

4. Das Elektron

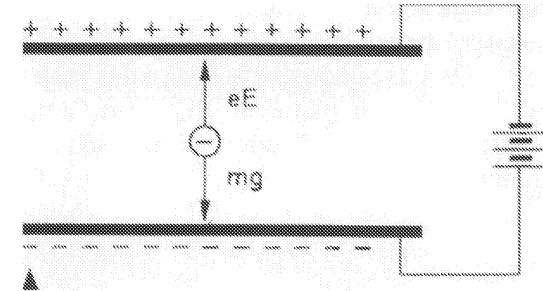
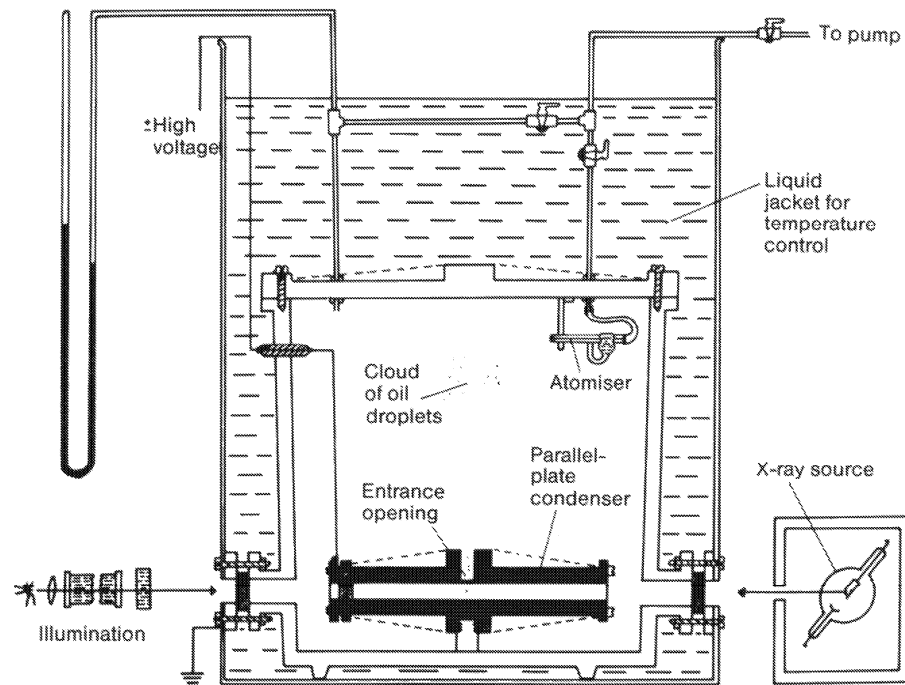
Erzeugung von freien Elektronen: ○ Photoeffekt
○ Thermische Emission (Glühemission)

Manipulation von Elektronen: ○ Beschleunigung, Ablenkung in elektrischen und magnetischen Feldern

4.1 Ladung des Elektrons

Versuch von Millikan: Bestimmung der Ladung des Elektrons

Elektrisch aufgeladene Öltröpfchen in einem elektrischen Feld



$$mg = eE$$

- Kompensation der Gravitationskraft und der Coulomb-Kraft eines geladenen Teilchens im elektrischen Feld eines Kondensators.
- Ladung e des Elektrons:

$$e = - 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

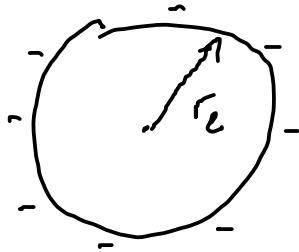
4.2 Die Grösse des Elektrons

- Bestandteil des Atoms, daher deutlich kleiner als das Atom selber

- Definition des klassischen Elektronenradius

- e^- als Kugel mit Radius r_e
- Ruheenergie $E = m_0 c^2$ sei identisch der elektrostatischen Energie der Oberflächenladung

$$W = \int V dQ = \int \frac{Q}{C} dQ = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$



$$\int_A A = -e$$

- Kapazität $C = 4 \pi \epsilon_0 r_e$

$$\frac{1}{2} \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 r_e} = m_0 c^2$$

- klassischer Elektronenradius r_e

$$r_e = \frac{e^2}{8 \pi \epsilon_0 m_0 c^2} \approx 1.9 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

- Bestimmung des Elektronenradius durch Streuexperimente

- keine Abweichung der e^-/e^- Wechselwirkung vom Coulomb-Gesetz selbst bei kleinen Abständen
- Folgerung: Elektronen sind innerhalb der experimentellen Genauigkeit punktförmige Teilchen

4.3 Spezifische Ladung des Elektrons e/m

- Bestimmung von e/m des Elektrons analog zu Massenspektroskopie Experimenten mit Ionen
- Verwendung von elektrischen und magnetischen Feldern.
- allgemeine Bewegungsgleichung:

$$\vec{F} = m \dot{\vec{v}} = -e (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Zyklotronbewegung des Elektrons

- kreisförmige Bahn in Feld B senkrecht zur Bewegungsrichtung v des Elektrons

$$\frac{m v^2}{r} = -e |\vec{v} \times \vec{B}|$$

- Zyklotronradius

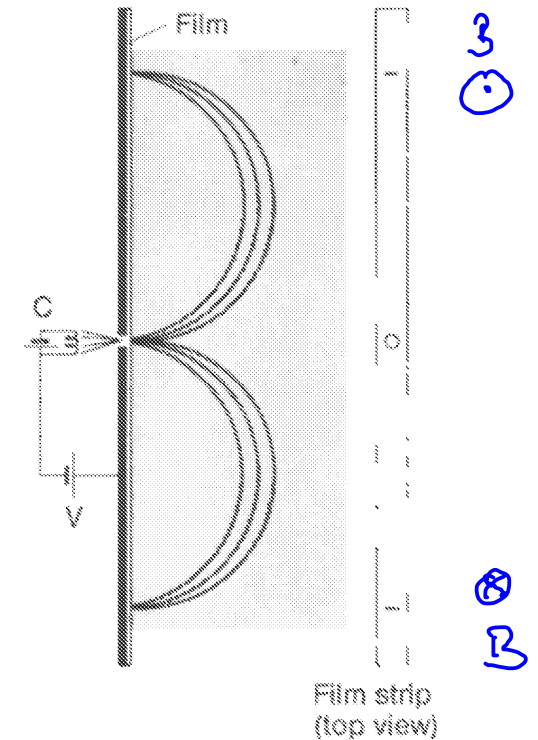
$$r = \frac{m v}{e B}$$

- Beschleunigung des e-

$$\frac{1}{2} m v^2 = e V \Rightarrow v^2 = \frac{2eV}{m}$$

- spezifische Ladung

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{r^2 B^2}$$



4.4 Die Masse des Elektrons

- Bestimmung der Masse m aus der spezifischen Ladung e/m

$$m_0 = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_0 = 511 \text{ keV}$$

- relativistische Masse des Elektrons

$$m(v) = m_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Beispiel:

kinetische Energie

$$1 \text{ keV}$$

$$1 \text{ MeV}$$

Geschwindigkeit

$$\frac{v}{c} = 0.063$$

$$\frac{v}{c} = 0.942$$

Massenzunahme

$$\frac{m - m_0}{m_0} = 4 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{m - m_0}{m_0} = 2$$

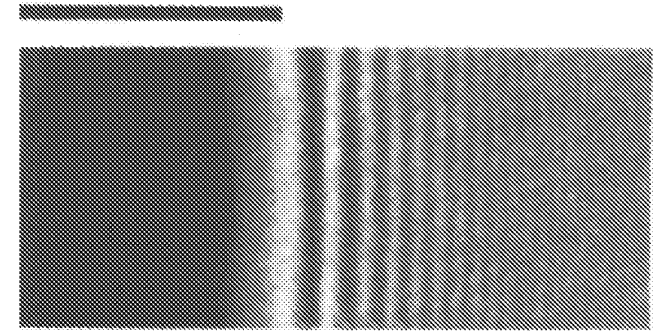
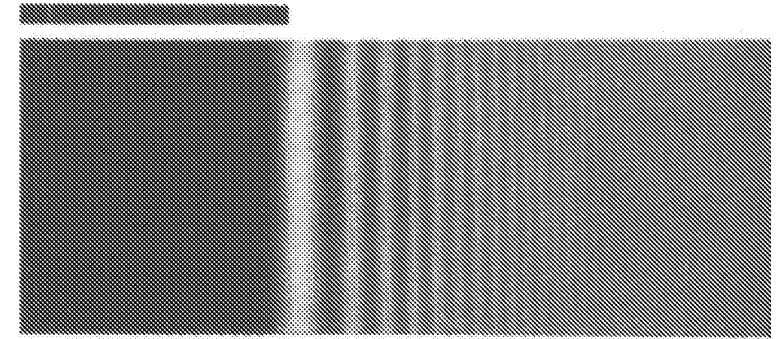
4.5 Welleneigenschaften von Elektronen

- Bisher: Untersuchung der Teilcheneigenschaften von Wellen
- Elektronen können aber auch Welleneigenschaften zeigen: Beugung, Interferenz
- Bragg-Streuung: Ähnlich wie Röntgenstrahlen können langsame Elektronen Bragg-Interferenzen bei Streuung an Oberflächen zeigen.

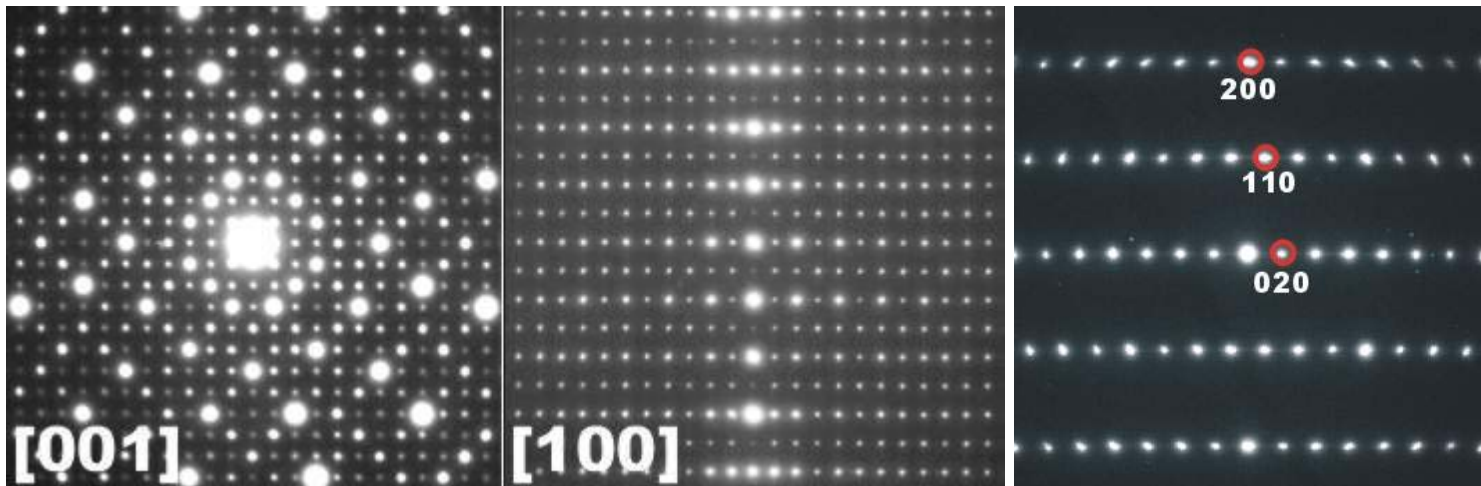
Moderne Elektronenbeugungsmessungen

- Elektronenbeugung wird in der Festkörperphysik zur Untersuchung der Kristallstruktur verwendet.
- Die Technik ist besonders gut für Oberflächen geeignet.
- Beispiel: Streumuster von Elektronen an Einkristallen

Beugung von Licht an einer Kante



Beugung von Elektronen ($E_{\text{kin}} = 34 \text{ keV}$) an der Kante einer Al-Folie



weiter Abbildungen:

<http://www.microscopy.ethz.ch/>
<http://www.emez.ethz.ch/>

4.6 Elektron Streuung: Experiment von Davisson und Germer

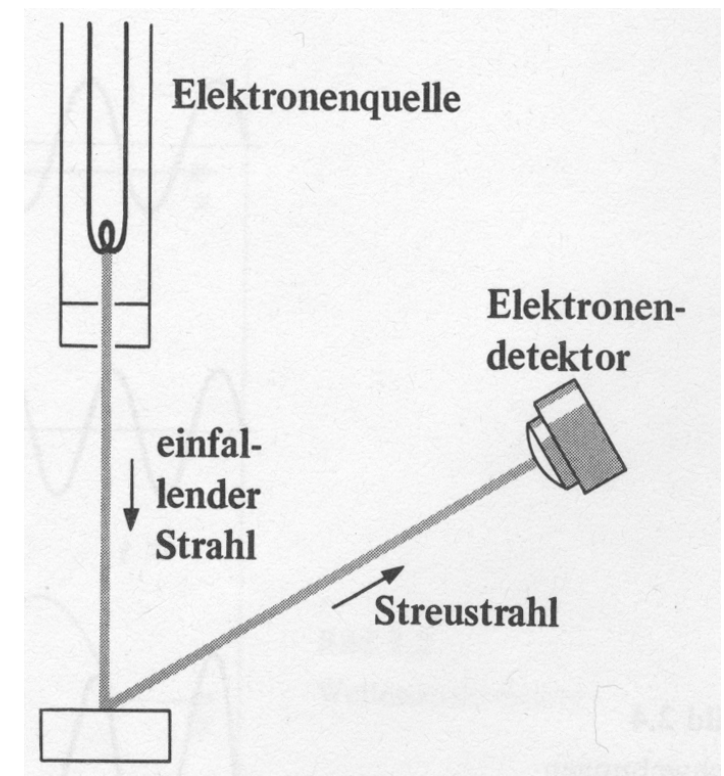
- Bestätigung des Wellencharakters von Teilchen (deBroglie Wellen) in Streuexperimenten mit Elektronen durch Davisson und Germer und unabhängig durch Thomson (1927)



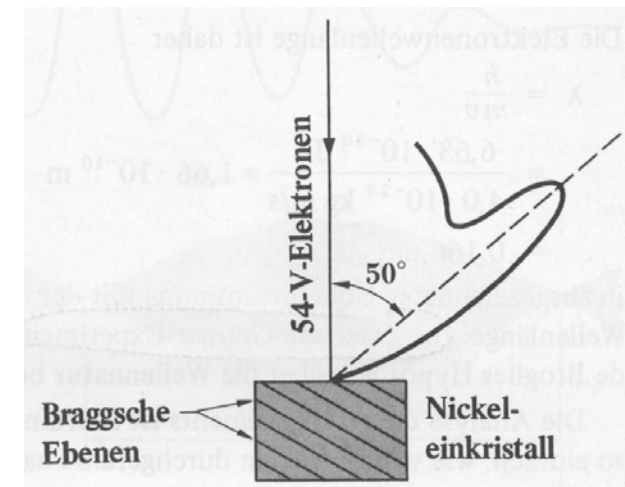
Nobelpreis in Physik (1937)

**Clinton Joseph Davisson
George Paget Thomson**

"for their experimental discovery of the diffraction of electrons by crystals"



- klassische Erwartung: Die Intensität der gestreuten Elektronen sollte nur schwach von Streuwinkel und der Energie der einfallenden Elektronen abhängen.
- Beobachtung: starke Energie und Winkelabhängigkeit der Streuung



Nickeleinkristall mit durch Aufheizen oxidfreier einkristalliner Oberfläche

4.7 deBroglie Wellen

Elektronen (und alle anderen massiven Teilchen) verhalten sich wie Wellen mit der Wellenlänge

Abhängigkeit der Elektronwellenlänge von der Energie

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}$$

$$\lambda = \frac{12.3}{\sqrt{V}} \text{ \AA}$$

zum Beispiel bei 54 V: $\lambda = 0.167 \text{ nm}$;
entspricht typischen Gitterkonstanten a

Bragg-Bedingung für Materiewellen

Winkel unter dem konstruktive Interferenz auftritt:

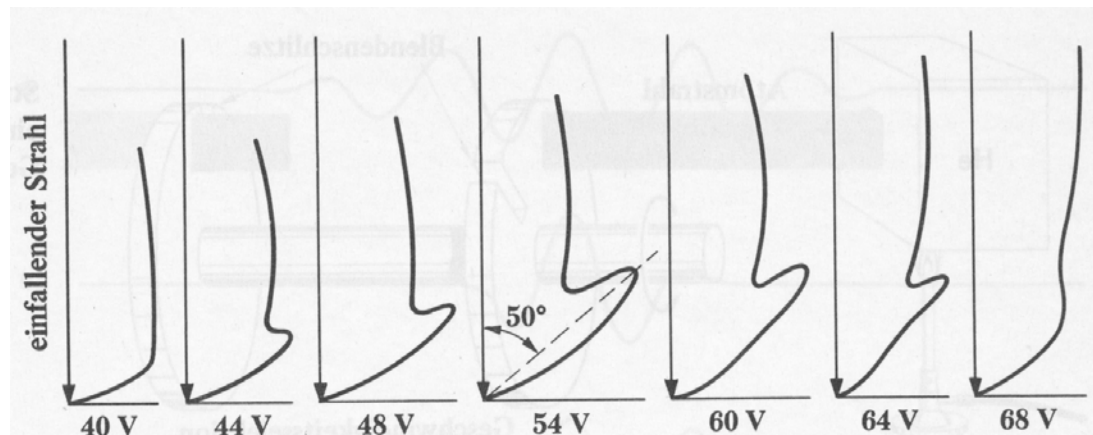
$$n\lambda = 2a \sin \theta$$

$$\theta = \arcsin \frac{n\lambda}{2a}$$

$$= \arcsin \frac{h}{2a \sqrt{E_{kin} 2m_0}}$$

Davisson/Germer Experiment:

lange Wellenlänge
grosser Streuwinkel



kurze Wellenlänge
kleiner Streuwinkel