

Präliminarien (Stand 06. April 2020):

Im Sommersemester 2020 wird aufgrund der Covid-19-bedingten Schließung der Universität die Zeit bzw. Zahl der Präsenzvorlesungen kleiner als ursprünglich vorgesehen sein. Der in EP 3b vorgesehene Stoff muss in dieser kürzeren Zeit gelehrt werden. Dies geschieht unter Zuhilfenahme von schriftlichem / digitalem Material.

Diese Vorlesungsnotizen werden (ungefähr) im Rhythmus der ursprünglich geplanten Vorlesung herausgegeben werden. Die Präsenzvorlesung (mit Stand 06. April ist das ab 04. Mai) wird den Notizen in höherem Tempo folgen, d.h. vorne beginnend und schneller bzw. unter Auslassung von offline zu erarbeitenden Teilen voranschreitend. Zum Ende der Vorlesungszeit werden die Vorlesungsnotizen und die Präsenzvorlesung auf demselben Stand sein.

Es werden auch Übungen begleitend zu den herausgegebenen Notizen gestellt, die dann während der Präsenzvorlesungszeit (auch hier unter Auslassungen) wöchentlich gelöst und in den Übungsgruppen besprochen werden.

Alle Materialien werden derzeit auf folgender Webpage veröffentlicht:

<https://www.uni-saarland.de/lehrstuhl/eschner/ss2020/ep3b.html>

Beachten Sie auch die dortigen Mitteilungen zu generellen Aspekten der Veranstaltung sowie zu Übungen und Prüfungen.

Das **Mathematische Tutorium** wird etwas anders organisiert sein, Sie finden alle Informationen dazu auf der Seite

<https://www.uni-saarland.de/lehrstuhl/eschner/ss2020/mt-ep3b.html>

Literatur:

Als Lehrbuch liegen dieser Vorlesung die Bücher "**Experimentalphysik 3**" von **W. Demtröder** und "**Atome, Moleküle und optische Physik 1**" von **I. V. Hertel** und **C.-P. Schulz** zugrunde, beide in der neuesten Ausgabe. Die Bücher sind über die SULB elektronisch kostenlos verfügbar, sie sind auf der Homepage der Vorlesung verlinkt.

Auf die Bücher wird mit [D...] und [HS...] verwiesen.

Abbildungen ohne Quellenangabe sind aus [D].

Andere Quellen werden entsprechend zitiert.

ACHTUNG: Diese Vorlesungsnotizen führen durch die relevanten Passagen der Lehrbücher. Sie ersetzen jedoch nicht das Studium der Lehrbücher selbst!

Hier beginnt Teil 1

Motivation [D 1]

Die Abbildung illustriert die zentrale Rolle der Atomphysik. Das erste Kapitel [D bis inkl. 1.2] erläutert diese Rolle. Die Konzepte der Quantenmechanik, die zum ersten Mal in der Atomphysik erscheinen und angewendet werden, leiten zudem über in die sub-atomare Physik der Kerne und Elementarteilchen.

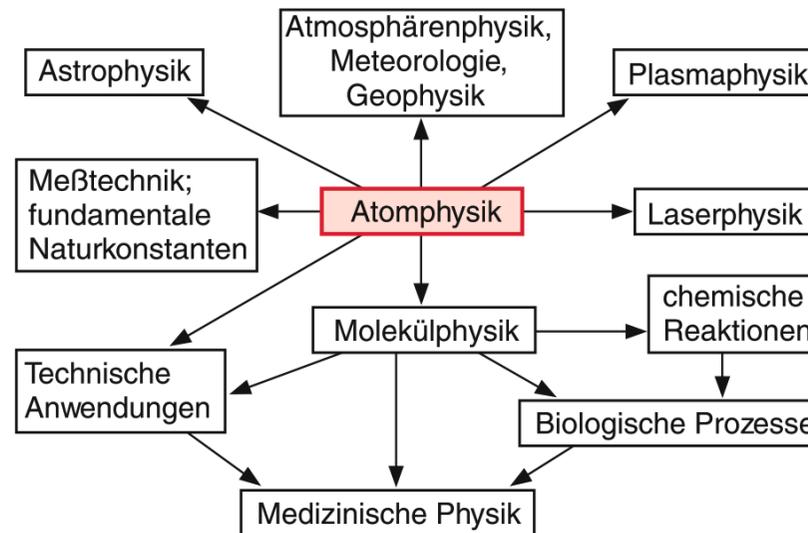


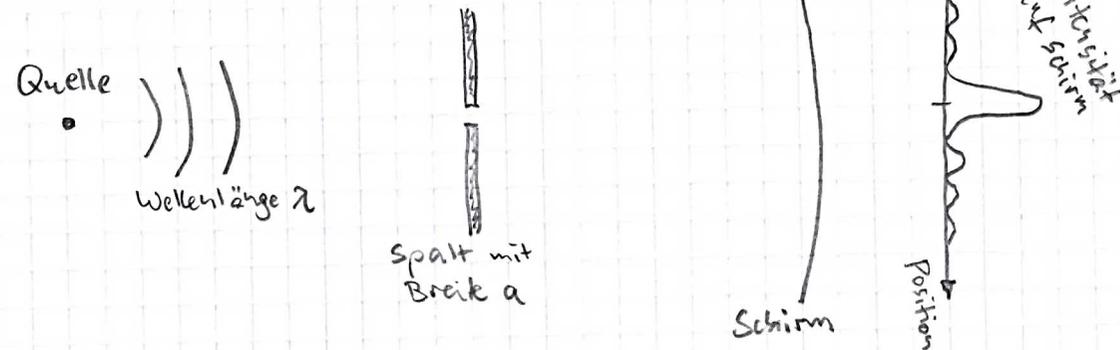
Abb. 1.1. Die zentrale Bedeutung der Atomphysik

Einleitung: Welle-Teilchen-Dualismus [D 3]

- 1) materielle Teilchen haben auch Wellencharakter
- 2) Wellen (elektromagnetische & andere) haben auch Teilchencharakter

Wegweisende Beobachtung zu 1) ist die
Biegung von Elektronen am Spalt oder Doppelspalt [D 3.2]

Erinnerung Lichtbeugung (EP 2)



klassische Vorstellung bei Teilchen: Schattenwurf

Beobachtung dagegen: Beugungsmuster wie bei Licht!

3.18

3.19

3.20

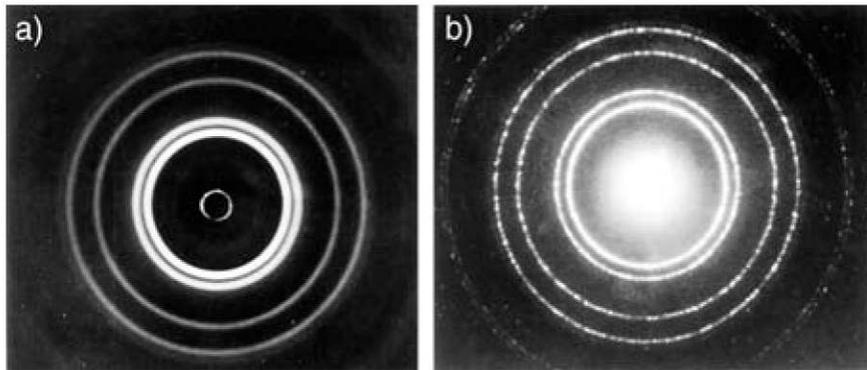


Abb. 3.18a,b. Vergleich (a) der Röntgenbeugung an einer dünnen Folie und (b) der Elektronenbeugung

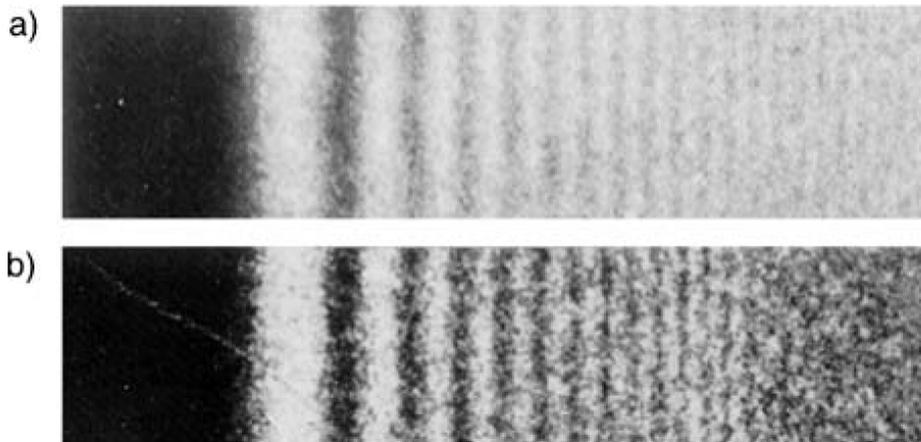


Abb. 3.19a,b. Vergleich (a) der Lichtbeugung und (b) der Elektronenbeugung ($E_{\text{kin}} = 38 \text{ keV}$) an einer Kante eines MgO-Einkristalls. Dabei wurde in (b) der Abstand r_0 der Photoplatte so eingestellt, dass $r_0 \cdot \lambda$ genau so groß wie in (a) war. Aus H. Raether: Elektroneninterferenzen, in: *Handbuch der Physik*, Bd. 32, 443 (1957)

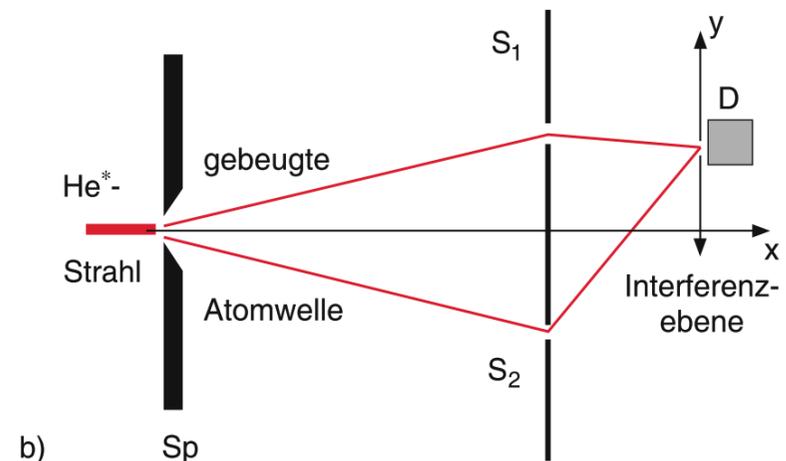
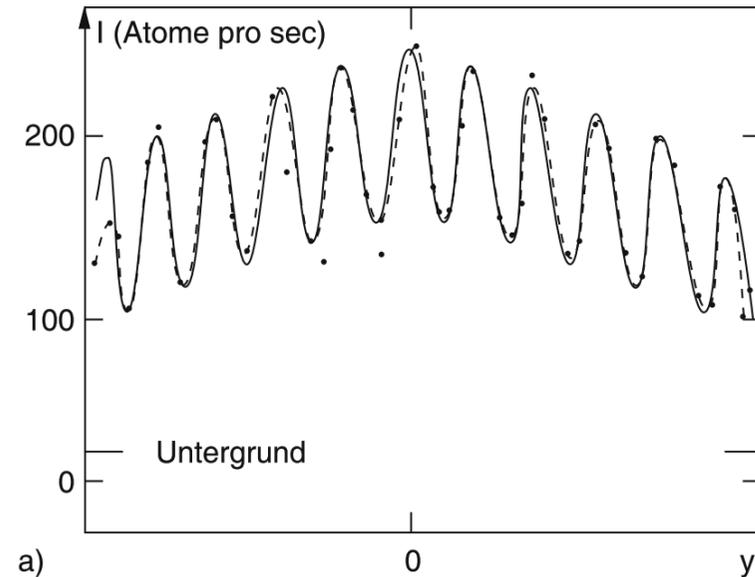


Abb. 3.20a,b. Beugung eines kollimierten Heliumatomstrahls an einem Spalt und Beobachtung der Doppelspalt-Interferenz. (a) Beobachtete Interferenzstruktur; (b) experimentelle Anordnung [3.18]

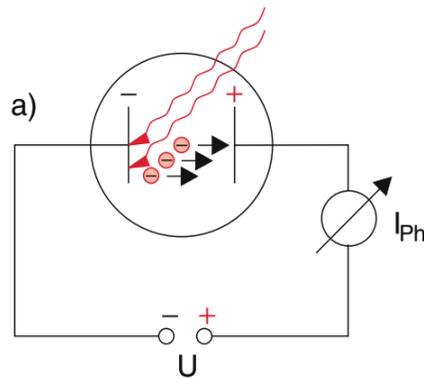


Abb. 3.9. (a) Photozelle zur Messung des Photostroms als Funktion der angelegten Spannung; (b) Photostrom $I(U)$

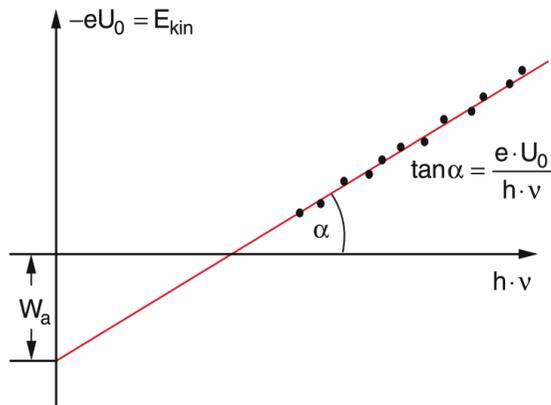
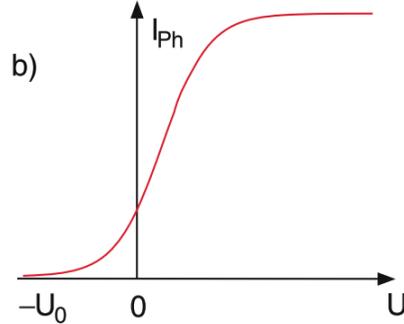


Abb. 3.10. Messung der maximalen Gegenspannung U_0 als Funktion der Frequenz ν des einfallenden Lichtes

Wegweisende Beobachtung zu 2) ist das

Photoelektrische Effekt [D 3.1]

Abb. [3.9] und [3.10] illustrieren das Experiment

und die quantitative Beobachtung:

Das Licht scheint in Energiequanten der Größe $h\nu$ aufgeteilt zu sein (mit $\nu = \frac{c}{\lambda}$ und $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$),

jedes Quant löst ein Elektron aus, die Quantenenergie teilt sich auf in Austrittsarbeit W_a (eine Materialkonstante) und E_{kin} des Elektrons. Letztere wird über die

Gegenspannung U_0 gemessen, $E_{\text{kin}} = -e \cdot U_0$, damit

$$h\nu = W_a + E_{\text{kin}}$$

Eine klassische Abschätzung (s. Buch) würde dagegen lauten, dass 3 Tage Beleuchtung für das Austreten eines Elektrons nötig sind:

Licht $\lambda = 250 \text{ nm}$, 4 W Leistung



1 cm^2 Zink

$$P_{\text{Licht}} = \frac{1 \text{ W}}{4\pi R^2} \cdot 1 \text{ cm}^2 \approx 8 \cdot 10^{-6} \text{ W}$$

Mit Eindringtiefe $\approx \lambda$ verteilt sich das Licht auf $\sim 2.5 \cdot 10^{18}$ Elektronen

$\Rightarrow P_{\text{el}} \approx 2.5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{s}}$ je Elektron aufgenommene Leistung

$\Rightarrow \Delta t \approx \frac{W_a}{P_{\text{el}}} \approx 2 \cdot 10^5 \text{ s}$ bis ein Elektron W_a aufgenommen hat.

Entwicklung des Atombegriffs [D 2]

Leukippos, Demokrit ~ 440 v. Chr.

ἄτομος atomos, das Unteilbare

Naturkörper aus raumfüllenden, unteilbaren Partikeln,
außerhalb leeres Raum

Mikroskopische Teilchen & deren Wechselwirkungen bestimmen
die Eigenschaften der Dinge. Werden = Änderungen
der Zusammensetzung.

... Platonische Körper

[2.2]

... Epikur: Atome besitzen Schwere

... erst 17. - früheres 19. Jhr.: Chemie, kinetische Gastheorie

(Boyle, Bernoulli)

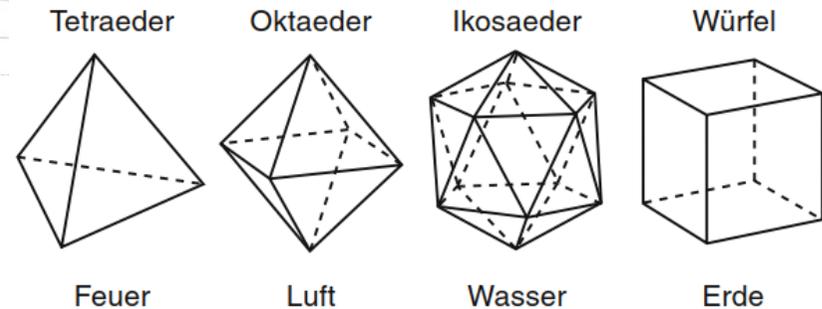


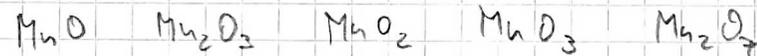
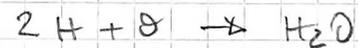
Abb. 2.2. Die Platonischen Körper

Dalton 1808: Gesetz der konstanten Proportionen

Wägung von Reaktanden & Reaktionsprodukten

⇒ Stoffe bestehen aus Atomen, die die Eigenschaften bestimmen

In Verbindungen vereinigen sich Elemente in ganzzahligen Verhältnissen



Anteil 0 2:3:4:6:7

nur Massenverhältnisse bzw. Masse relativ zu H

$$\text{Heute} \quad 1 \text{ a.m.u.} = \frac{1}{12} \cdot m(^{12}\text{C}) = 1,660538782 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Gay-Lussac, Humboldt 1805; Avogadro 1811, Loschmidt 1865

konstante Proportionen (kleine ganze Zahlen) der Volumina

bei Reaktionen von Gasen.

molekülbefüllt +
⇒ gleiches Volumen bei gleicher Zahl von Molekülen

Definition Molvolumen, Mol

$$N_A = 6,022\,1415(10) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

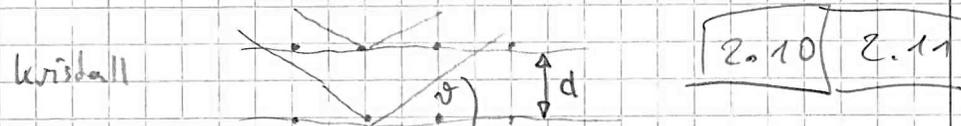
Avogadro-Konstante
Loschmidt-Zahl

aus Gaskonstante R und Boltzmannk. k (2.2.3)

und idealen Gasgesetz $pV = N_A kT = RT$

$$V_M = 22,413996(37) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Atomgröße & N_A aus Röntgenbeugung [D 2.4]



konstruktive Interferenz wenn $2d \sin \vartheta = m \cdot \lambda$ Bragg-Bedingung

zufällige Orientierung ⇒ Kreise

kleinster Kreis = größter Abstand = a

Experimentell $a \sim 0,1 - 0,5 \text{ nm}$



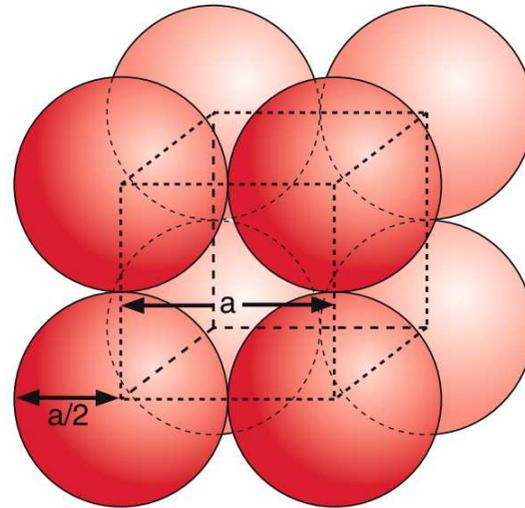


Abb. 2.9.
Kubischer
Kristall

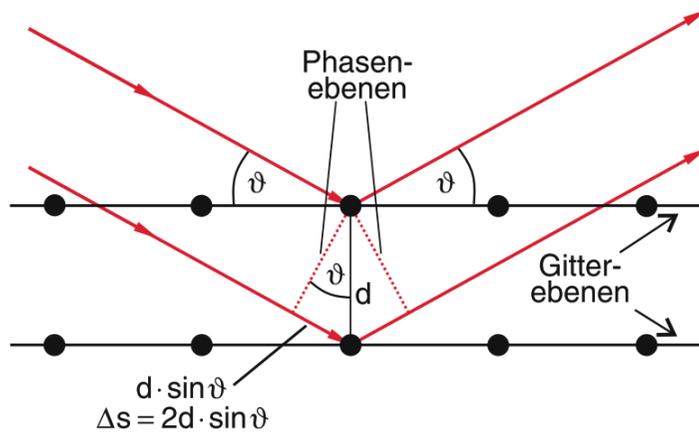


Abb. 2.10. Bragg-Reflexion von Röntgenstrahlen an Netzebenen eines Kristalls zur Bestimmung der Atomabstände

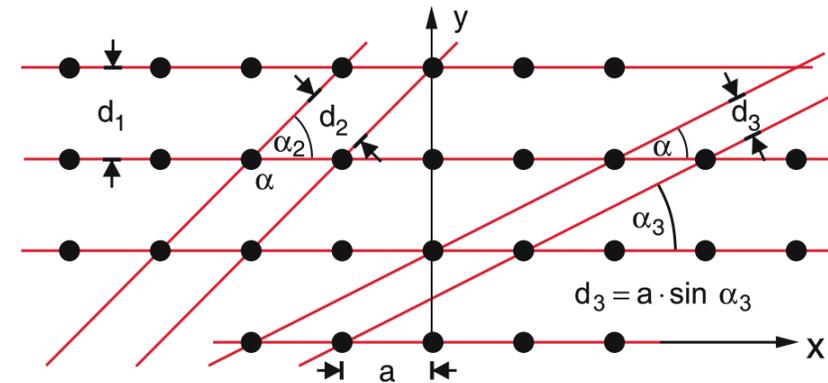


Abb. 2.11. Verschiedene zur Zeichenebene senkrechte Netzebenen in einem kubischen Kristall mit unterschiedlichen Netzebenenabständen

Atomgrößenbestimmung auch aus

- van-der-Waals-Gleichung ("Kovolumen")

- Transportkoeffizienten in Gasen:

Diffusion, Wärmeleitung, Viskosität, ...

siehe [D 2.4.1], [D 2.4.2]

Die beobachtete Atomgröße hängt von der Methode ab,

siehe Tabelle 2.2, d.h. von der zugrunde liegenden Wechselwirkung.

Tabelle 2.2. Atomradien r_0 in $10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$ im Modell starrer Kugeln experimentell bestimmt: a) aus der van-der-Waals'schen Zustandsgleichung, b) aus dem Wirkungsquerschnitt $\sigma = \pi d_0^2$, gemessen mit Hilfe der Transportkoeffizienten, c) aus der Röntgenbeugung an Edeltgaskristallen bei tiefen Temperaturen

Atom	a)	b)	c)
He	1,33	0,91	1,76
Ne	1,19	1,13	1,59
Ar	1,48	1,49	1,91
Kr	1,59	1,61	2,01
Xe	1,73	1,77	2,20
Hg	2,1	1,4	—

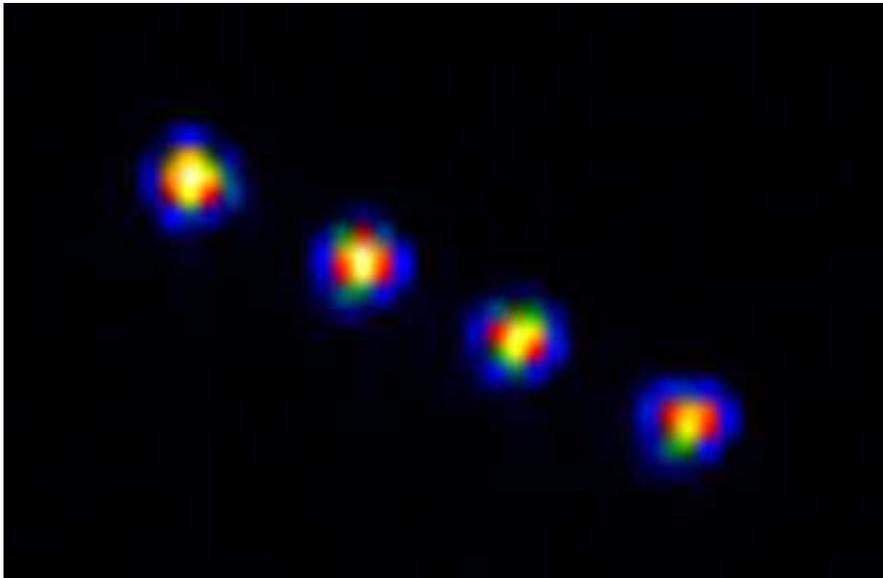
Einzelne Atome sehen [D 2.3]

optische Auflösung ist $\sim \lambda \sim 500 \text{ nm} \gg a$!

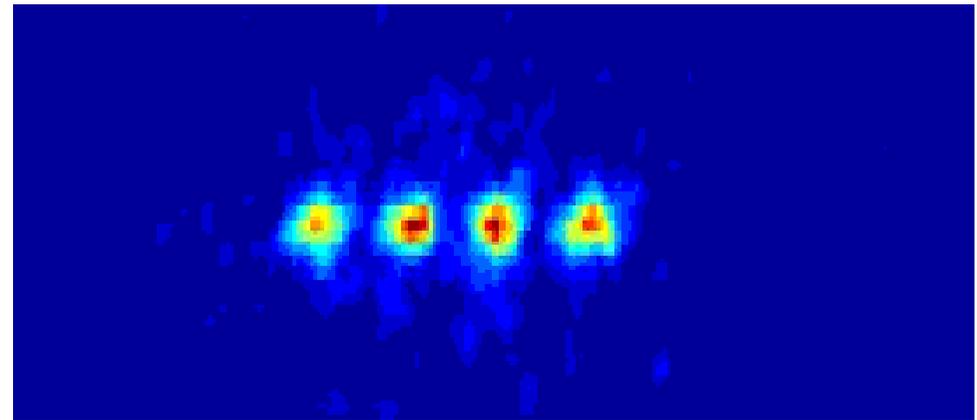
\Rightarrow ein beleuchtetes / leuchtendes Atom hat die Größe $\sim \lambda$
ohne sichtbare Struktur .

In dem Sinne kann man einzelne Atome sehen — in unserer
Forschungsarbeit ist das eine alltägliche Beobachtung !

Einzelne Atome (Ca^+ -Ionen), mit Laserlicht beleuchtet und mit einer Kamera beobachtet



(AG Eschner, SB)



(AG Blatt, Innsbruck)

Atome "sehen" durch Effekt auf andere Teilchen [2.3.1] 1)

→ Brown'sche Molekularbewegung (1827) 2.14

erklärt beobachtete Zitterbewegung bzw. Diffusion

$$D = \frac{1}{2} \frac{\langle \xi^2 \rangle}{\Delta t} = \frac{kT}{6\pi\eta r}$$

durch Stöße mit Atomen / Molekülen abhängig von

Temp. T und Zähigkeit η . r = Radius des gestörten Teilchens

Versuch!

moderne Methoden: Raster-tunnel-, Rasterkraftmikroskopie,

[2.25]

[2.27]

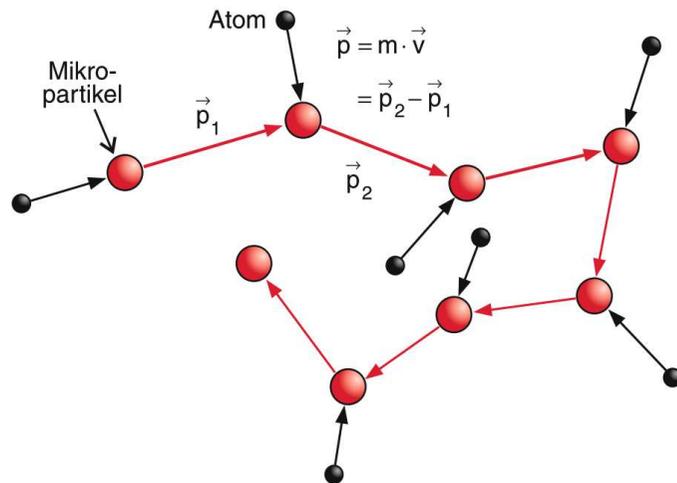


Abb. 2.14. Schematische Darstellung der Brown'schen Molekularbewegung

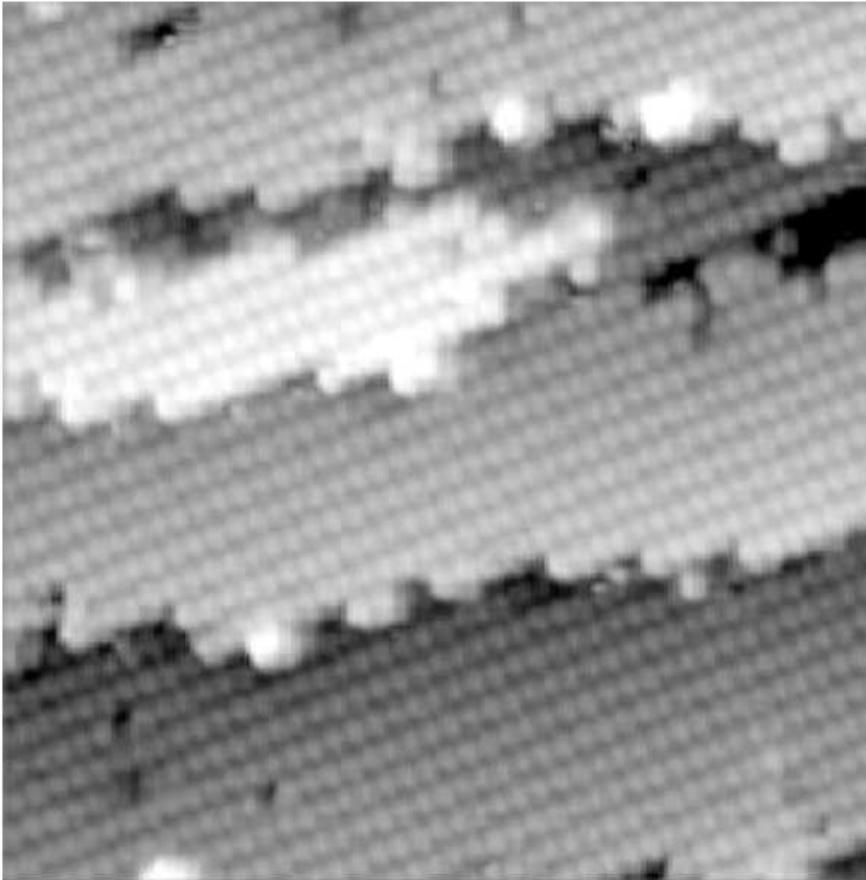


Abb. 2.25. Arsen-Atome an der Oberfläche eines Galliumarsenid-Einkristalls, sichtbar gemacht mit einem Rastertunnelmikroskop (Bildgröße $17 \text{ nm} \times 17 \text{ nm}$). Nichtperiodische Strukturen wie Leerstellen und Stufen können auf atomarer Skala untersucht werden. Mit freundlicher Genehmigung von A.J. Heinrich, M. Wenderoth und R.G. Ulbrich, Göttingen

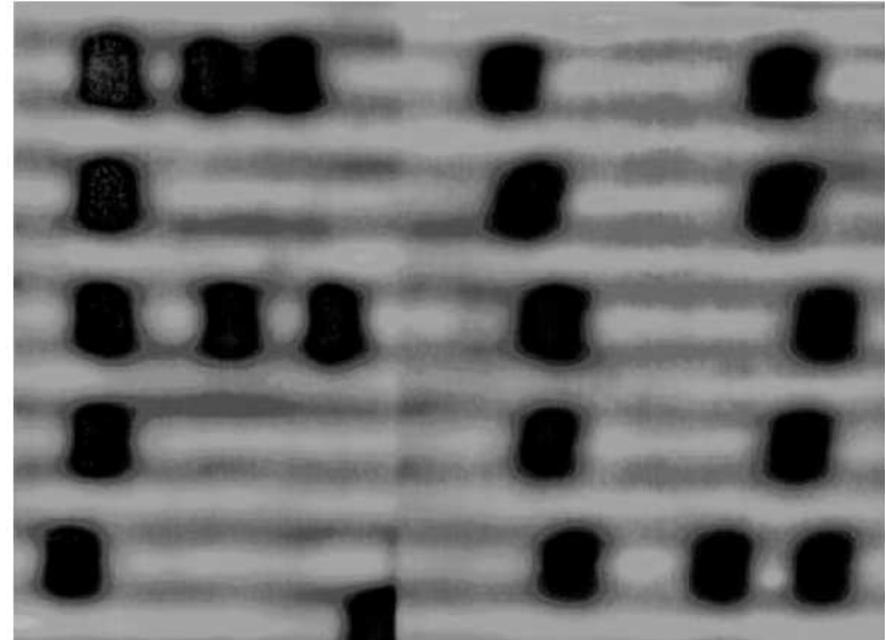


Abb. 2.27. Buchstabenanordnung aus einzelnen CO-Molekülen auf einer Kupferoberfläche, manipuliert mit dem Kraftmikroskop. Mit freundlicher Genehmigung von Prof. Rieder, FU Berlin [2.33]

Elektrischer Aufbau der Atome [2.5]

- Elektrolyse : Atome / Moleküle dissoziieren in +/- geladene Teile
 - Gasentladung : Ablenkung im Magnetfeld \Rightarrow Ladung
 - α -, β -Strahlung :
 - magn. Effekte in Metallen (Hall-Effekt etc)
- \Rightarrow Substruktur aus geladenen Bausteinen, insgesamt neutral, Zusammenhalt durch Coulomb-Kraft (warum kein Kollaps?)

Gasentladung \rightarrow

Kathoden- und Kanalstrahlen (2.5.1)

2.33

2.34

2.35

Ablenkung durch $\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \Rightarrow$ Bestimmung $\frac{e}{m}$

$\frac{e}{m}$ für Kathodenstrahlen $\sim 10^4$ größer als für Kanalstrahlen

\Rightarrow Atome zusammengesetzt aus "Elektronen" + "Ionen"

Messung von e durch Millikan 1910 $e = 1,602176487(40) \times 10^{-19} \text{ C}$

$\Rightarrow m_e = 9,10938215(45) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Versuche zur Neutralität $\Rightarrow \frac{\Delta q}{e} < 2 \cdot 10^{-21}$
(s. auch Kosmologie!)

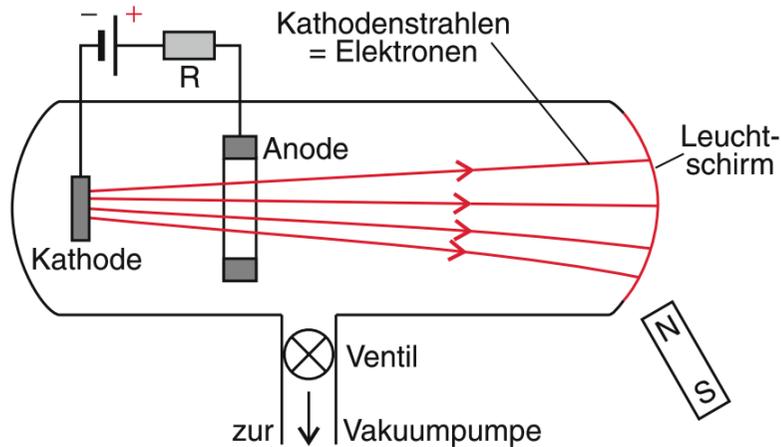


Abb. 2.33. Schematische Darstellung der Anordnung zur Beobachtung der Kathodenstrahlung auf einem Leuchtschirm. Die Anordnung ermöglicht die Ablenkung der Strahlen durch Magnete

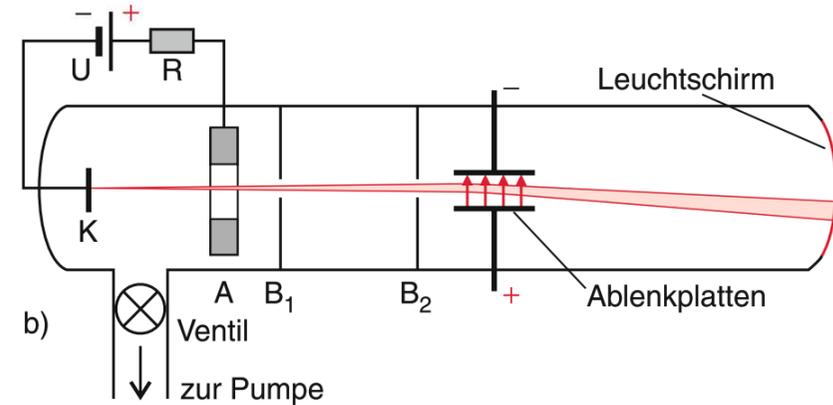
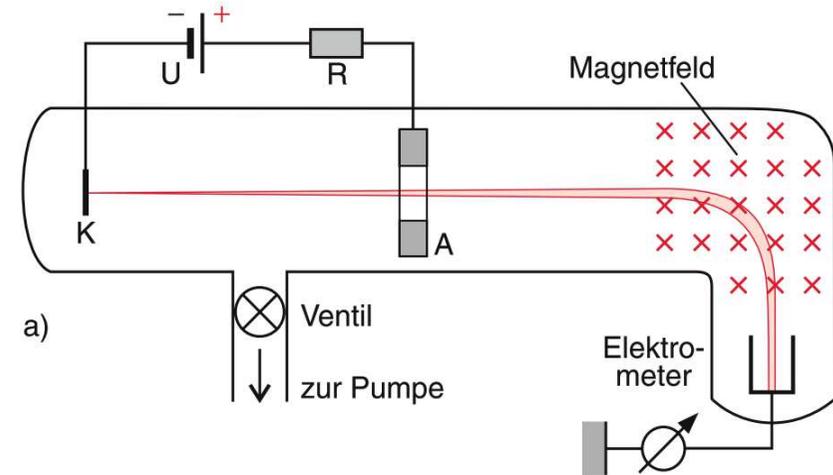


Abb. 2.34a,b. Anordnung von J.J. Thomson zur Bestimmung des Verhältnisses e/m der Kathodenstrahlung durch Ablenkung (a) im Magnetfeld, (b) im elektrischen Feld

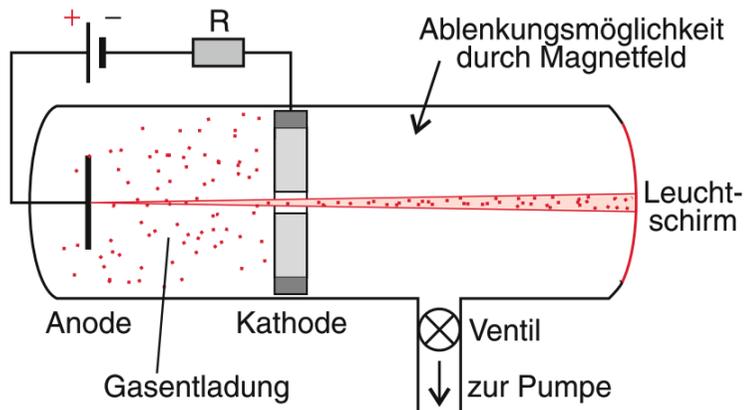


Abb. 2.35. Schematische Darstellung der experimentellen Realisierung von Kanalstrahlen in einer Gasentladung bei durchbohrter Kathode

5/5 → Massenspektrometer [2.7] / Übung

→ Auflösung $\Delta m \ll m_H$

⇒ Entdeckung von Isotopen 2.79

⇒ Erklärung von nicht ganzzahligen Atommassen
(nat. Cl = 75.5% ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ + 24.5% ${}^{37}_{17}\text{Cl}$
Atommasse = 35.49)

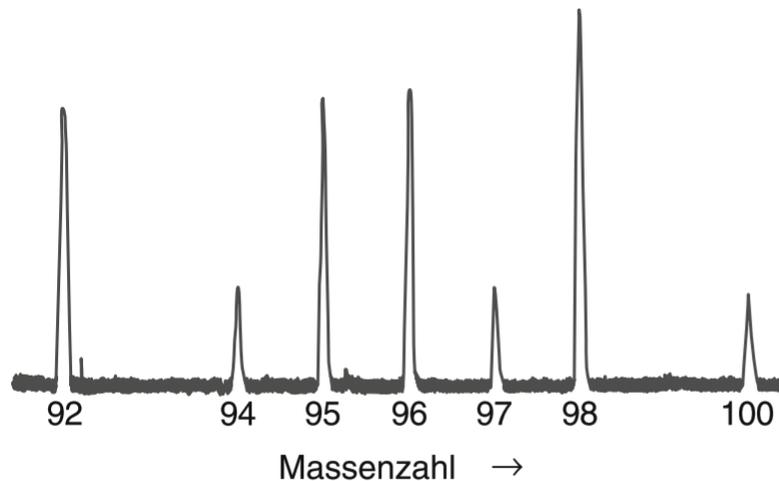


Abb. 2.79. Isotopenhäufigkeiten von Molybdän, gemessen mit dem doppelfokussierenden Massenspektrometer von *Mattauch* [2.54]

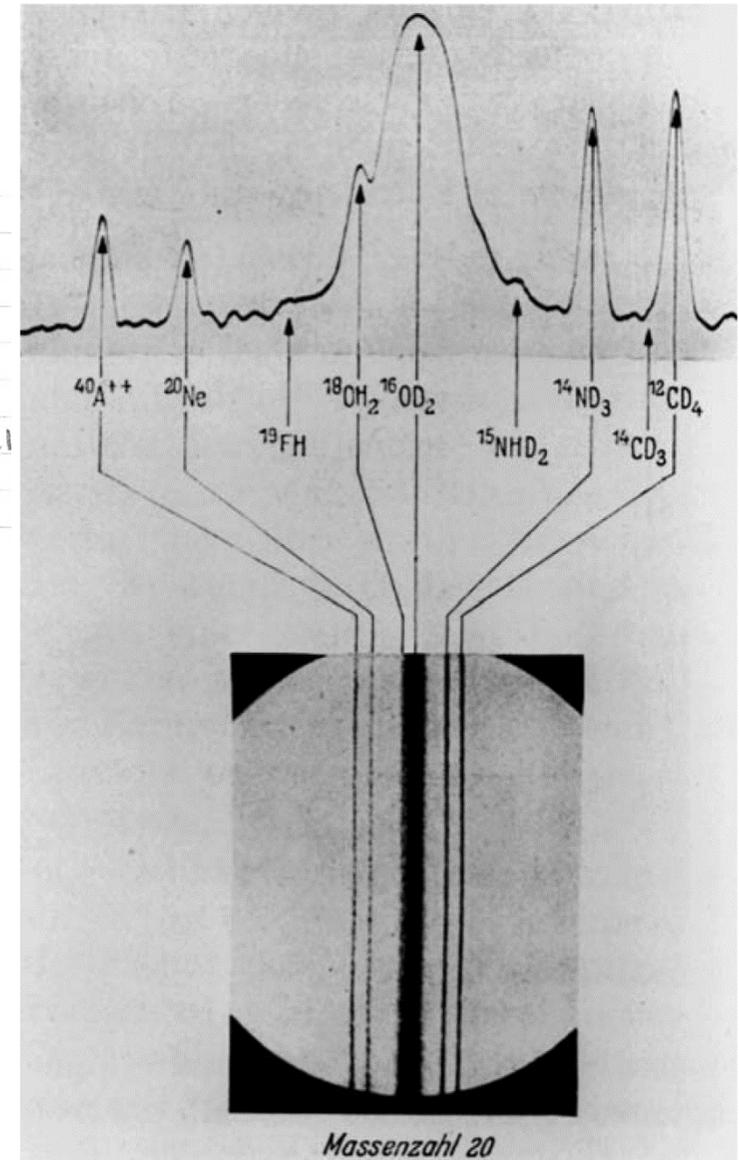


Abb. 2.69. Ausschnitt aus einem hochaufgelösten Massenspektrum von Ionen im Massenbereich um 20 AME aus einer Gasentladung von Argon und Neon, gemischt mit Methan, Ammoniak und Wasserdampf. Aus *J. Mattauch* [2.54]

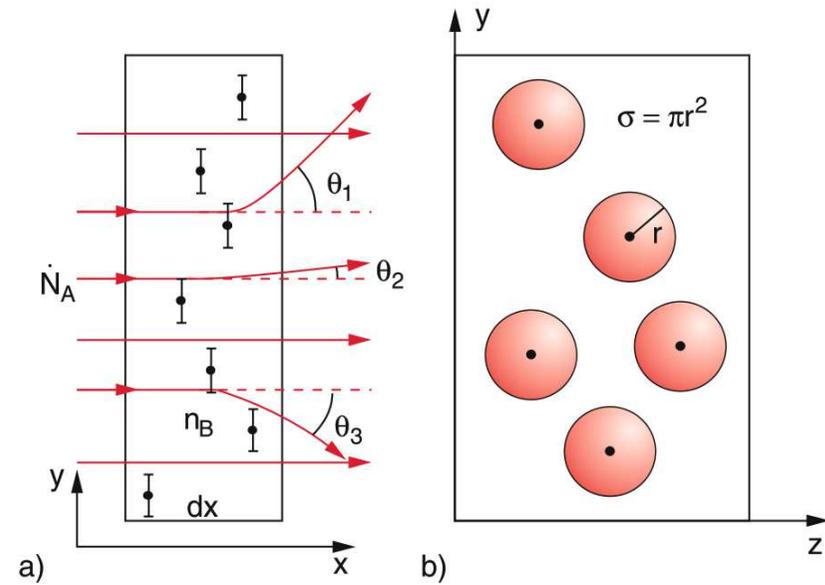
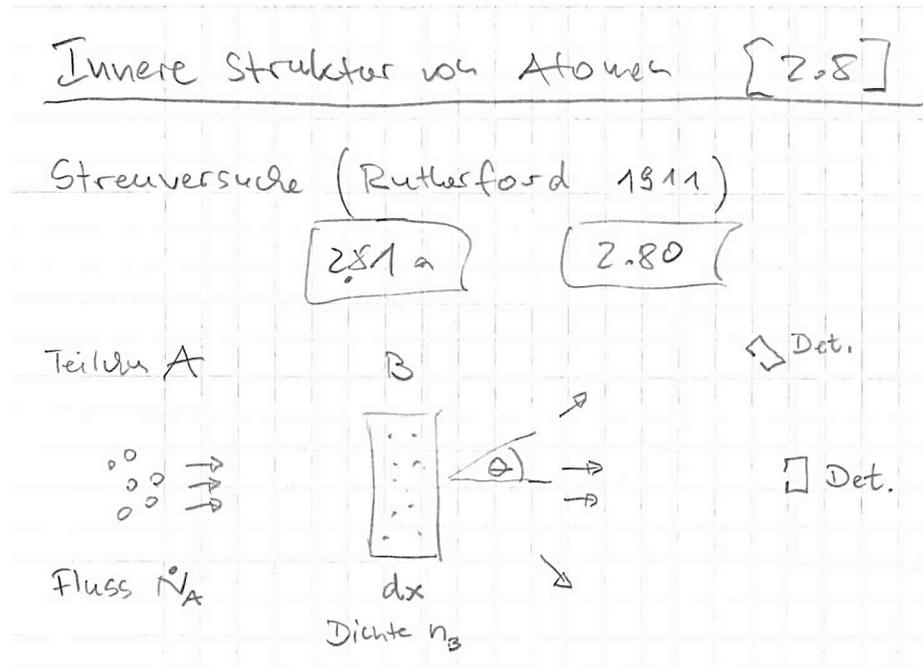


Abb. 2.80. (a) Streuung von Atomen N_A an Atomen mit der Dichte n_B in einer Schicht der Dicke dx . (b) Zur Definition des Wirkungsquerschnittes

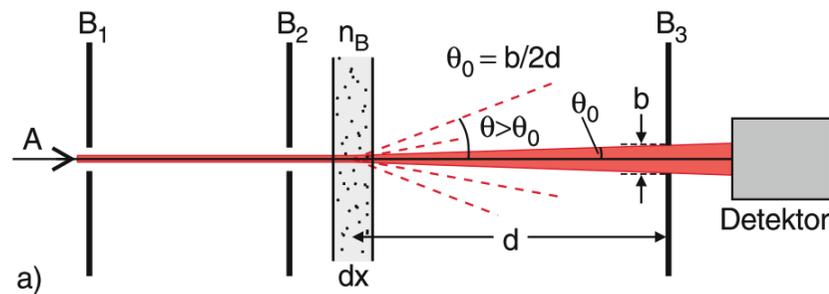


Abb. 2.81. (a) Messung des integralen Streuquerschnitts σ .

Streuung aus dem Hauptstrahl heraus
= Ablenkung um $\Theta > \Theta_0$

$$\Lambda = \sigma n_B = \text{freie Weglänge} \\ = \dot{N}_A(0) e^{-\frac{x}{\Lambda}}$$

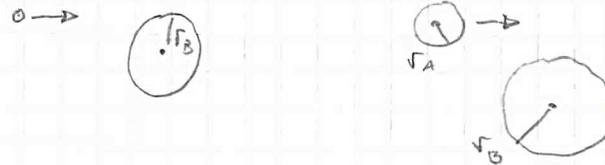
Abschwächung $-\frac{d\dot{N}_A}{\dot{N}_A} = \sigma \cdot n_B \cdot dx$

$$\dot{N}_A(x) = \dot{N}_A(0) e^{-n_B \sigma x}$$

definiert den integralen Streuquerschnitt σ $[\sigma] = \text{m}^2$

Interpretation als effektive Fläche der Atome B $\sigma = \pi r_B^2$

bzw. WW Fläche zwischen A und B $\sigma = \pi (r_A + r_B)^2$



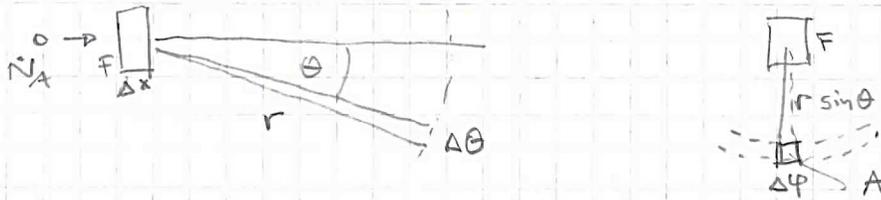
σ hängt ab von $- V_{AB}(r)$ WW potential (aber ohne Details)

$-\vec{v}_A - \vec{v}_B$ Relativgeschw.
bzw. E_0 Anfangsenergie

& Mittelung über Relativabstand angenommen

Details insbes. zu $V_{AB}(r)$ aus Zahl der
unter Winkel θ gestreuten Atome

2.81b



A : (kleine) Detektorfläche in Richtung θ, φ

→ Raumwinkel $\Delta\Omega = \frac{A}{r^2} = \sin\theta \Delta\theta \Delta\varphi$

Bruchteil der in $\Delta\Omega$ gestreuten Atome

$$\frac{\Delta \dot{N}_A \text{ in } \Delta\Omega(\theta)}{\dot{N}_A} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) \cdot V \cdot \Delta\Omega$$

$\approx F \cdot \Delta x$

definiert differentiellen Wirkungs-/Streuquerschnitt $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, \varphi)$

hier keine Abh. von φ ($V_{AB}(r)$ kugelsymmetrisch)

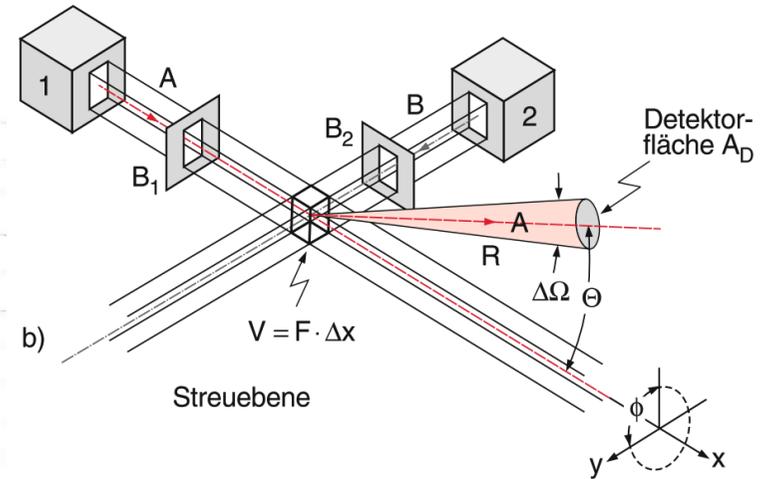


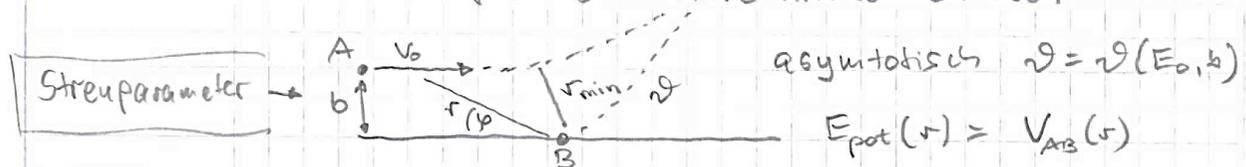
Abb. 2.81. (a) Messung des integralen Streuquerschnitts σ .
(b) Messung des differentiellen Streuquerschnitts $d\sigma/d\Omega$

$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta)$ hängt ab von

- Details von $V_{AB}(r)$!
- Eingangsparameter (v, E_0, \dots)

Berechnung aus Trajektorie für einzelnes Teilchen

- Einfachstreuung
- Erhaltungssätze für E, L
- Schwerpunkts- u. Relativkoordinaten



$$\vartheta(E_0, b) = \pi - 2b \int_{r_{min}}^{\infty} \frac{dr}{r^2 \left(1 - \frac{b^2}{r^2} - \frac{E_{pot}(r)}{E_0}\right)^{1/2}}$$

$$r_{min} = \frac{b}{\left(1 - \frac{E_{pot}(r_{min})}{E_0}\right)^{1/2}}$$

Achtung
nicht immer
eindeutig

Dann Mittelung über mögliche Streuparameter b

$$[b, b+db] \rightarrow [\vartheta, \vartheta+d\vartheta]$$

$$\frac{db}{b}$$



2.84

(Abbildungen für
detailliertere
Herleitung)

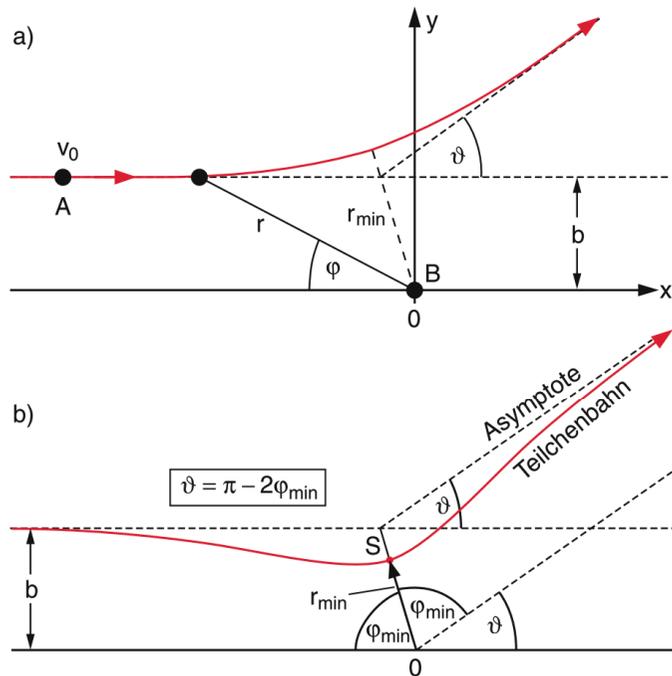


Abb. 2.82. (a) Streuung eines Teilchens A der reduzierten Masse $\mu = m_A \cdot m_B / (m_A + m_B)$ im Potential $V(r)$ mit Nullpunkt in B. (b) Beziehung zwischen Ablenkwinkel ϑ und Polarwinkel φ_{\min} im Punkt S nächster Annäherung zwischen A und B

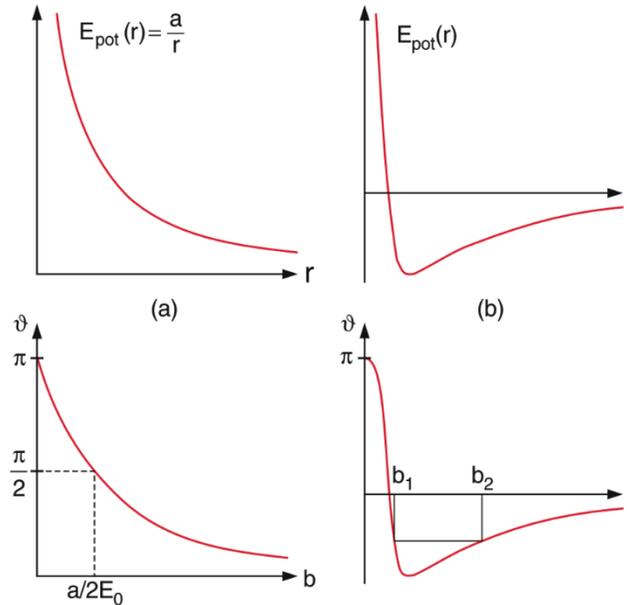


Abb. 2.83a,b. Qualitativer Zusammenhang zwischen Wechselwirkungspotential und Ablenkwinkel $\vartheta(b)$. (a) Monoton fallendes Potential; (b) nichtmonoton fallendes Potential

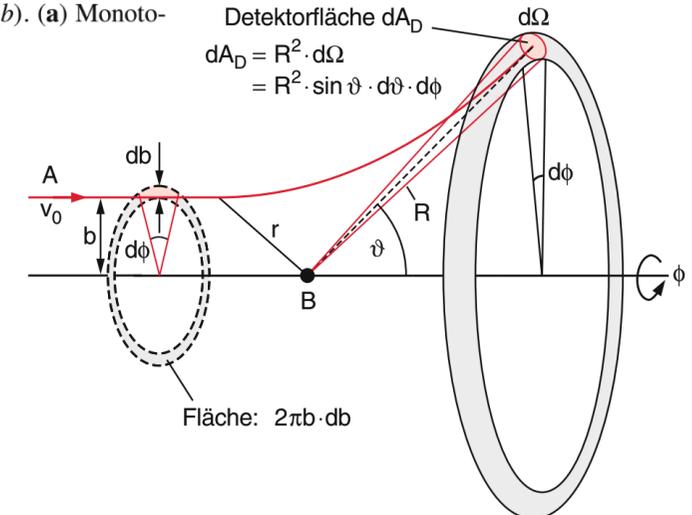


Abb. 2.84. Zum Zusammenhang zwischen Ablenkwinkel $\vartheta(b)$ und differentiellem Streuquerschnitt $d\sigma/d\Omega$

Rutherford Expt.

2.89

Streuung von α -Teilchen (He-Kerne) an Gold

Ergebnis

2.91

verträglich mit Coulombstreuung
an punktförmigen Teilchen

(früher:)

$$\cot \frac{\vartheta}{2} = \frac{ZE_{\text{kin}}}{E_{\text{pot}}} = \frac{4\pi\epsilon_0}{ZQ} \mu V_0^2 b$$

→ Rutherford'sche Streifenformel

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{4} \left(\frac{ZQ}{4\pi\epsilon_0 \mu V_0^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}}$$

Vergleich mit Thomson'schen "Rosinenkuchenmodell"

2.91

Abweichungen: Kernausdehnung inkl. Kerngröße

2.92

– Teilchen dringt in den Kern ein $r_{\text{min}} < r_k$
und "sieht" nur Ladung $\propto \left(\frac{r_{\text{min}}}{r_k}\right)^3$

– Potential $V(r < r_k)$ anders
aufgrund der Kernkräfte

Expt: $r_k \sim r_0 A^{1/3}$ mit $r_0 \sim 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$

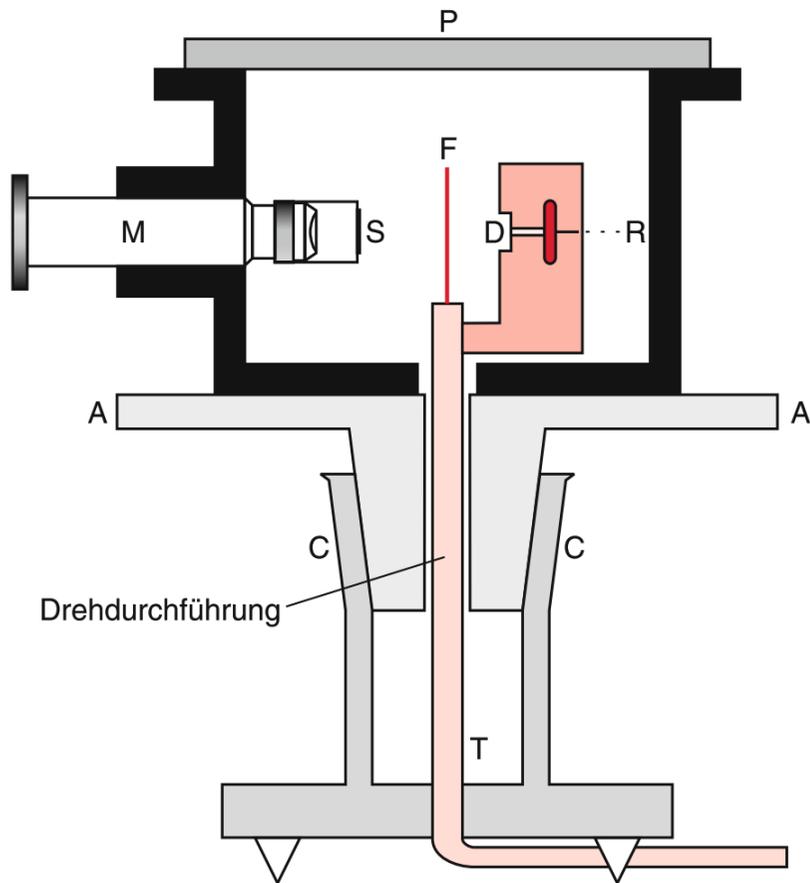


Abb. 2.89. Versuchsaufbau für die Rutherford-Streuung

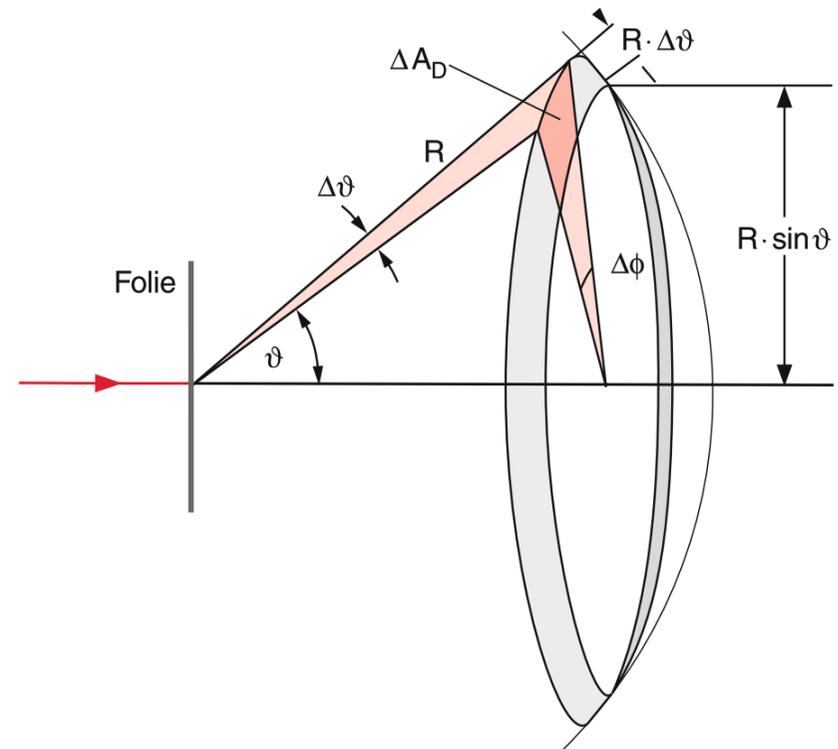


Abb. 2.90. Zur Definition des Raumwinkels $\Delta\Omega$ und der Detektorfläche $\Delta A_D = R^2 \Delta\Omega$

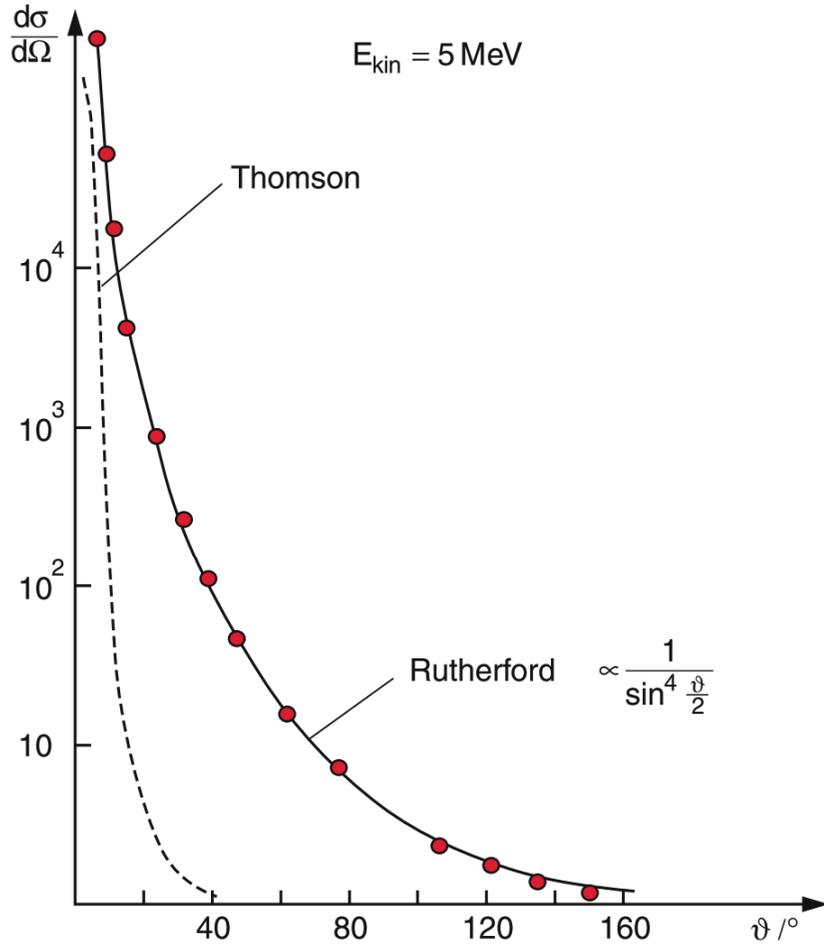


Abb. 2.91. Vergleich zwischen den experimentellen Ergebnissen Rutherfords (Kreise), dem berechneten Wirkungsquerschnitt für Coulombstreuung und dem Streuquerschnitt des Thomson-Modells

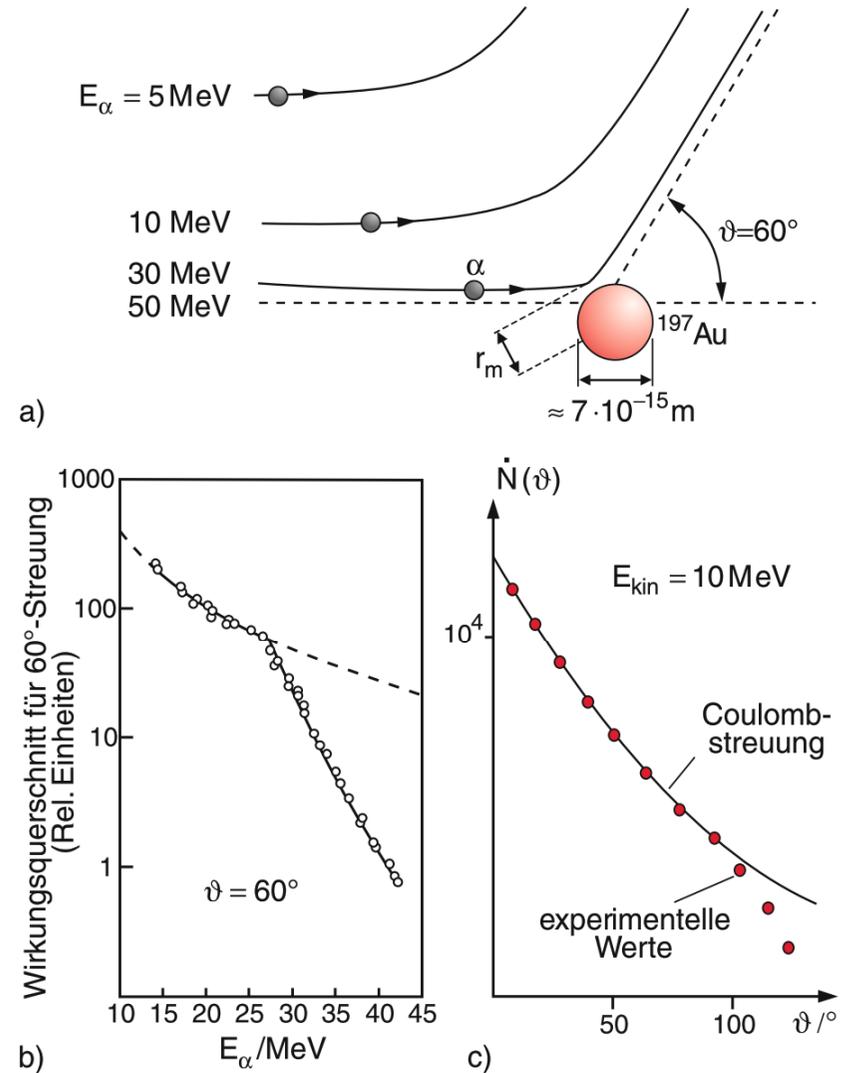


Abb. 2.92. (a) Bahn von an einem Goldkern gestreuten Teilchen für $\vartheta = 60^\circ$ und verschiedene Teilchenenergien; (b) Abweichung vom Coulombstreuquerschnitt für $\vartheta = 60^\circ$ bei höheren Energien E_{kin} ; (c) Abweichung bei fester Teilchenenergie für $\vartheta > 100^\circ$