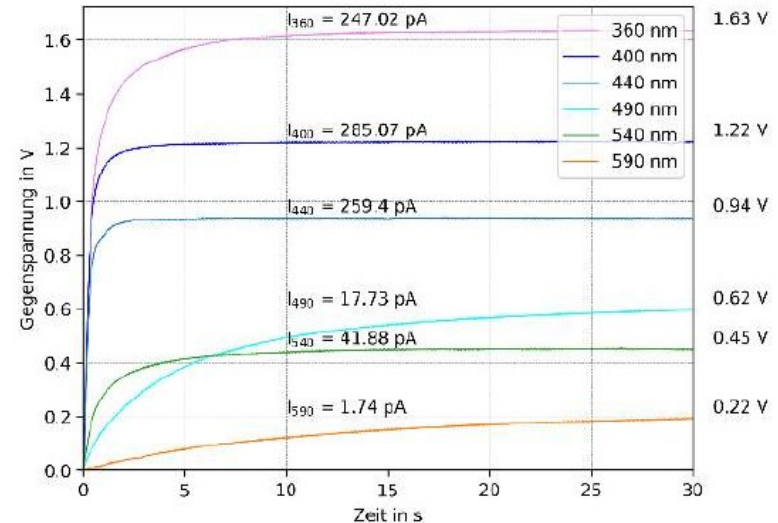
- **Langsame** Beschleunigung der Elektronen (Akkumulation von Energie).
- **Emission für alle Frequenzen**, bei niedriger Frequenz sollte Intensitätserhöhung e^- auslösen.
- Kinetische Energie der e^- ist **lineare Funktion der Intensität:** $E_{kin} \sim I_{Licht}$

s. Übungsaufgabe





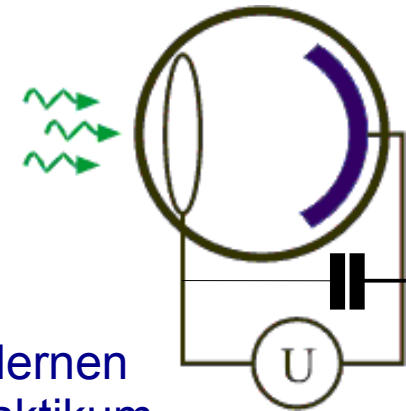
Ergebnis eines modernen
Experiments im Praktikum
Physik am KIT:



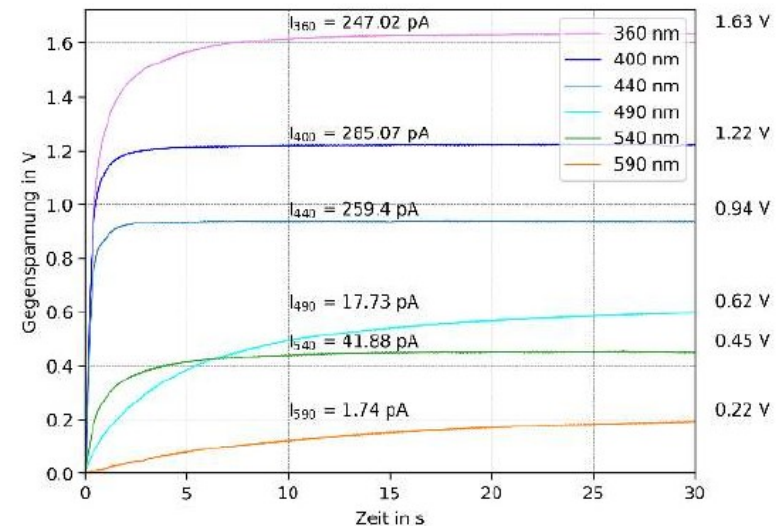
Aufladung eines Kondensators an einer
Vakuum- Photozelle für verschiedene
Wellenlängen des einfallenden Lichts

Beobachtung

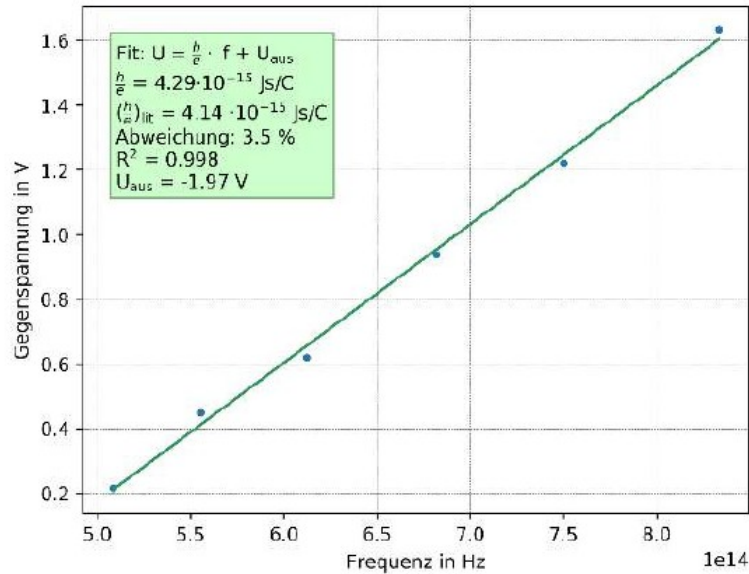
- Der Effekt setzt **schnell** (1ns) nach Auftreffen der Strahlung ein.
- **Minimale, materialabhängige Frequenz** ν_0 , unterhalb der keine e^- Auslösung.
- Für ν fest $J_e \sim I_{\text{Licht}}$
 Photostrom der e^- Intensität des Lichts
- Kinetische Energie der e^- ist **lineare Funktion der Frequenz**: $E_{kin} = a + b\nu$



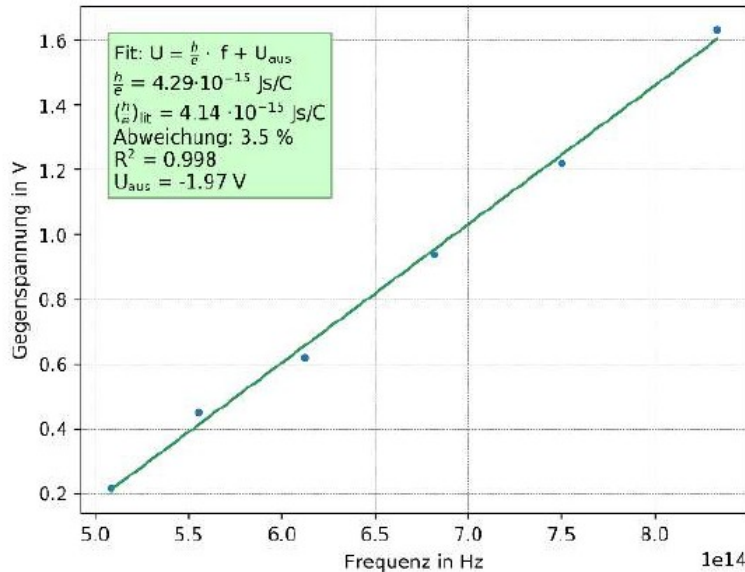
Ergebnis eines modernen Experiments im Praktikum Physik am KIT:



Aufladung eines Kondensators an einer Vakuum- Photozelle für verschiedene Wellenlängen des einfallenden Lichts



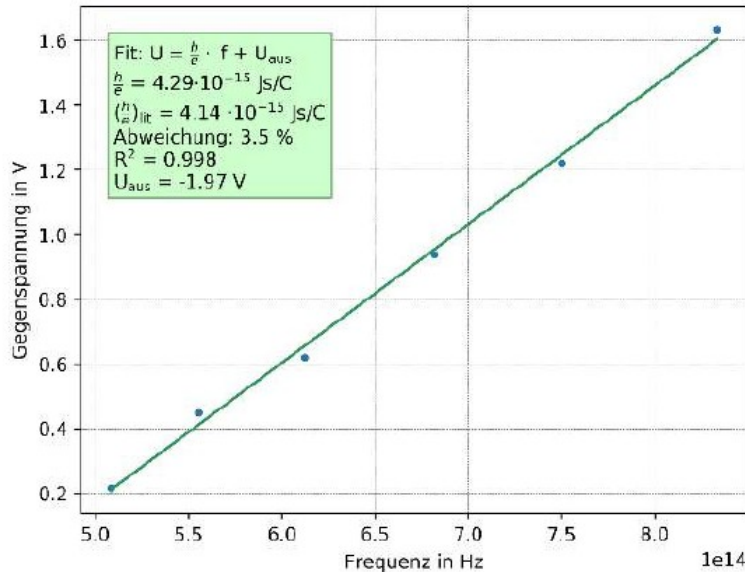
Gegenspannung gegen Frequenz des Lichts aufgetragen mit linearer Regression. Die Steigung entspricht dem Verhältnis h/e .



Gegenspannung gegen Frequenz des Lichts aufgetragen mit linearer Regression. Die Steigung entspricht dem Verhältnis h/e .

Erklärung durch Lichtquantenhypothese

- Ein Photon mit $h\nu > W_a$ löst ein e^- aus (keine Akkumulation von Energie).
- Für $h\nu > W_a$ (Austrittsarbeit) → Auslösung. W_a abhängig von Element.
- Jedes Photon mit $h\nu > W_a$ löst mit bestimmter Wahrscheinlichkeit w ein e^- aus: $J_e = w I_{\text{Licht}}$
- $E_{\text{kin}} = h\nu - W_a$
 ↙
 max. E_{kin} für $h\nu$ fest

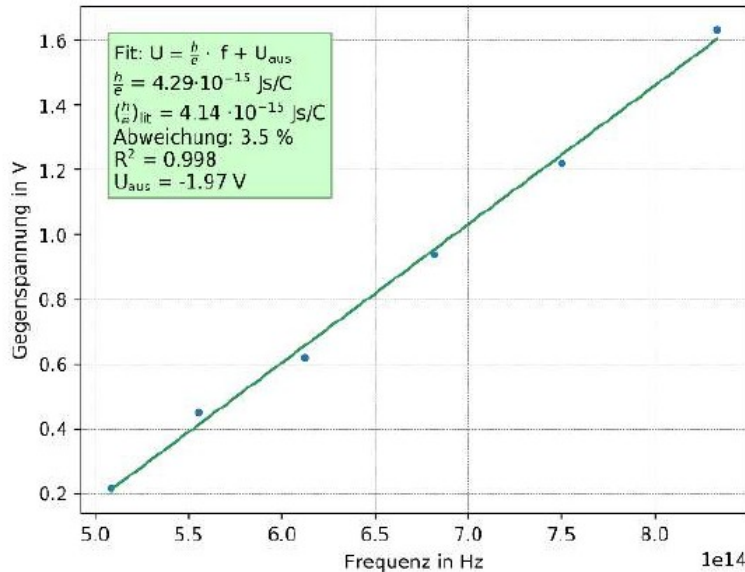


Gegenspannung gegen Frequenz des Lichts aufgetragen mit linearer Regression. Die Steigung entspricht dem Verhältnis h/e .

Erklärung durch Lichtquantenhypothese

- Ein Photon mit $h\nu > W_a$ löst ein e^- aus (keine Akkumulation von Energie).
- Für $h\nu > W_a$ (Austrittsarbeit) → Auslösung. W_a abhängig von Element.
- Jedes Photon mit $h\nu > W_a$ löst mit bestimmter Wahrscheinlichkeit w ein e^- aus: $J_e = w I_{\text{Licht}}$
- $E_{\text{kin}} = h\nu - W_a$
 $\nwarrow$
max. E_{kin} für $h\nu$ fest

Licht besteht aus „Lichtquanten“, sog. Photonen mit der Energie $E = h \cdot \nu$



Gegenspannung gegen Frequenz des Lichts aufgetragen mit linearer Regression. Die Steigung entspricht dem Verhältnis h/e .

Erklärung durch Lichtquantenhypothese

- Ein Photon mit $h\nu > W_a$ löst ein e^- aus (keine Akkumulation von Energie).
- Für $h\nu > W_a$ (Austrittsarbeit) → Auslösung. W_a abhängig von Element.
- Jedes Photon mit $h\nu > W_a$ löst mit bestimmter Wahrscheinlichkeit w ein e^- aus: $J_e = w I_{\text{Licht}}$
- $E_{\text{kin}} = h\nu - W_a$
 $\swarrow$
max. E_{kin} für $h\nu$ fest

Licht besteht aus „Lichtquanten“, sog. Photonen mit der Energie $E = h \cdot \nu$

Für diese Erkenntnis aus seiner im Jahr 1905 erschienenen Arbeit erhielt Einstein im Jahr 1921 den Nobelpreis



Ende Vorlesung 4

Fragen ?