

2. Das Atom (siehe Kapitel 2& 3 in Haken & Wolf)

Atom: kleinster unveränderbarer Bestandteil eines chemischen Elements ($\alpha\tau\omicron\mu\omicron\sigma$ = unteilbar)
Charakteristische Eigenschaften von Atomen: Masse, Volumen, Ladung

2.1. Geschichte

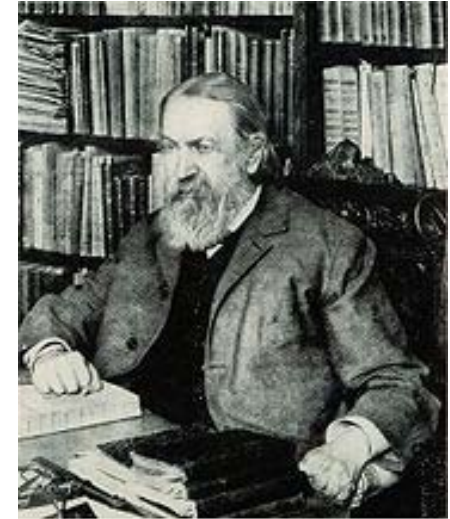
erst im Laufe des 19. Jahrhunderts Existenz der Atome durch Experiment und Theorie bestätigt (Erklärung makroskopischer Phänomene durch mikroskopische Struktur der Materie)

Ernst Mach (1838-1916) *„Ham se welche g'sehn?“*
(Haben Sie schon welche gesehen?)

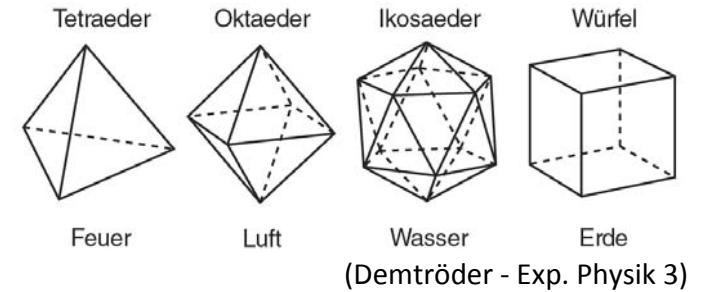
(Standardantwort Machs auf die Frage nach der Existenz von Atomen)

„Die Atomtheorie hat in der Physik eine ähnliche Funktion, wie gewisse mathematische Hülfsvorstellungen, sie ist ein mathematisches Modell zur Darstellung von Thatsachen.“ (Mach, Die Mechanik in ihrer Entwicklung, 1904, 532 f)

- *Leukipp & Demokrit* (ca. 400 v. Chr.): alle Naturkörper bestehen aus *unendlich kleinen*, gänzlich unteilbaren, verschiedenartigen Partikeln, den Atomen.



- *Platon* (427-347 v. Chr): Platonische Körper als Grundbausteine der Materie

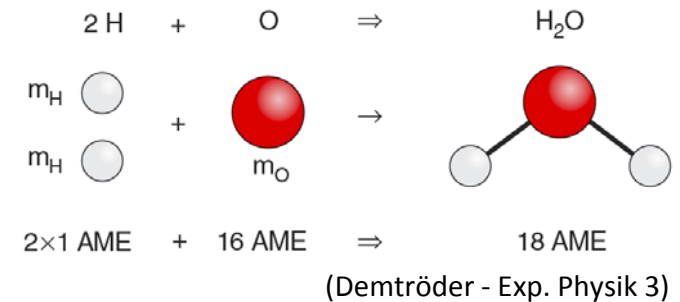


- *Aristoteles* (384-322 v. Chr): lehnte Atome ab

- *Nikolaus von Autrecourt*: 1348 von kath. Kirche zur Aufgabe seiner Atomtheorie gezwungen (zu materialistische Hypothese)

- *John Dalton* (1766-1844): quantitative Analyse von Mengenverhältnissen chemischer Verbindungen („**Gesetz der konstanten Proportionen**“)

Atome als einfachste Erklärung, dass das Massenverhältnis der Stoffe, aus denen sich eine chemische Verbindung bildet, für jede Verbindung konstant und eindeutig bestimmt ist.



- kinetische Gastheorie (*Clausius* (1822-1888), *Maxwell* (1831-1879), *Boltzmann* (1844-1906))

Erklärung makroskopischer Eigenschaften der Gase (Druck, Temperatur) durch mikroskopische, atomistische Theorie

- *Avogadro* (1776-1856):
 - Molekülbegriff (Molekül besteht aus zwei oder mehr Atomen)
 - Hypothese: Bei gleicher Temperatur und gleichem Volumen enthalten verschiedene Gase die gleiche Anzahl von Molekülen



2.2 Atommasse

expt. Befund: Alle Atome haben Massen ungefähr einem vielfachen der Masse des Wasserstoff Atoms.

Stickstoff $A_{rel}(N) \approx 14$

$$A_{rel} = \frac{m}{m_H}$$

Sauerstoff $A_{rel}(O) \approx 16$

Anhaltspunkte: chemische Reaktionen, Elektrolyse, etc.

atomare Masseneinheit: Definition: $1 u = 1/12 m(^{12}_6C) = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Energieäquivalent: $1 u = 931 \text{ MeV}/c^2$

Avogadro: Ein **Mol** eines Stoffes entspricht der durch das relative Atomgewicht gegebenen Masse.

1 Mol Kohlenstoff ^{12}C wiegt 12 gr

Avogadro Konstante (auch Loschmidt Zahl): Zahl der Atome in einem Mol einer Substanz
 $N_A = 6.02 \cdot 10^{23}$

absolute Atommasse: $m(A) = \frac{1 \text{ Mol}(A)}{N_A}$

Massezahl A: Zahl der Kernteilchen (Neutronen+Protonen) bzw. die der relativen Atommasse A_{rel} nächstgelegene ganze Zahl

A ← Massezahl
Z Element
↑ Kernladungszahl

2.3 Experimentelle Bestimmung der Avogadro-Konstanten N_A :

Allgemeine Gaskonstante R

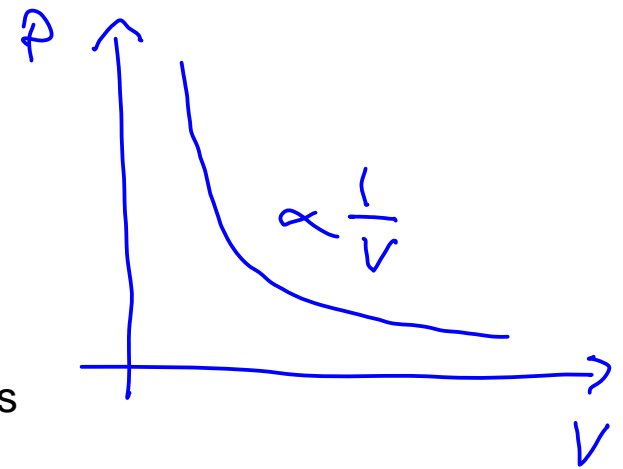
Boltzmann Konstante $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

Experimentelle Bestimmung von R aus Druck-Volumen (P - V) Diagramm eines idealen Gases bei fester Temperatur T .

Zustandsgleichung für ideale Gase

$$k_B = \frac{R}{N_A}$$

$$pV = nRT$$



Experimentelle Bestimmung von k_B :

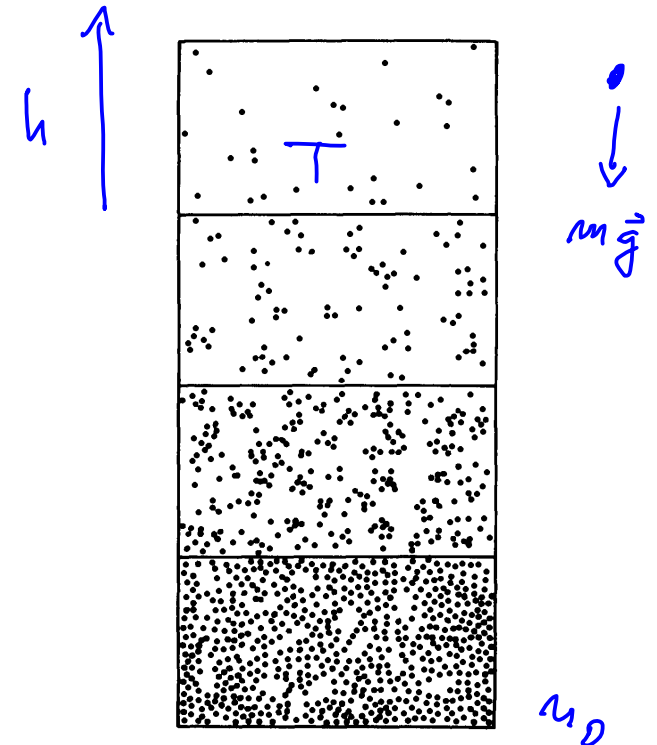
Dichteverteilung in einer Suspension kleiner Schwebeteilchen unter gleichzeitige Wirkung von

- Gravitation
- Brown'sche Molekularbewegung

Teilchendichte n_h bei Höhe h

$$n_h = n_0 e^{-\frac{mgh}{k_B T}}$$

Spezialfall der Boltzmann-Verteilung



2.3 Methoden zur Abbildung einzelner Atome

Optische Abbildung: Kann man einzelne Atome 'sehen' ?

Auflösungsvermögen: Kleinster Abstand d zweier Strukturen die noch als getrennt abgebildet werden können.

optisches Mikroskop bei Wellenlänge ($\lambda \sim 400 - 800 \text{ nm}$) mit Brechungsindex ($n \sim 1$ in Luft) und Abbildungswinkel ($\sin(\alpha) \sim 1$):

$$d \sim \frac{\lambda}{n \sin \alpha}$$

siehe z.B. Hecht-Zajac: Optics

Auflösungsgrenze $d \sim 500 \text{ nm}$, vgl. Atomabstand im Kristall $\sim 0.3 \text{ nm}$

- aber z.B. optische Abbildung eines einzelnen Ions in einer elektromagnetischen Falle ($d \sim 500 \text{ nm}$)

Moderne Methoden: ○ Röntgenstrahlung

- TEM: Transmissions-Elektronenmikroskop ($d \sim 0.2 \text{ nm}$)
- Raster-Tunnelmikroskop, STM: Scanning Tunneling Microscope ($d \sim 0.1 \text{ nm}$)
- Raster-Kraftmikroskop, AFM: Atomic Force Microscope ($d \sim 0.1 \text{ nm}$)

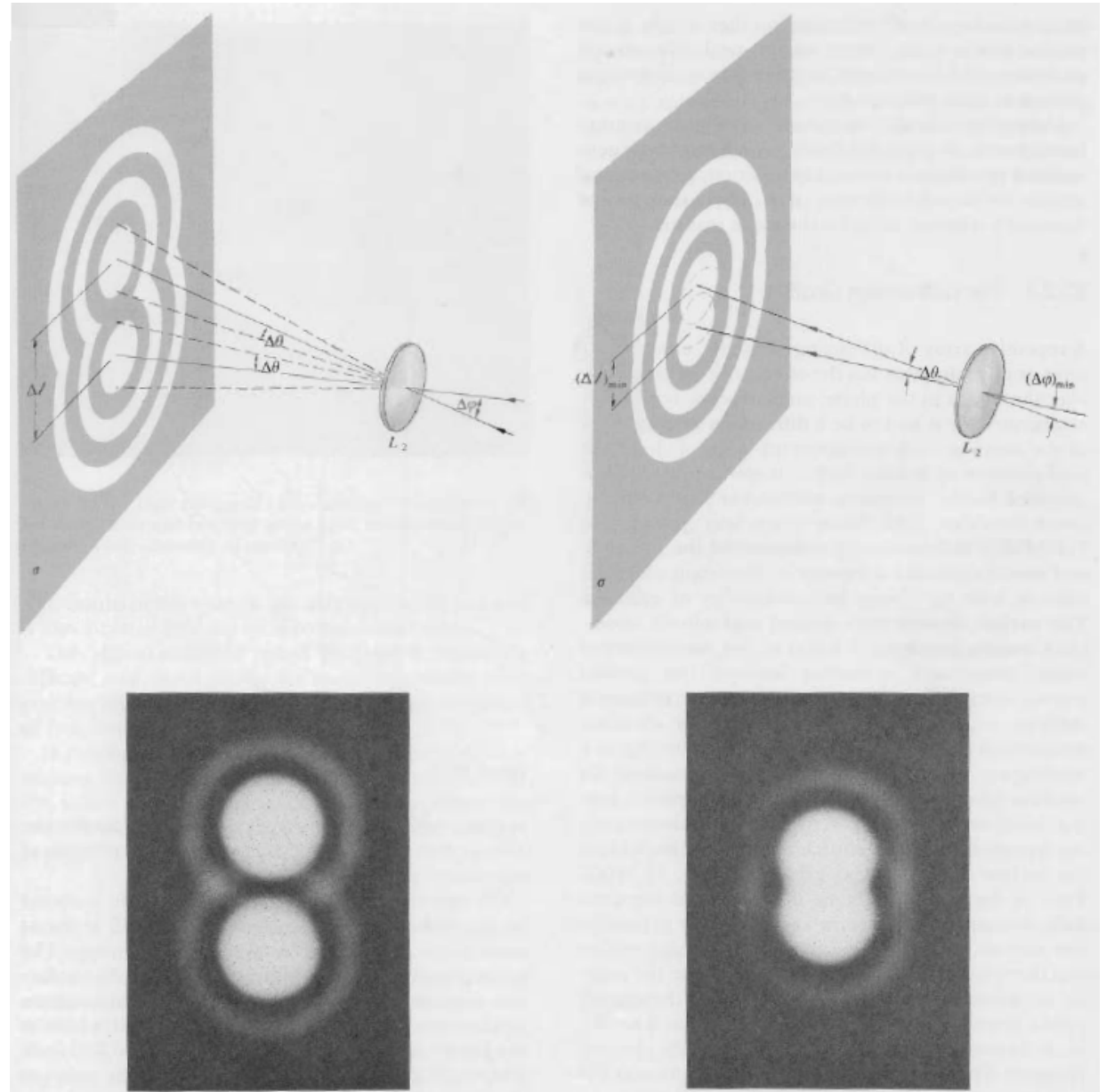
2.3.1. Optisches Auflösungsvermögen:

- Abbildung zweier Punktquellen im Winkelabstand $\Delta\varphi$ führt zu zwei überlappenden Beugungsmustern mit der Winkelbreite $\Delta\theta$ des ersten Beugungsmaximums.
- Das Auflösungsvermögen ist als der Winkelabstand der beiden Punktquellen definiert, bei dem das Maximum des Beugungsmusters der ersten Quelle in das erste Minimum des Musters der zweiten Quelle fällt.

$$\Delta\varphi_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

D : Durchmesser der Linse
(oder der Blende)

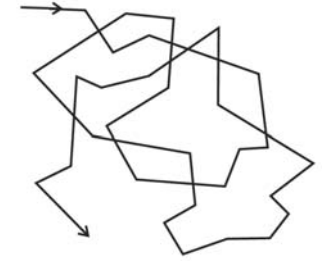
λ : Wellenlänge des Lichts



2.3.2. Indirekter Nachweis von Atomen

▪ Brownsche Molekularbewegung:

- von Botaniker *Robert Brown* 1827 entdeckte unregelmässige Zitterbewegung von Teilchen in einer Flüssigkeit
- -> Atome werden indirekt über ihren Einfluss auf die Bewegung der sichtbaren Mikropartikel beobachtet
- **quantitative Erklärung durch A. Einstein und Marian Smoluchowski (1905):**
zufällige Stösse der Mikropartikel mit Atomen führt zu charakteristischem Diffusionsprozess, wobei die mittlere quadratische Abweichung der Teilchen von ihrer ursprünglichen Lage proportional zur Wurzel der Zeitspanne ist

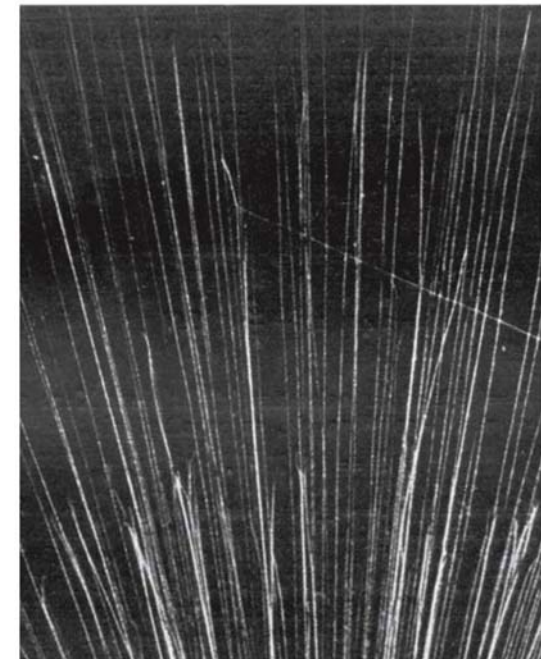


smoke-6.3x-
dfl-xvid

„The agreement of these consideration [on Brownian motion] with experience together with Planck's determination of the true molecular size from the law of radiation [...] convinced the sceptics, who were quite numerous at that time (Ostwald, Mach) of the reality of atoms.“
(Einstein, Autobiographical Notes)

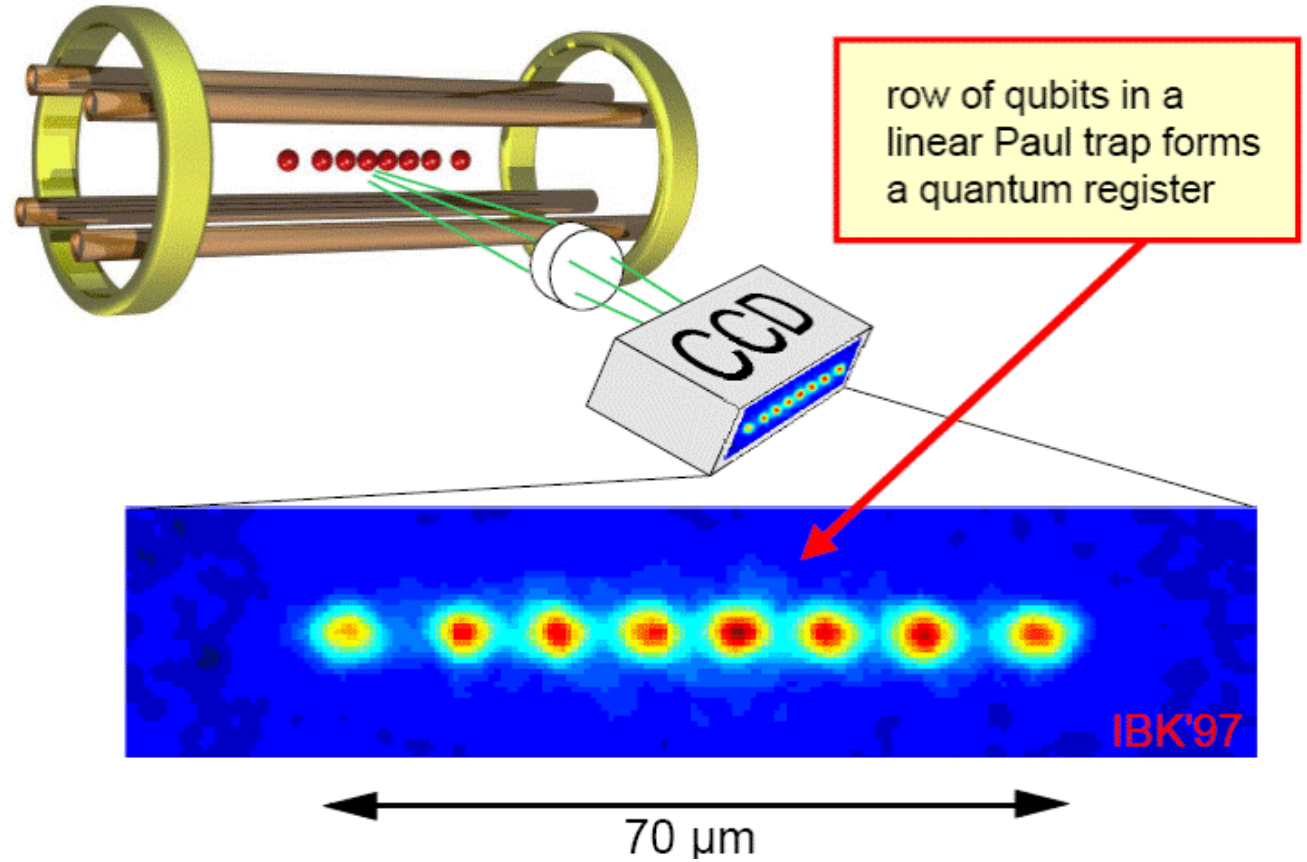
▪ Nebelkammer

- entwickelt von *Charles Th. Wilson* (1911)
- durch Ionisation des Füllgases können Trajektorien einzelner Atome, Ionen oder Elektronen sichtbar gemacht werden



2.3.3. Abbildungstechniken mit atomarer Auflösung: Ionenfalle

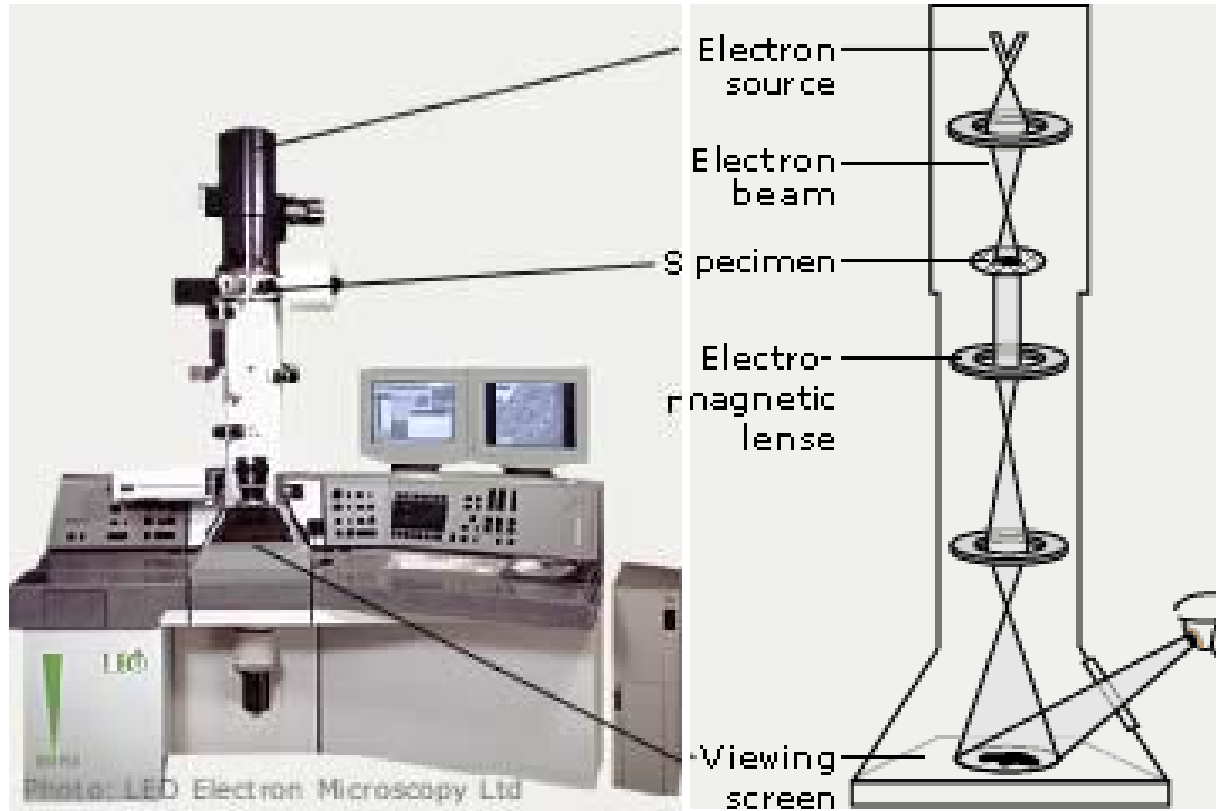
Positiv geladene Ionen in elektromagnetischer Falle:



optische Abbildung mit Laser-Licht:

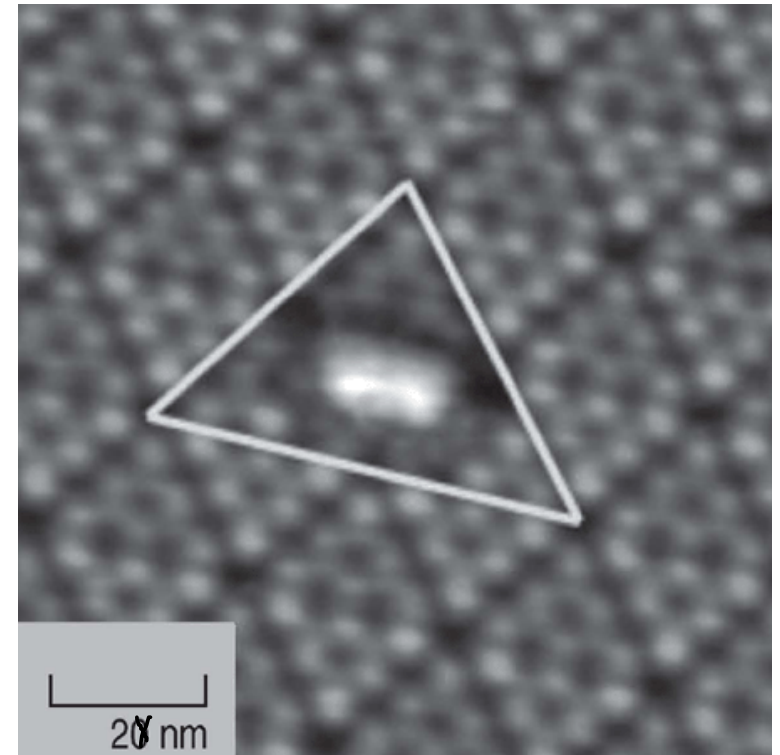
- Abbildung einzelner aber weit voneinander entfernter Ionen.
- Auflösung optisch begrenzt.

2.3.4. Beispiel Abbildungstechniken mit atomarer Auflösung: Transmissions-Elektronenmikroskop



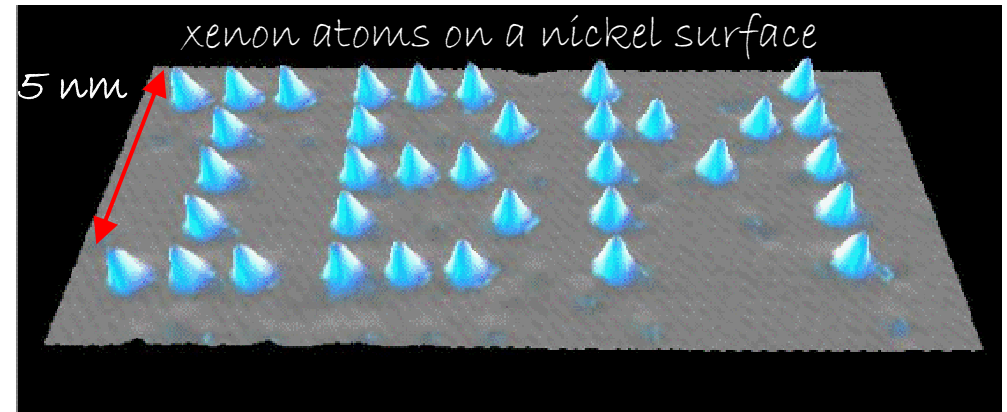
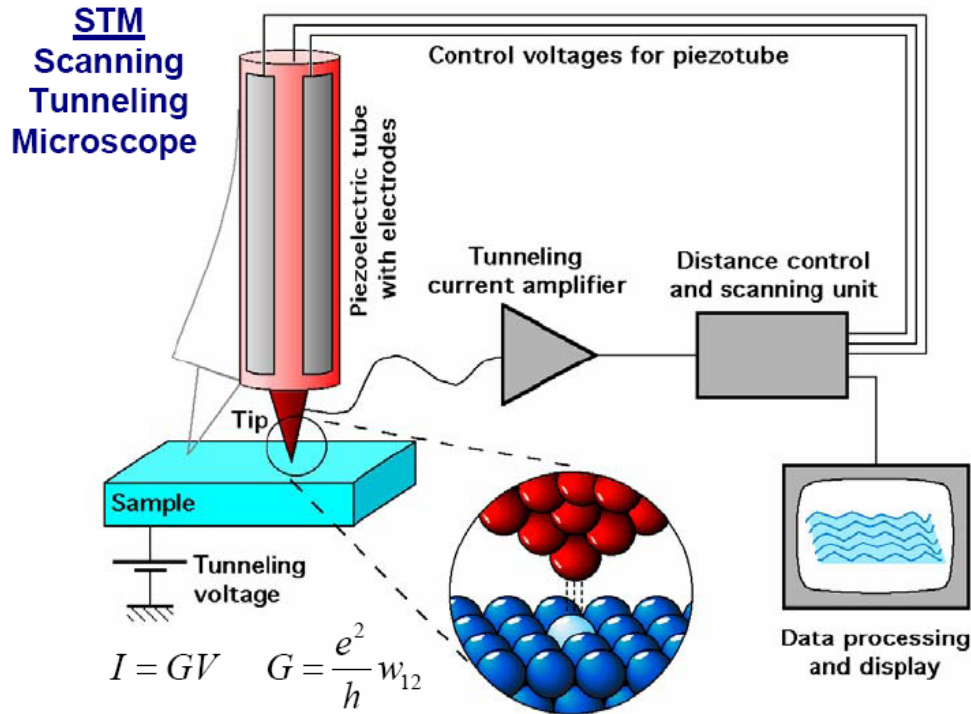
TEM-Apparatur

Funktionsprinzip

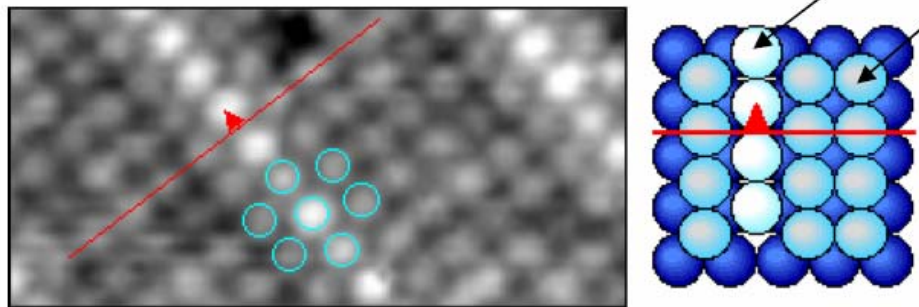
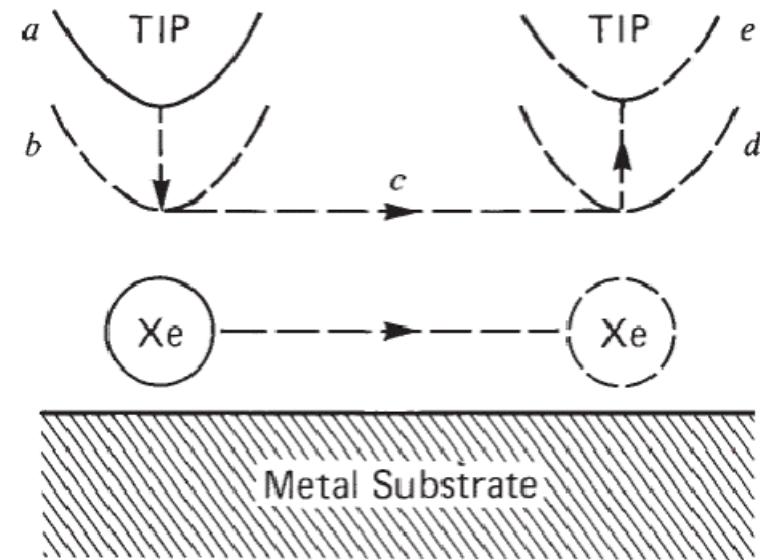


Einzellage Ti Atome auf Si(111)

Scanning Tunneling Microscope (STM)



moving individual atoms around one by one



D.M. Eigler, E.K. Schweizer. Positioning single atoms with a STM. *Nature* 344, 524-526 (1990)

2.4 Bestimmung der Atommasse mittels Massenspektroskopie

Parabelmethode: Räumliche Trennung von geladenen Teilchen mit verschiedenem Massen zu Ladungsverhältnis q/m in parallel ausgerichteten elektrischen E und magnetischen Feldern B

nach Thomson (1913):

Lorentzkraft:
$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

elektrische Wechselwirkung:
$$m \ddot{y} = q E$$

magnetische Wechselwirkung:
$$m \ddot{x} = q v B$$

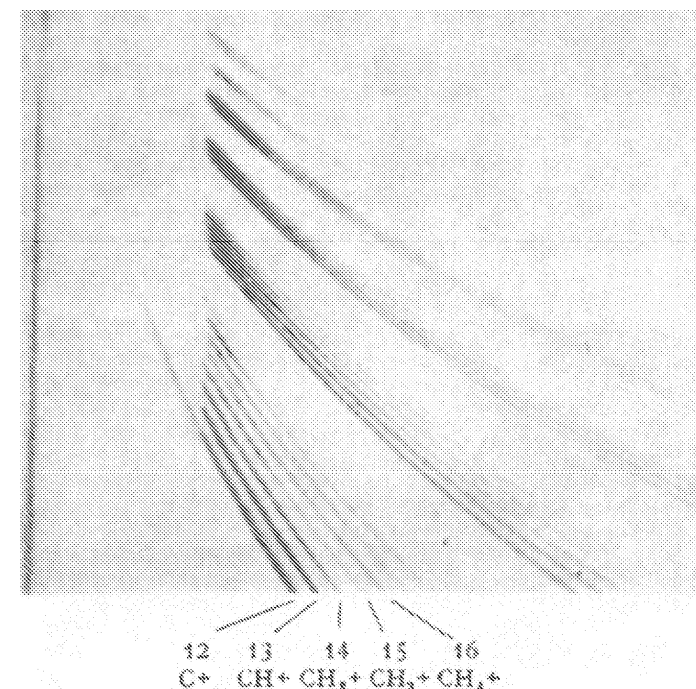
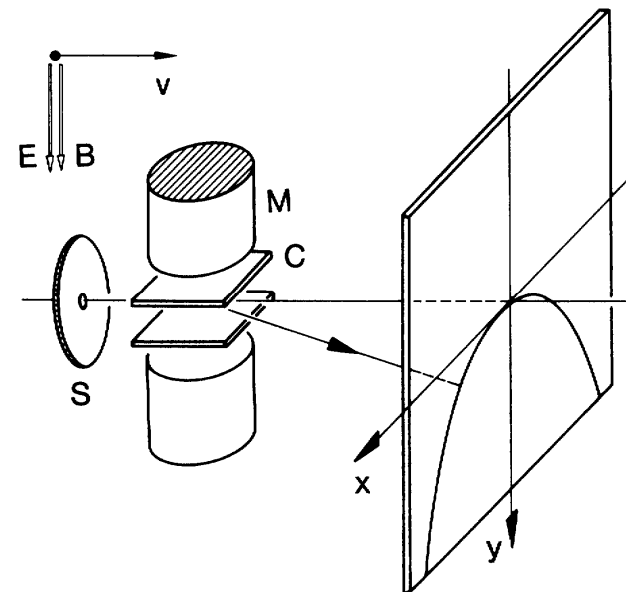
in Näherung für grosse Zyklotronradien:
$$r \approx \frac{m v}{q B}$$

Parabelform:
$$y = \frac{2 E}{L^2 B^2} \frac{m}{q} x^2$$

bekannte Groessen

Massen zu Ladungsverhältnis

Beispiel: Trennung verschiedener Kohlenwasserstoff-Ionen



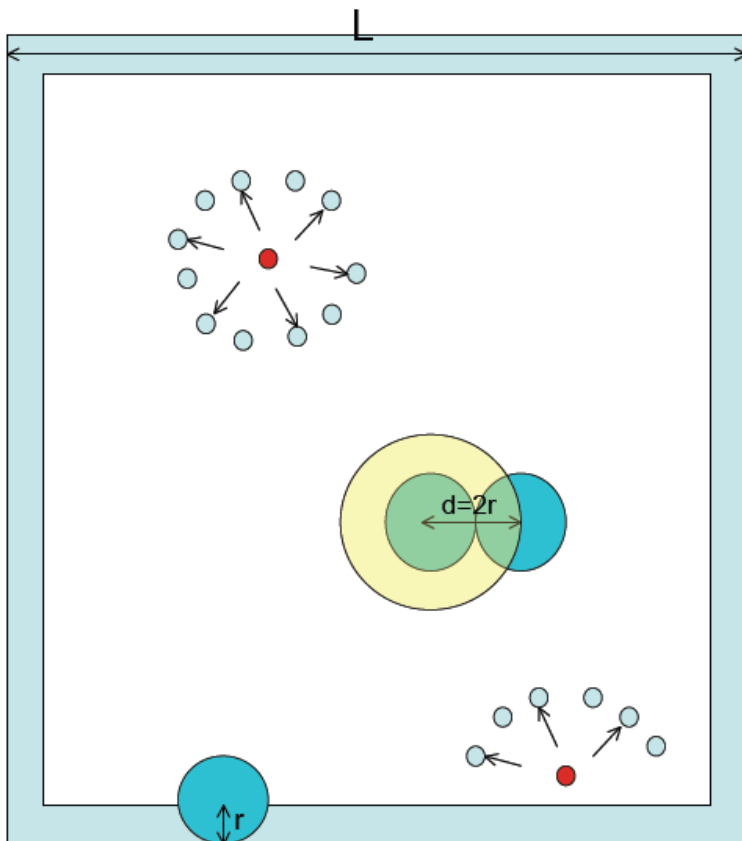
2.5 Experimentelle Bestimmung der Grösse von Atomen

2.5.1 Atomgrössen aus Kovolumen

Van der Waals Gleichung für reale Gase

Eigenvolumen b der Atome:

$$b = 4 \frac{4\pi}{3} r^3 N_A$$



$$\left(p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = nRT$$

Binnendruck Eigenvolumen

p-V Diagramm eines realen Gases:

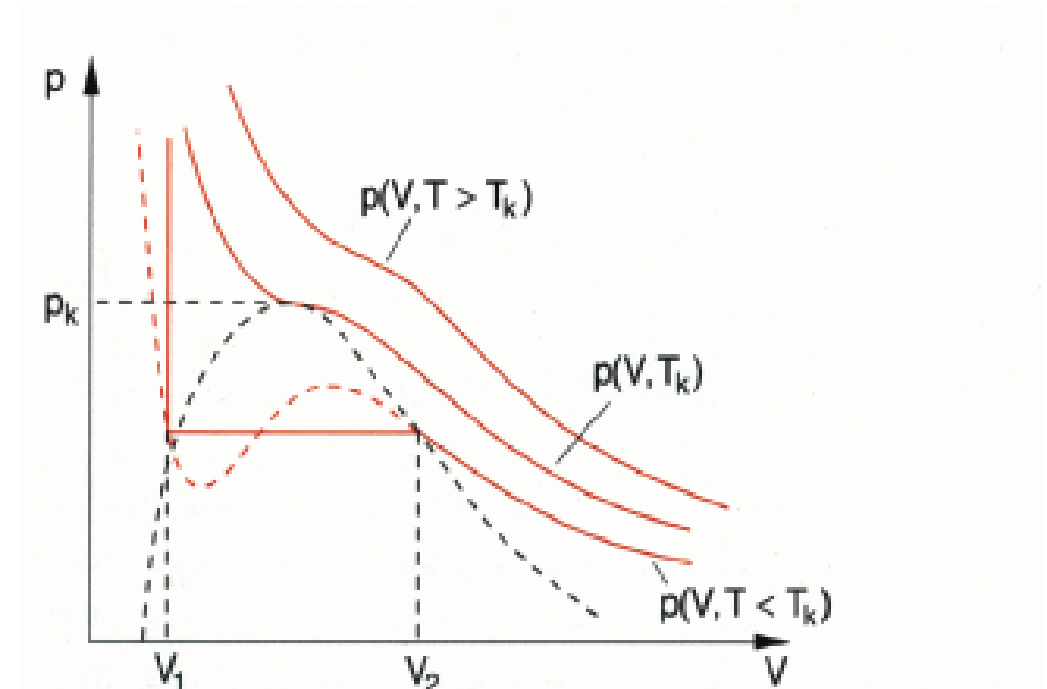
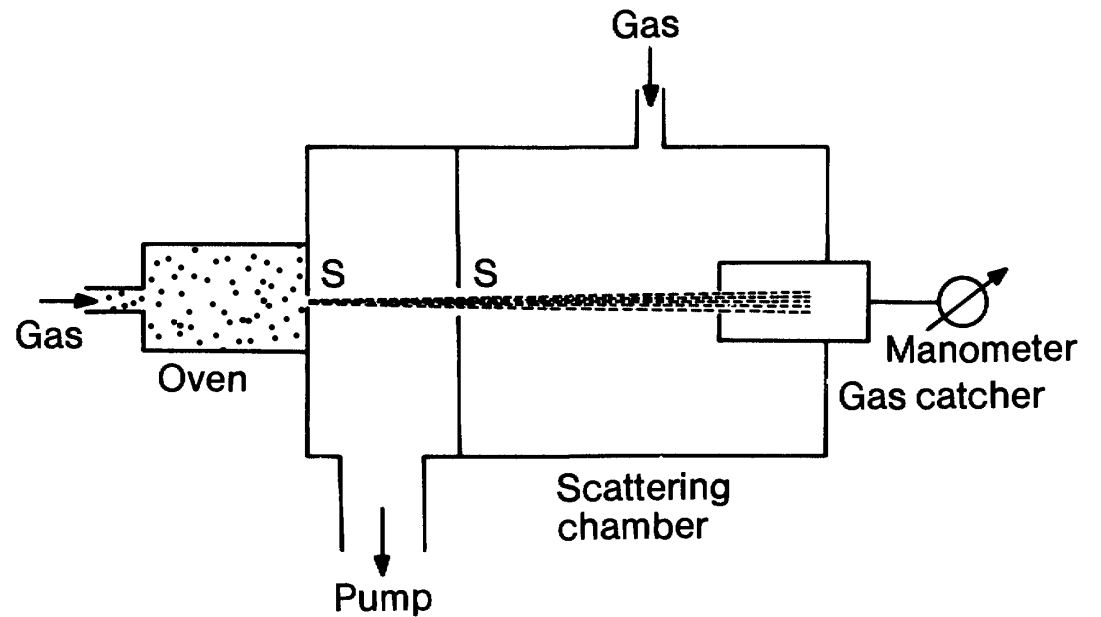


Abb. 10.70. Verlauf der van-der-Waals-Isothermen $p(V)$ in der Umgebung des kritischen Punktes (p_k, T_k)

2.5.2 Streuexperimente

Streuung von Atomen an Atomen.

Messaufbau: Atome aus einer mit Blenden kollimierten Quelle von Atomen streuen an kalten Atomen in einer Streukammer. Die nicht oder unwesentlich abgelenkten Atome werden in einem Detektor detektiert.



2.4.3 Der Wirkungsquerschnitt

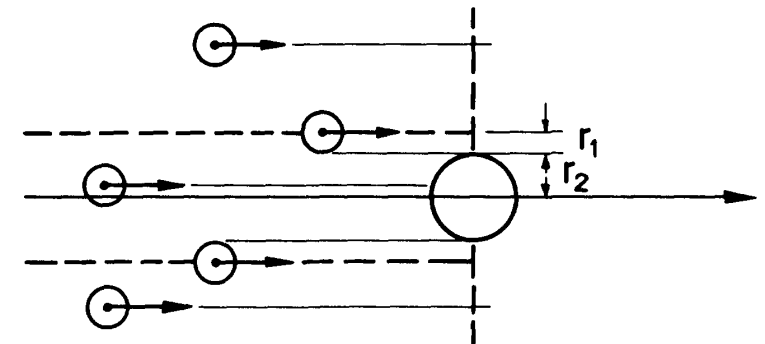
Die Stosswahrscheinlichkeit zweier Atome hängt von Ihrer Grösse ab.

Streuproblem: Ein Teilchenstrahl mit Dichte N_0 Strahlquerschnitt A und Teilchenradius R trifft auf eine dünne Schicht der Dicke Δx von Atomen mit Radius r und Dichte n .

Wie viele Teilchen aus dem Strahl stossen mit Teilchen in der Folie zusammen? Welcher Anteil der Atome aus dem Strahl können die Schicht nicht ungestört durchdringen?

Stossfläche σ :

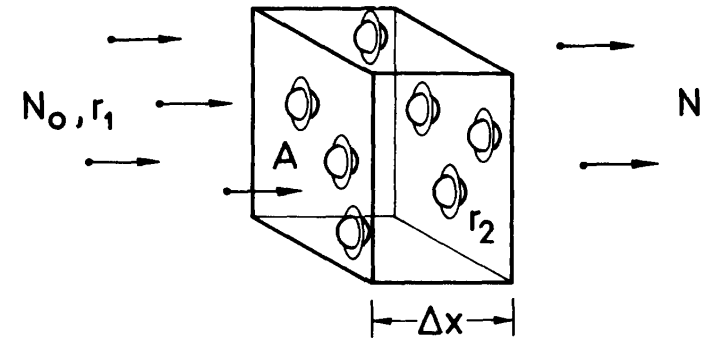
$$\sigma = \pi (r + R)^2$$



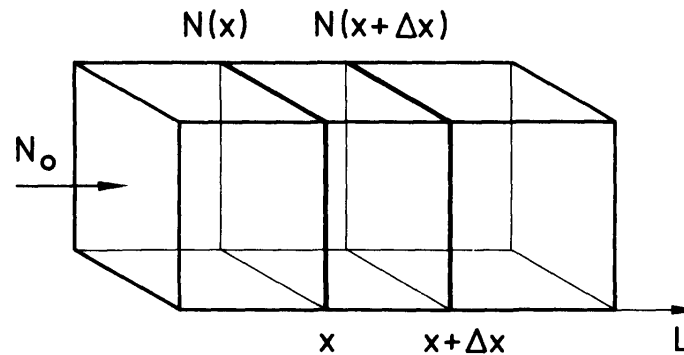
Stosswahrscheinlichkeit W :

$$W = \frac{\sum_i \sigma_i}{A}$$

Gesamtfläche A



Streuung an einer dicken Schicht:



Anteil der gestreuten Teilchen:

$$\frac{dN}{N} = -n\sigma dx$$

Zahl der gestreuten Teilchen:

$$N_0 (1 - e^{-n\sigma L})$$

mikroskopischer Streuquerschnitt σ
und makroskopischer Streukoeffizient α :

$$\alpha = n \sigma$$

Mittlere freie Weglänge λ : die Strecke nach der nur noch $1/e$ ($\sim 37\%$) der Teilchen nicht gestreut worden sind.

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{e} = e^{-n \sigma \lambda}$$

$$\lambda = \frac{1}{n \sigma}$$

Bestimmung des Atomradius r aus Messung freier Weglänge λ für Streuung von Atomen der selben Spezies.

$$\lambda = \frac{1}{n 4\pi r^2} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{1}{n 4\pi \lambda}}$$

Der Wirkungsquerschnitt ist ein sehr nützlicher Begriff. Mit seiner Hilfe kann man die Stärke der Wechselwirkung zwischen verschiedenen Objekten (z.B. Atomen, Elektronen, Photonen) beschreiben.

Beersches Gesetz

Dämpfung der Intensität eines einfallenden Lichtstrahls in Abhängigkeit von der Dicke der durchlaufenen Schicht eines Gases von Atomen oder Molekülen.

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

