

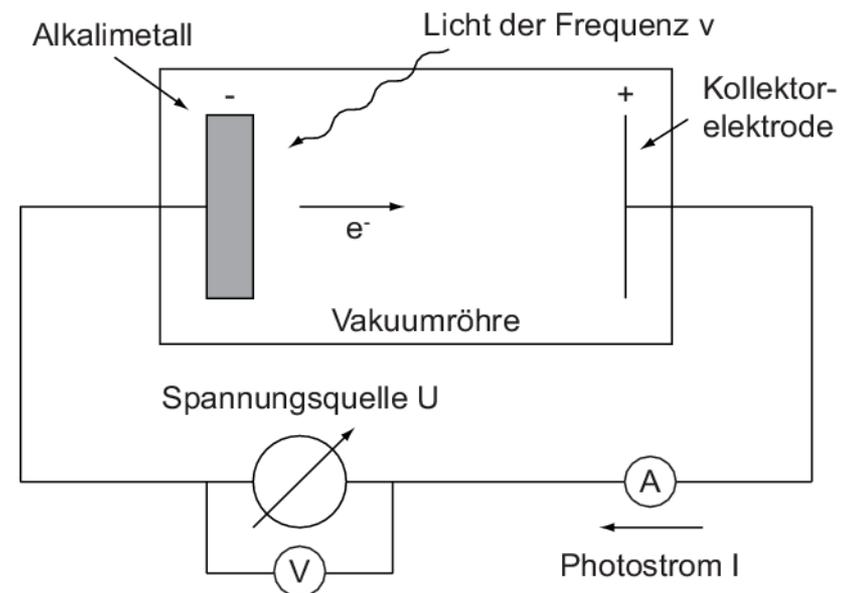
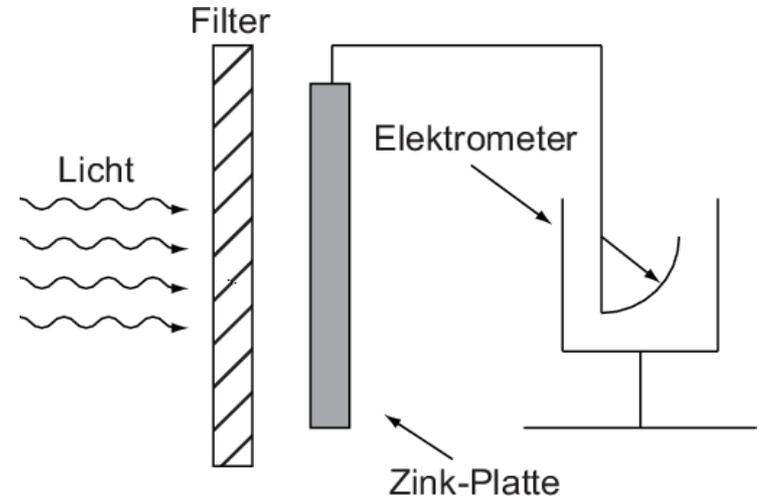
Theoretische Physik 3 für Lehramtsstudenten

Photoeffekt – Historischer Hintergrund

- 1839 erstmals von Alexandre Edmond Becquerel entdeckt
- 1886 erste systematische Untersuchungen durch Heinrich Hertz und Wilhelm Hallwachs
- 1900 erste quantitative Untersuchungen in einer Hochvakuumapparatur durch Philipp Lenard
- 1905 theoretische Erklärung durch Einstein

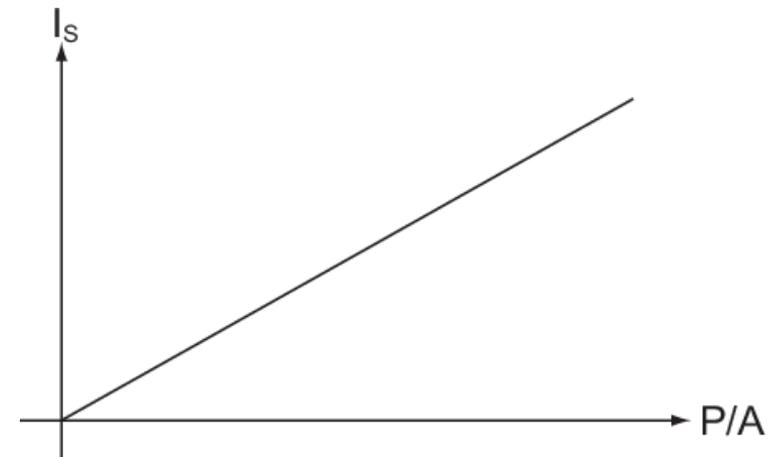
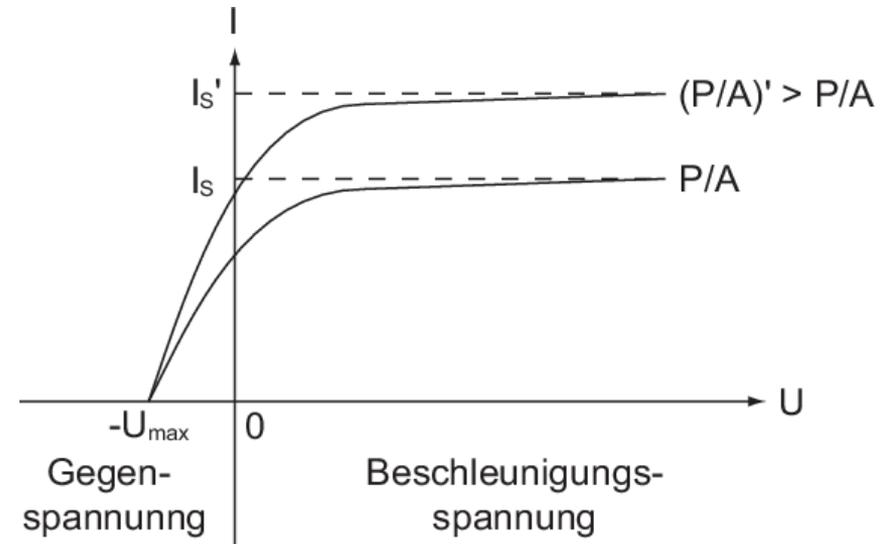
Photoeffekt - Aufbau

- Frühe Versuche mit variierendem Aufbau, als Kern immer ein mit Licht bestrahltes Metall
- Heutzutage: Gegenfeldmethode, erstmals 1912-15 für präzise Messungen genutzt



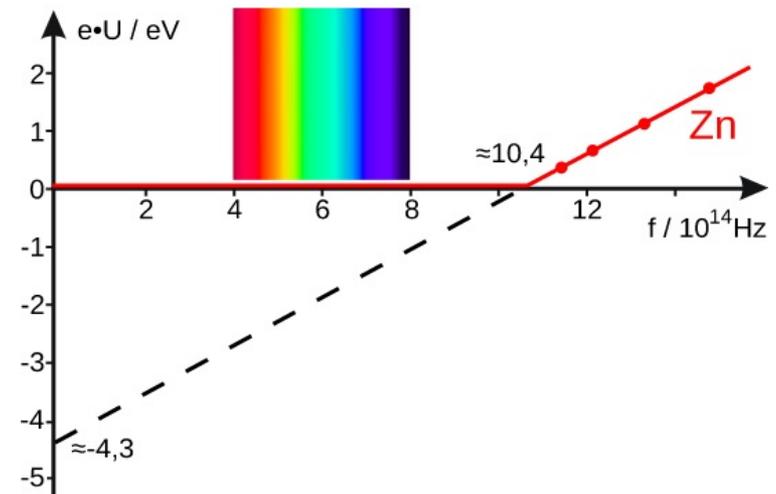
Photoeffekt – Experimentelle Resultate

- Photostrom I abhängig von Gegenspannung U und Lichtintensität P/A
- Sättigungsstromstärke I_S bei hinreichend großer Gegenspannung
- Maximale kinetische Energie $(-e) \cdot (-U_{max})$
- U_{max} rein (materialunabhängig) proportional zur Frequenz ν des genutzten Lichtes
- Nötige Minimalfrequenz ν_{min} materialabhängig



Photoeffekt - Interpretation

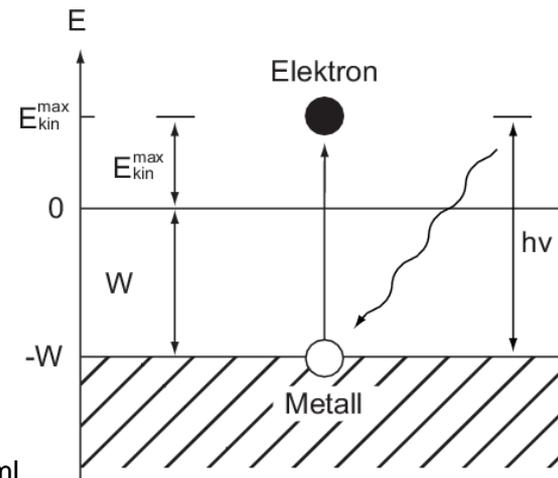
- Klassische Annahme: Licht als Welle
 - Elektronen nehmen Energie von Lichtwellen auf bis die Austrittsenergie W übertroffen ist
 - Keine Minimalfrequenz, endliche Dauer bis zum Auslösen der Elektronen, maximale kinetische Energie abhängig von der Lichtintensität
 - Alles im Widerspruch zum Experiment



Photoeffekt - Interpretation

- Neuer (quantenmechanischer) Ansatz von Einstein:
 - Die kinetische Energie zum Herauslösen eines Elektrons beträgt $E_{kin} = h\nu - W$
 - Postulat: Licht verhält sich wie ein Teilchen mit Energie $h\nu$, genannt Lichtquant oder Photon
 - Photon kann gesamte Energie auf einzelnes Elektron übertragen

$h = \text{Plancksches Wirkungsquantum}$



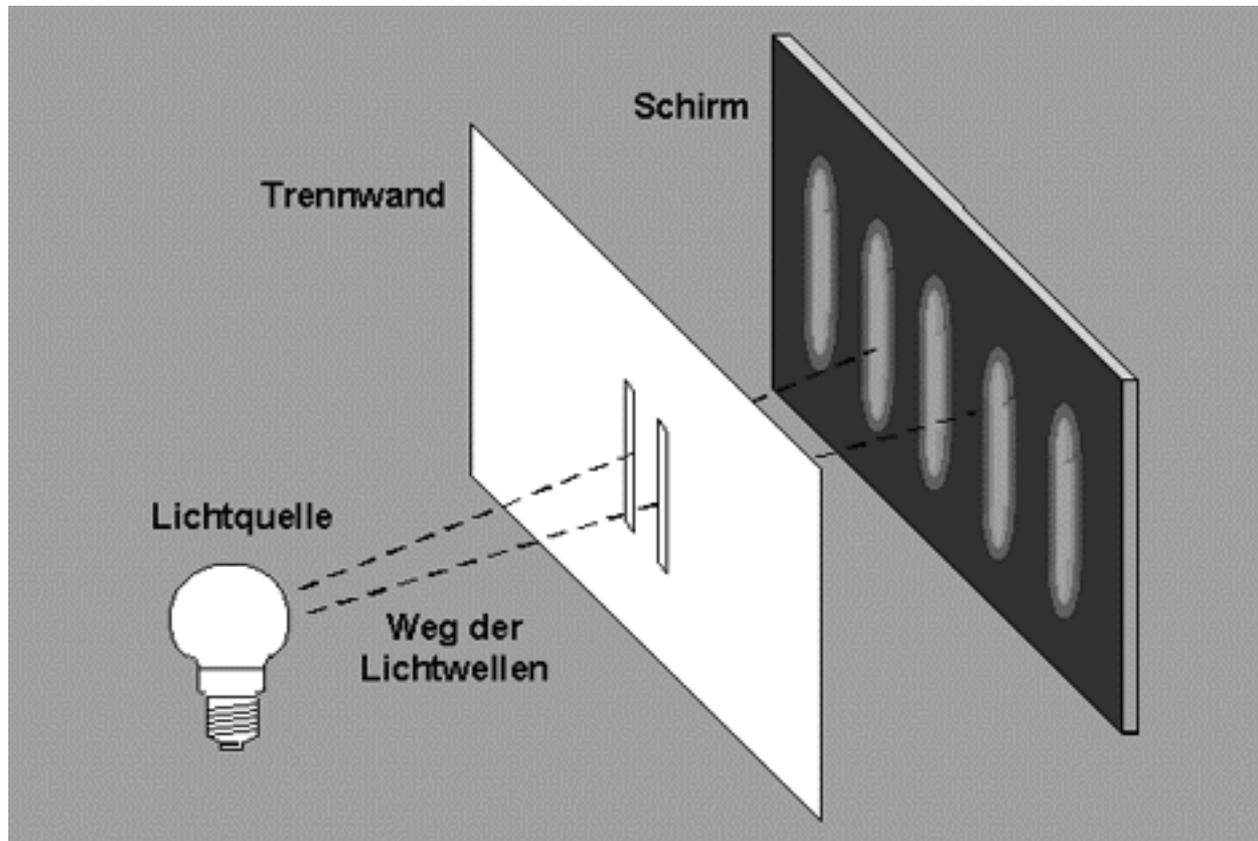
Anwendungen der Quantenmechanik – Photoeffekt

- Lichtsensoren:
 - Nutzung des Photoeffektes zur präzisen Erfassung von geringen Mengen an Photonen (z.B. in der Astronomie)
 - Nutzung der präzisen Abhängigkeiten von Lichtintensität und –frequenz für Bildsensoren, z.B. in Digitalkameras
 - Heutzutage meist Nutzung des inneren Photoeffekts mit Halbleitern
 - Keine austretenden Elektronen, keine Vakuumröhren nötig

Doppelspalt – Historischer Hintergrund

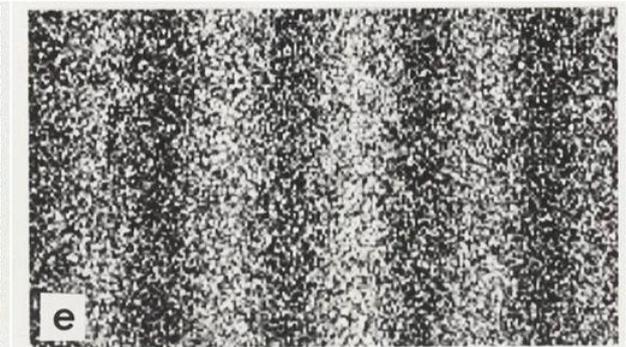
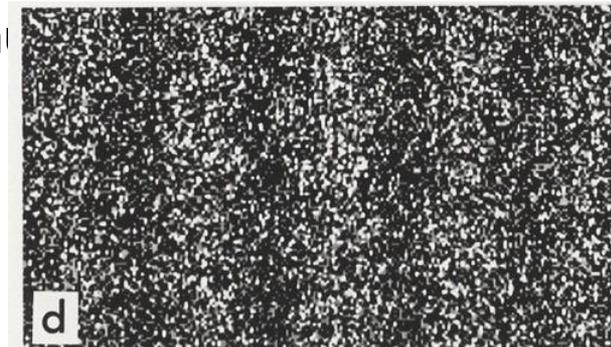
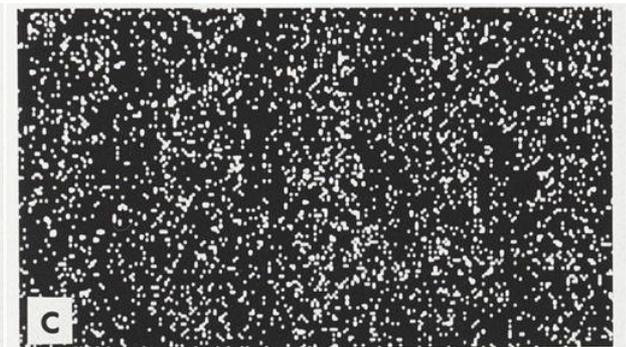
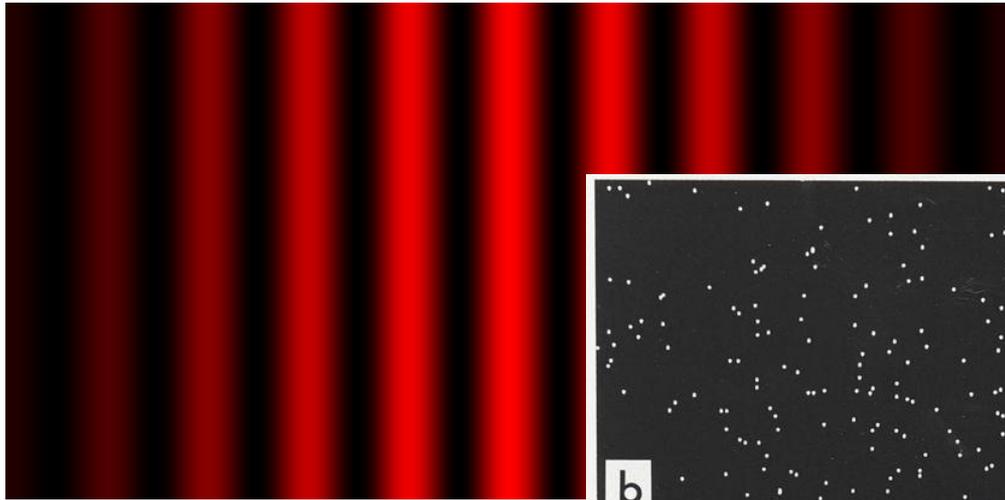
- 1802 erstmals von Thomas Young zum Nachweis der Wellennatur des Lichtes durchgeführt
 - Streit zwischen Wellen- und Korpuskel(Teilchen)-natur des Lichtes scheint bis zu Einsteins Postulat zum Photoeffekt geklärt
- Ab 1927 diverse Experimente an Kristallgittern (Brechung am Gitter, entspricht Spaltversuchen mit sehr vielen Spalten)
- 1961 erstmals von Claus Jönsson mit massiven Teilchen (Elektronen) erfolgreich durchgeführt
- Heutzutage erfolgreich mit $C_{60}F_{48}$ getestet

Doppelspalt – Aufbau



- Meist wird als Lichtquelle monochromatisches Licht verwendet

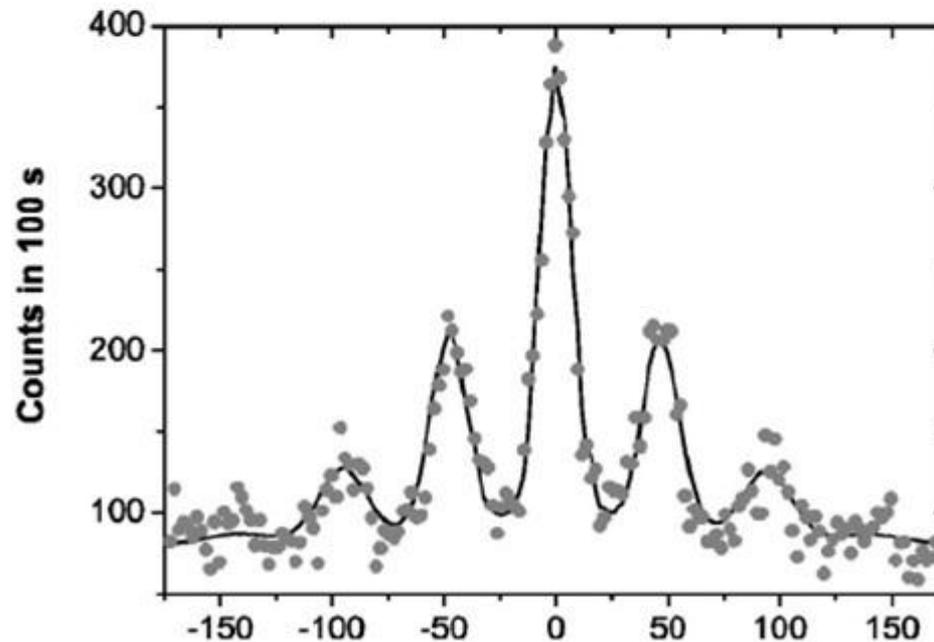
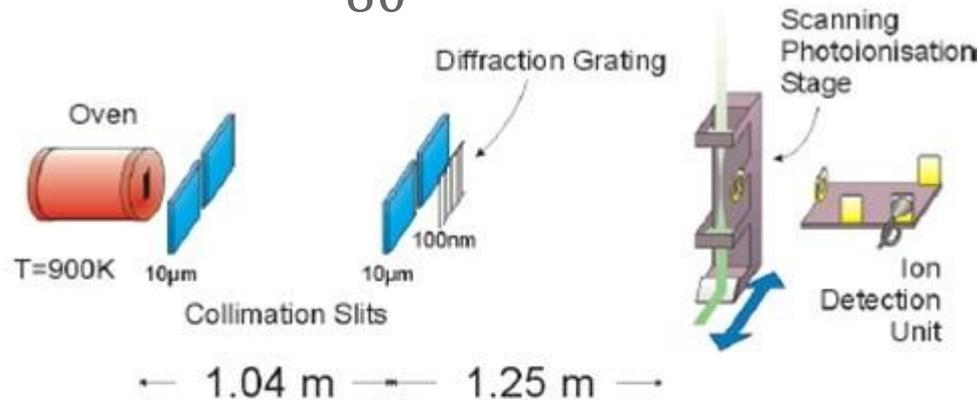
Doppelspalt – Experimentelle Resultate



Doppelspalt Interferenzm

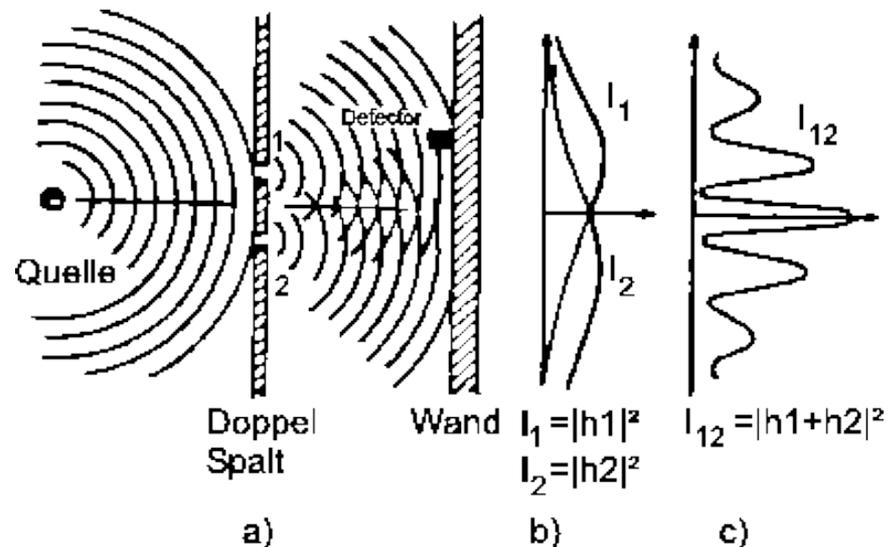
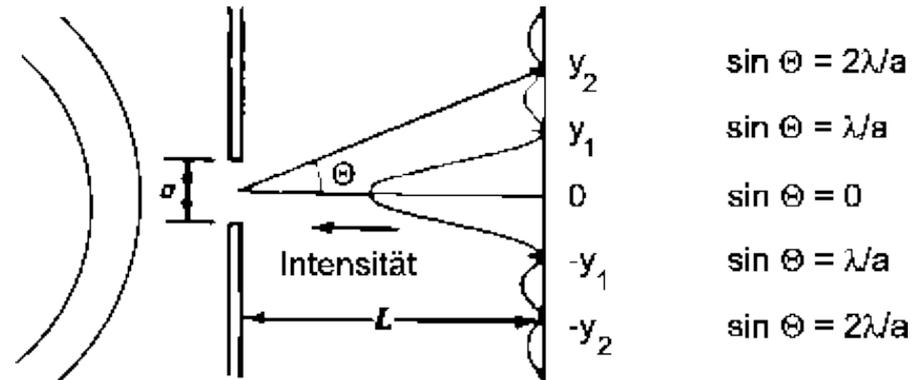
Interferenzmuster eines Doppelspaltexperiments mit
verschiedener Anzahl Elektronen (b: 200, c: 6000,
d: 40000, e: 140000).

Doppelspalt – Experimentelle Resultate – C_{60} -Moleküle



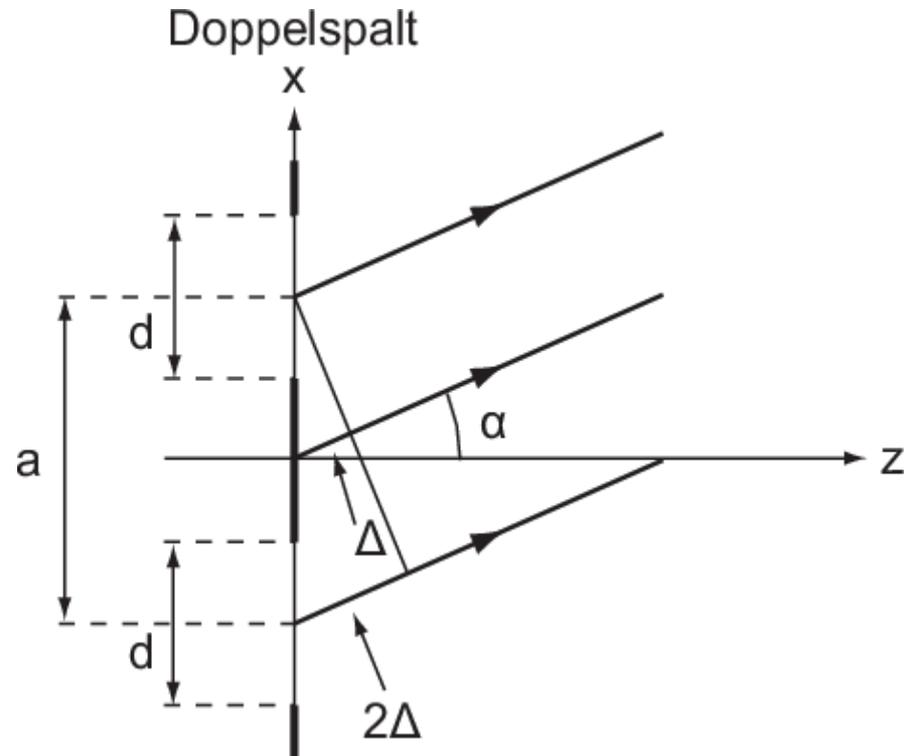
Doppelspalt - Interpretation

- Klassische Annahme:
Licht als Welle
 - Lichtwellen streuen im Spalt
 - Phasendifferenz durch Wegunterschied der Lichtwellen am Schirm → destruktive & konstruktive Interferenz
 - Überlagerung der beiden Einzelspaltinterferenzmuster beim Doppelspalt



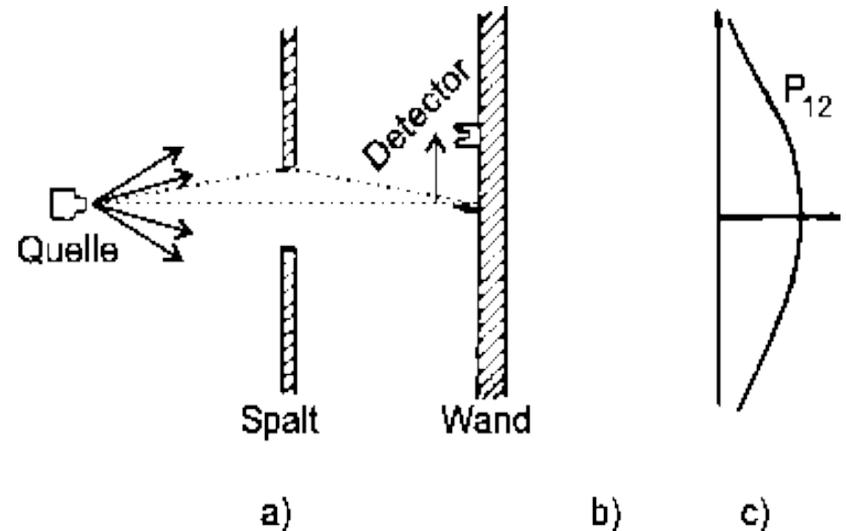
Doppelspalt - Interpretation

- Doppelspaltmaxima
bei $\sin \alpha_{max} = m \frac{\lambda}{a}$,
 $m \in \mathbb{Z}$
- Unterdrückt durch
Einzelspaltminima bei
 $\frac{m}{n} = \frac{a}{d}, n \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}, m \in \mathbb{Z}$
- Doppelspaltminima
bei $\sin \alpha_{min} =$
 $\frac{(2m+1)}{2} \frac{\lambda}{a}, m \in \mathbb{Z}$



Doppelspalt - Interpretation

- **Klassische Annahme:**
 - Keine Interferenz bei einzelnen Photonen oder Materieteilchen erwartet
 - Einfache Impulsverteilung erwartet
 - Aber: Interferenzmuster auch bei Materieteilchen und einzelnen Photonen gefunden!



Doppelspalt - Interpretation

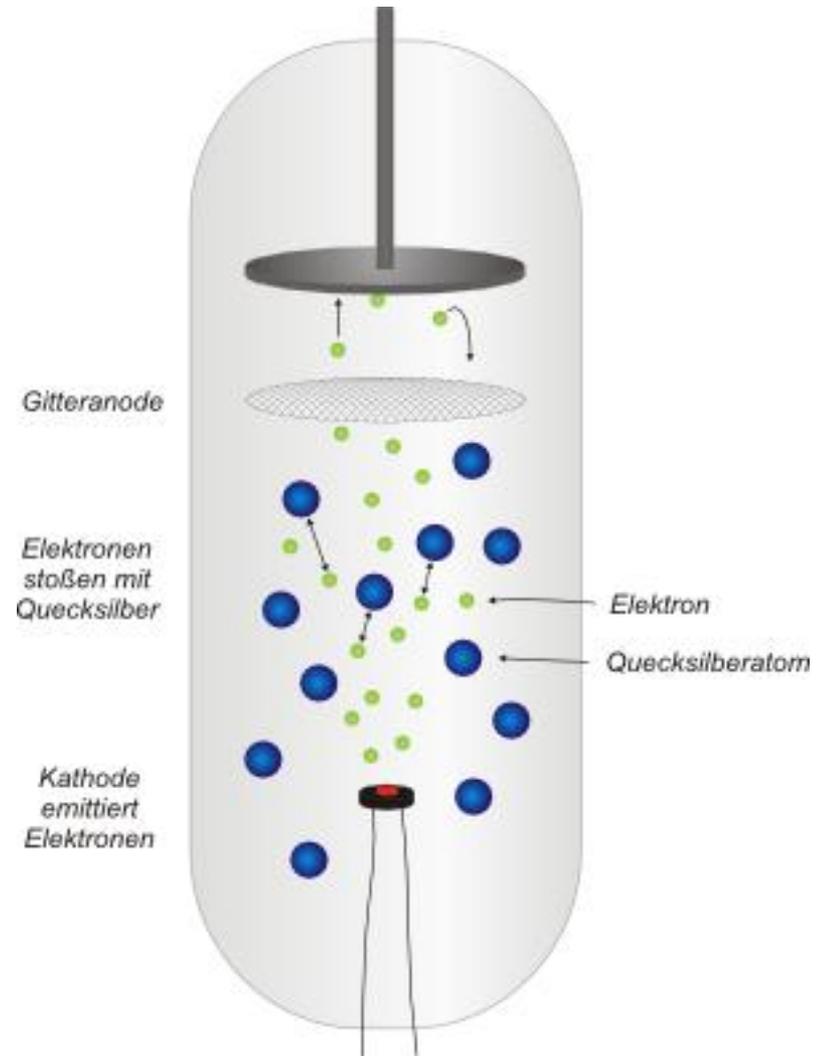
- Quantenmechanische Annahme:
 - Teilchen wird eine Wellenlänge zugeordnet (De Broglie Wellenlänge):
 - $E = mc^2 \quad E = h\nu \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{mc}{h}$
 - Selbstinterferenz einzelner Teilchen durch Überlagerung aller möglichen Wege (Zusammenbruch durch präzise Messung des genommenen Weges)

Franck-Hertz-Versuch – Historischer Hintergrund

- 1911 bis 1914 erstmals von James Franck und Gustav Hertz zur Bestimmung der Ionisationsenergie von Quecksilber durchgeführt
- 1913 Beschreibung des theoretischen Hintergrundes durch das Atommodell von Niels Bohr

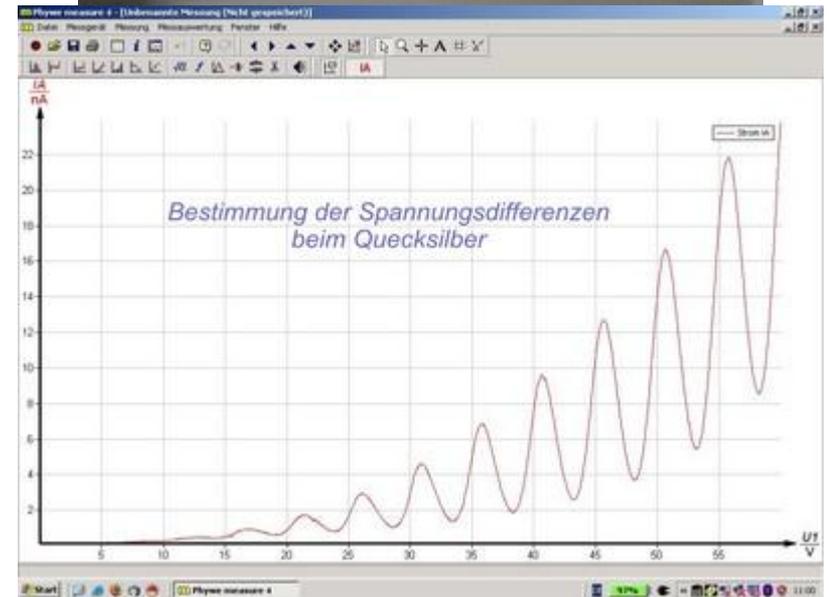
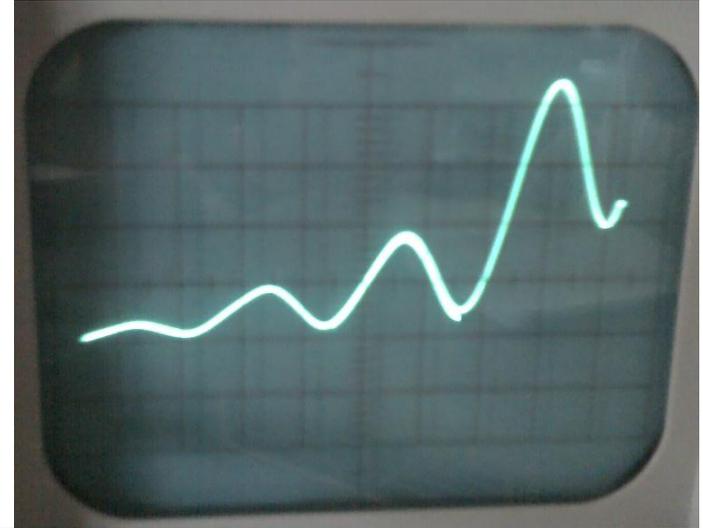
Franck-Hertz-Versuch – Aufbau

- Glaskolben mit Quecksilberdampf, Glühkathode, Gitter mit Beschleunigungsspannung und Anode mit Gegenspannung
- Beschleunigung der Elektronen zum Gitter und Stöße mit den Quecksilberatomen
- Messung der Restenergie der Elektronen über die Gegenspannung an der Anode



Franck-Hertz-Versuch – Experimentelle Resultate

- Zunächst steigende Restenergie der Elektronen mit stärkerer Beschleunigungsenergie
- Dann starker Abfall der Restenergie
- Wiederholung dieser beiden Verhalten in Regelmäßigem Abstand von $4,9\text{eV}$
- Ausstrahlung von UV-Licht von 253nm ($4,9\text{eV}$) durch das Quecksilbergas



Franck-Hertz-Versuch – Interpretation

- Klassische Annahme:
 - Nur ein Energieabfall bei Erreichen der Ionisationsenergie von Quecksilber, danach stetiger Anstieg der Restenergie

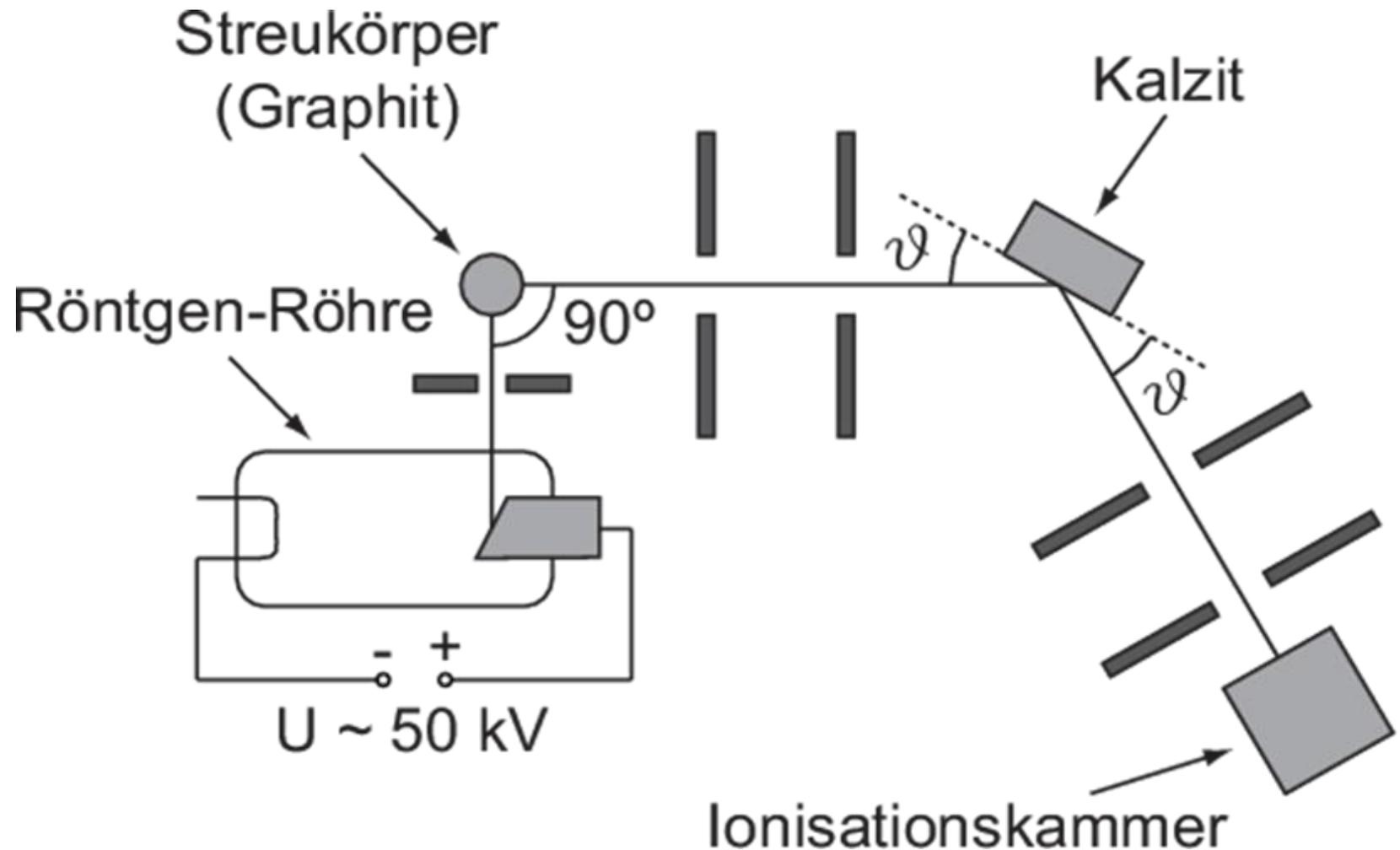
Franck-Hertz-Versuch – Interpretation

- Quantenmechanische Annahme:
 - Elektronen des Atoms haben diskrete Energiezustände
 - Klassischer elastischer Stoß mit dem Atom bei zu geringer Energie der Elektronen
 - Anregung von Elektronen in niedrigen Energieniveaus in höhere Zustände bei genügend Energie \Rightarrow Übertragung von quantisierten Energiemengen bei inelastischem Stoß
 - Angeregtes Elektron fällt durch Energieabgabe in Form von Photonen in den Ursprungszustand zurück
 - Niedrigstes anregbares Energieniveau von Quecksilber bei $4,9\text{eV}$

Compton-Effekt – Historischer Hintergrund

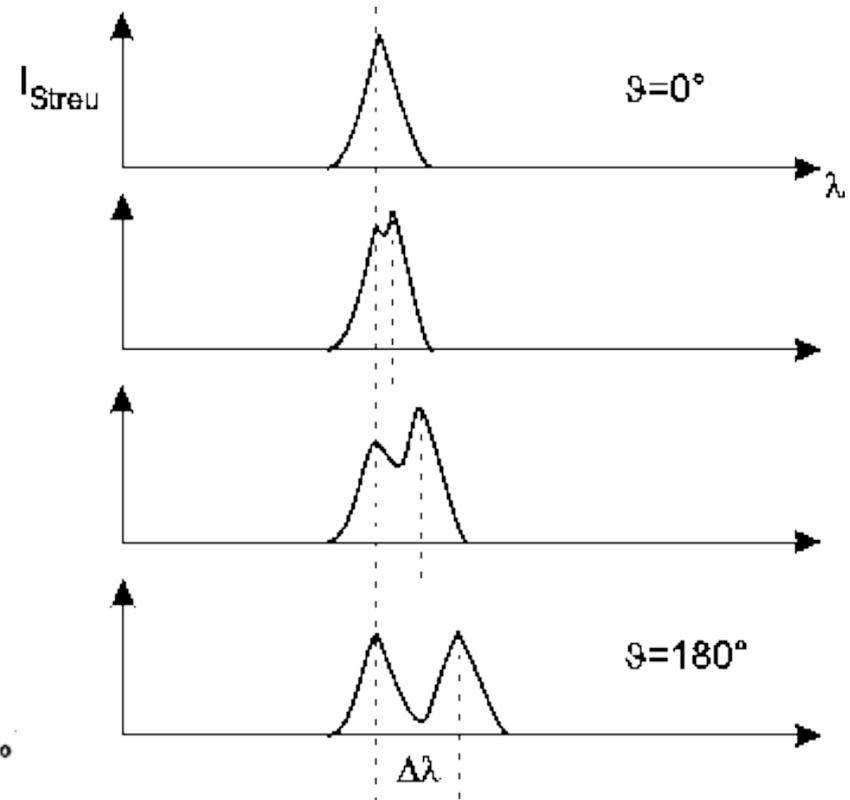
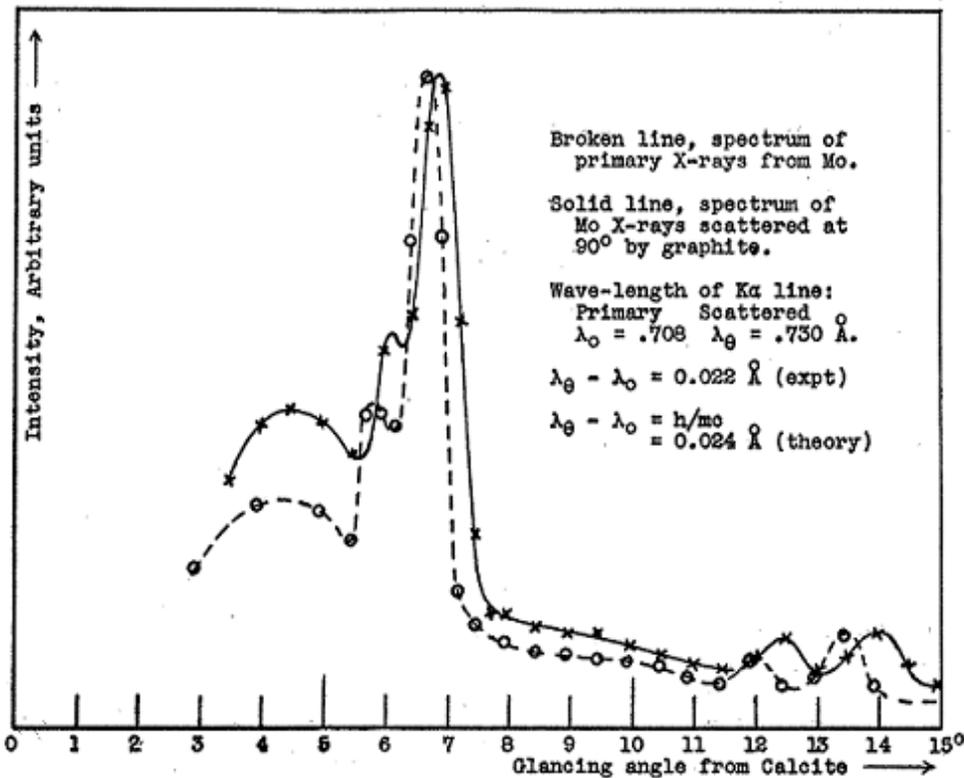
- 1922 erstmals von Arthur Compton im Experiment gefunden
- 1927 Nobelpreis

Compton-Effekt - Versuchsaufbau



Compton-Effekt – Experimentelle Resultate

- Verschiebung des Spektrums zu größeren Wellenlängen in Abhängigkeit des Streuwinkels

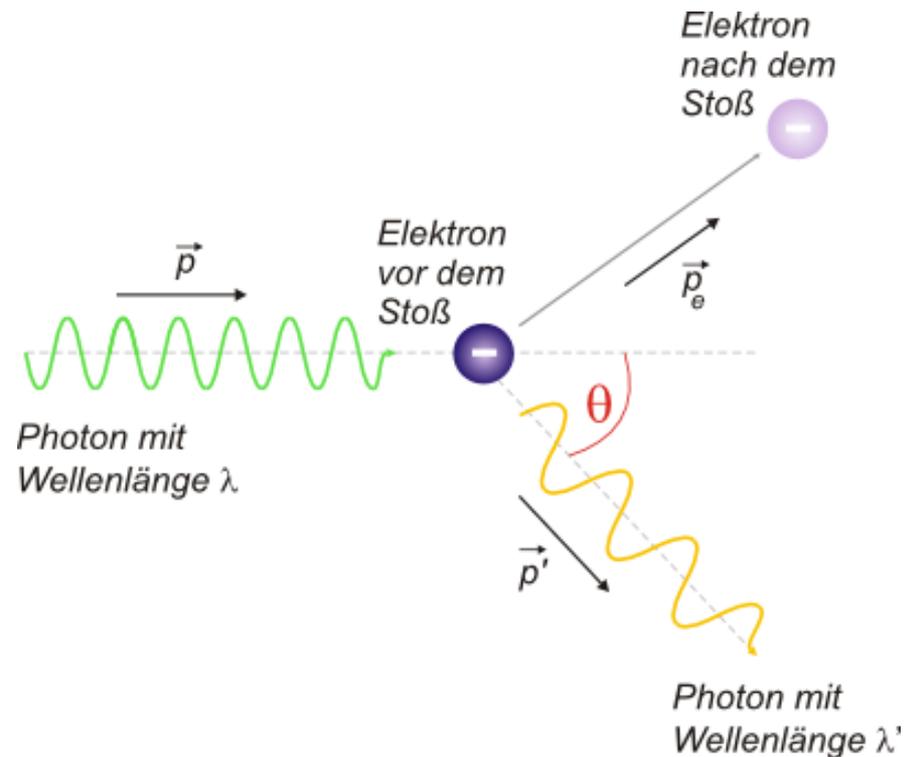


Compton-Effekt - Interpretation

- Klassische Annahme:
 - Lichtwellen regen freie Elektronen (Thomson-Streuung) oder gebundene Elektronen (Rayleigh-Streuung) zur Oszillation an
 - Oszillierende Elektronen strahlen EM-Wellen der gleichen Wellenlänge aus
 - Aber: Änderung der Wellenlänge im Experiment

Compton-Effekt - Interpretation

- Quantenmechanische Annahme:
 - Elastischer Stoß zwischen Photon und Elektron
 - Teilchenbild: Photon und Elektron als Teilchen
 - Wellenbild: Photon als EM-Welle, Elektron als Materiewelle



Compton-Effekt - Interpretation

- Quantenmechanische Annahme:

- Energie-Impuls-Erhaltung:

$$E_\gamma + E_e = E'_\gamma + E'_e$$

$$\vec{p}_\gamma + \vec{p}_e = \vec{p}'_\gamma + \vec{p}'_e$$

- Wellenlängenänderung:

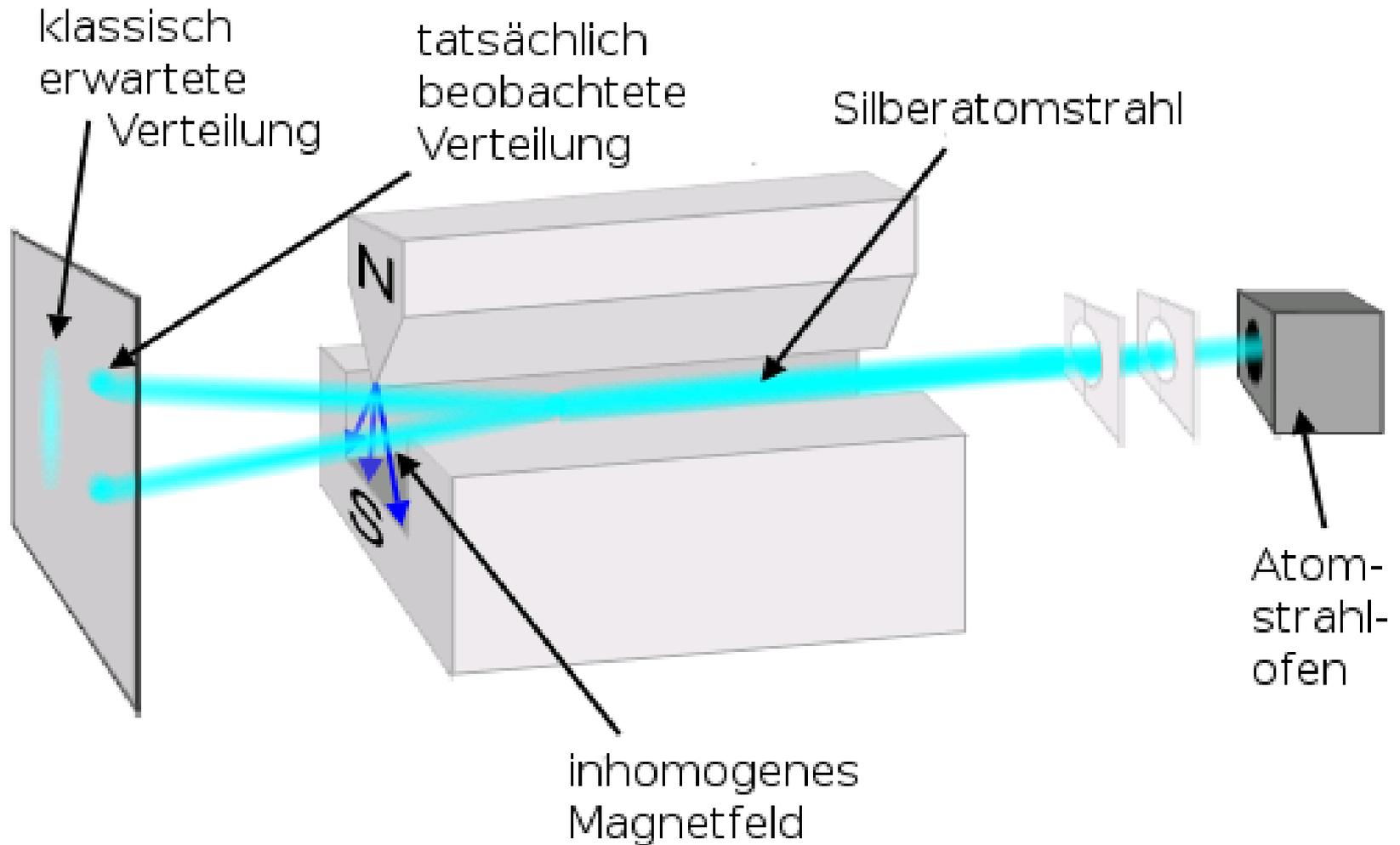
$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta))$$

- Mit Compton-Wellenlänge $\lambda_C = \frac{h}{m_e c}$
(Impulsunabhängig)

Stern-Gerlach-Versuch – Historischer Hintergrund

- 1922 erstmals von Otto Stern und Walther Gerlach im Physikalischen Verein Frankfurt mit Silberatomen durchgeführt
- 1925 neue Deutung erforderlich durch Elektronenspin
- 1927 Nachweis des Effektes durch Phipps und Taylor an Wasserstoffatomen

Stern-Gerlach-Versuch – Aufbau

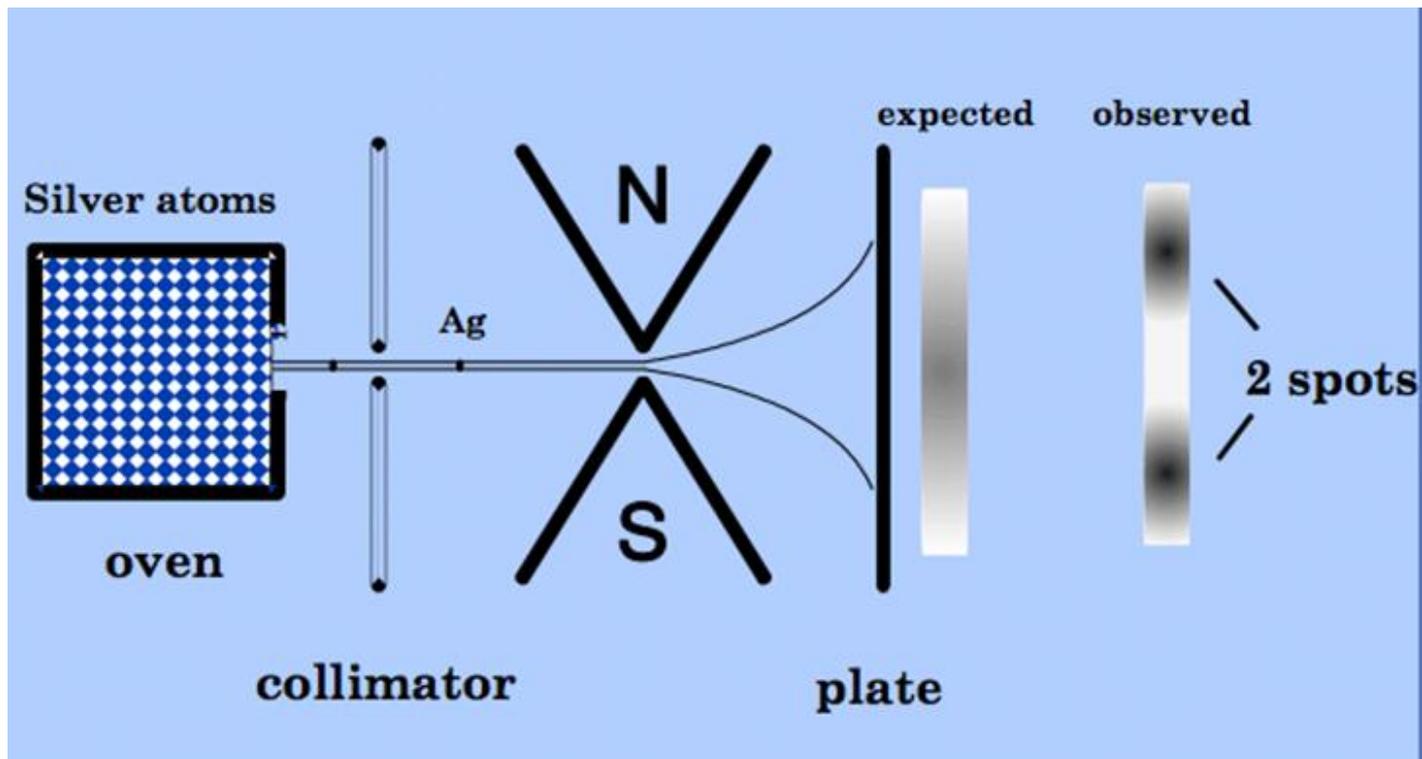


Stern-Gerlach-Versuch – Aufbau

- Aufspaltung eines Atomstrahles durch ein starkes Magnetfeld
- Im ursprünglichen Versuch: Silberatome aus einem Atomstrahlofen, anschließende Ablagerung auf einer Glasplatte (\triangleq Detektor)
- Bedingung an die Atome: Keine elektrische Ladung (zu starker Einfluss der Lorentzkraft)

Stern-Gerlach-Versuch – Experimentelle Resultate

- Aufteilen des Silberatomstrahles in zwei distinkte (polarisierte) Teilstrahlen



Stern-Gerlach-Versuch – Interpretation

- Klassische Annahme:
 - Durch magnetisches Moment der Atome wirkt eine Kraft: $\vec{F} = \vec{\nabla}(\vec{\mu} \times \vec{B})$
 - Zufällige Ausrichtung der Silberatome des Atomofens → Breite Verteilung erwartet
 - Aber: Quantisierte Ergebnisse

Stern-Gerlach-Versuch – Interpretation

- Quantenmechanische Annahme:
 - Quantisierter Drehimpuls: Magnetische Drehimpulsquantenzahl m_l kann nur Werte $(2l + 1)$ Werte $m_l = -l, -l + 1, \dots, +l$ annehmen
 - Ganzzahliger Drehimpuls erzeugt ungerade Anzahl von polarisierten Teilstrahlen
 - Postulierter Elektronenspin $s = \frac{1}{2}$ sorgt für gerade Anzahl von Teilstrahlen
 - Bei Silber: Gesamtdrehimpuls $l = 0$, alle Spins außer dem äußersten 5s-Elektron heben sich gegenseitig auf → Silberatome verhalten sich wie Spin $\frac{1}{2}$ -Teilchen

Anwendungen der Quantenmechanik – Stern-Gerlach-Versuch

- **Polarisierte Teilchenstrahlen:**
 - Nutzung für die Erzeugung von (elektrisch neutralen) Teilchenstrahlen mit vorgegebener Polarisationsrichtung (z.B. für Teilchenbeschleuniger)
 - Meist Nutzung mit Quadro- oder Sextupolmagneten (fokussiert eine Polarisation in die Mitte, defokussiert andere Polarisationen)

EPR – Historischer Hintergrund

- 1935 von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen aufgestelltes Gedankenexperiment zum Beweis, dass die Quantenmechanik unvollständig ist
- 1960 theoretische Grundlage zur möglichen Falsifizierung der EPR-Überlegung durch die Bell'sche Ungleichung von John Stewart Bell (muss von klassischen Theorien erfüllt werden)
- 1982 erste experimentelle Überprüfung

EPR - Versuchsaufbau

- Quelle für „verschränkte“ Teilchen: der exakte Zustand der beiden Teilchen ist unbestimmt, der Zustand eines Teilchens lässt auf den des anderen schließen (z.B. Gesamtimpuls, Spin, Drehimpuls = 0)
- Im Ursprünglichen Gedankenexperiment:
 - Impuls und Ort sind korreliert
 - Durch Messung an Teilchen 1 wird Impuls/Ort von Teilchen 2 ohne Messung bestimmt (→ keine Veränderung des Zustands)
 - Beide Eigenschaften könnten ohne direkte Messung an Teilchen 2 bestimmt werden → beide müssten exakt feststehen (im Widerspruch zur Unschärferelation)

EPR - Versuchsaufbau

- Später meist durchgeführtes Experiment:
 - Spontaner Zerfall eines $Spin = 0$ Teilchens in 2 ($Spin = 1$) Photonen
 - Messung der Polarisation der beiden Photonen weit (bis über 100km) voneinander entfernt
 - Ausrichtung der Polarisationsfilter erst kurz vor der Messung (keine Informationsübertragung mit Lichtgeschwindigkeit möglich)

EPR – Experimentelle Ergebnisse

- Mittelwerte der Ergebnisse verletzen die Bell'sche Ungleichung (→ Voraussagen der Quantenmechanik stimmen)

EPR - Interpretation

- Klassische Annahme:
 - Quantenmechanik sollte eine klassische Theorie sein (realistisch und lokal)
 - Realistisch: alle messbaren Eigenschaften liegen bereits vor der Messung vor (unter Umständen unbekannt durch Nichtwissen von Variablen)
 - Lokal: Messung an einem Ort sorgt nicht instantan für Veränderung an einem anderen Ort

EPR - Interpretation

- Quantenmechanische Annahme:
 - Ist keine klassische Theorie (mindestens Lokalität oder Realismus nicht erfüllt)
 - Verborgene Variablen (keine Überlagerten Zustände, dafür unbekannte Variablen) nur durch Aufgabe der Lokalität möglich

Anwendungen der Quantenmechanik - EPR

- Qubits:
 - Quantenbits als Grundlage für Quantencomputer mit möglichen Zuständen $|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ statt 0 oder 1 wie bei klassischen Bits
- Quantenkryptographie:
 - Übertragung eines verschränkten Quantenschlüssels (Abhören verändert die Quantenzustände, Abhören von Gegnern mit unbegrenzten Mitteln fällt auf)