

2. Das Atom

Atom: kleinster unveränderbarer Bestandteil eines chemischen Elements

Charakteristische Eigenschaften von Atomen: Masse, Volumen, Ladung

2.1 Bestimmung der Atommasse

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

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

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

Anhaltspunkte: chemische Reaktionen, Elektrolyse, etc.

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

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

Avogadro: Ein **Mol** eines Stoffes enthält genau so viele Gramm wie das relative Atomgewicht angibt.

1 Mol Kohlenstoff ^{12}C wiegt 12 gr

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

2.2 Experimentelle Bestimmung der Avogadro-Konstanten N_A :

Allgemeine Gaskonstante R

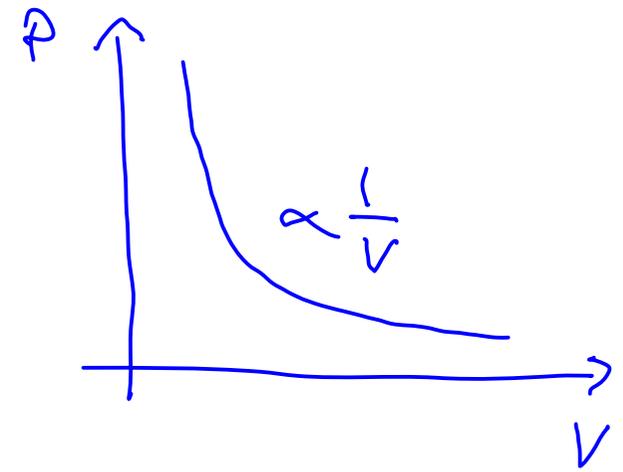
Boltzmann Konstante $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

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

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

Zustandsgleichung für ideale Gase

$$pV = nRT$$



Experimentelle Bestimmung von k_B :

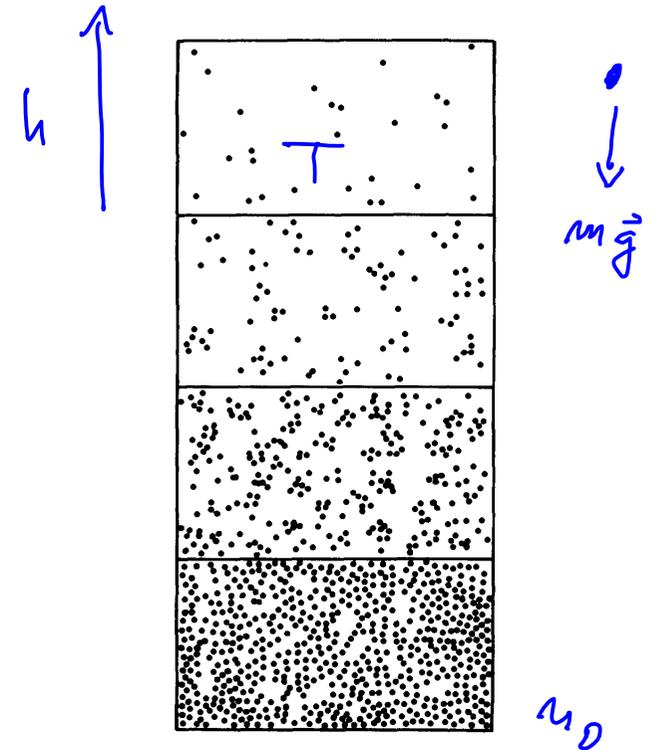
Dichteverteilung in einer Suspension kleiner Schwebeteilchen unter gleichzeitige Wirkung von

- Gravitation
- Brown'sche Molekularbewegung

Teilchendichte n_h bei Höhe h

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

Spezialfall der Boltzmann-Verteilung (siehe Übung)



2.3 Methoden zur Bestimmung von Atommassen

2.3.1 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:

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

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

in Näherung für grosse Zyklotronradien:

$$r \approx \frac{m v}{q B}$$

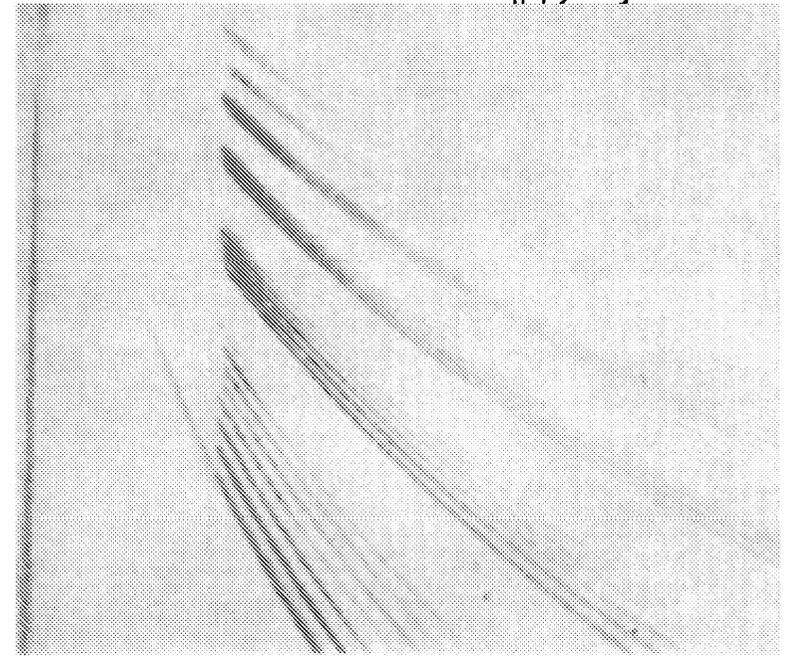
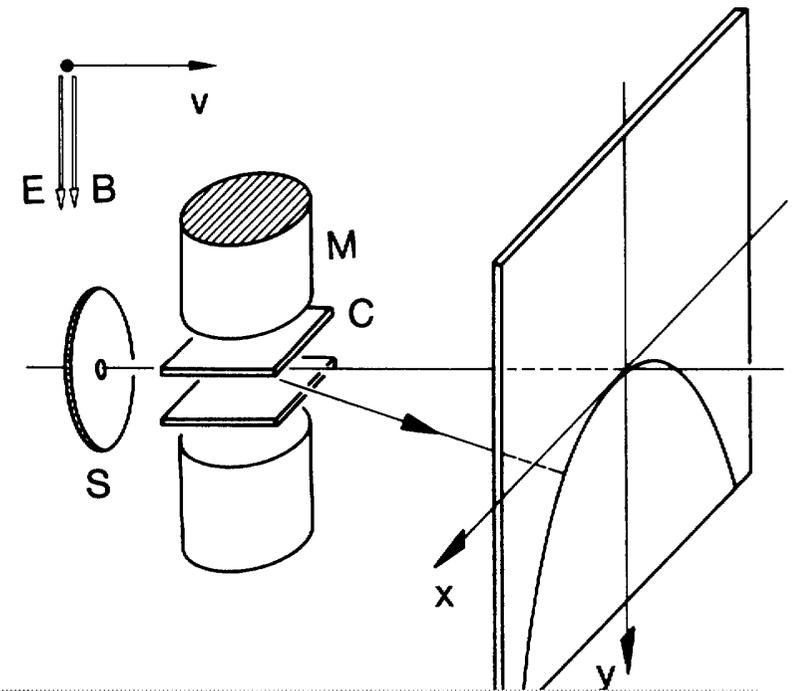
Parabelform:

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

bekannte Groessen

Massen zu Ladungsverhältnis

Beispiel: Trennung verschiedener Kohlenwasserstoff-Ionen



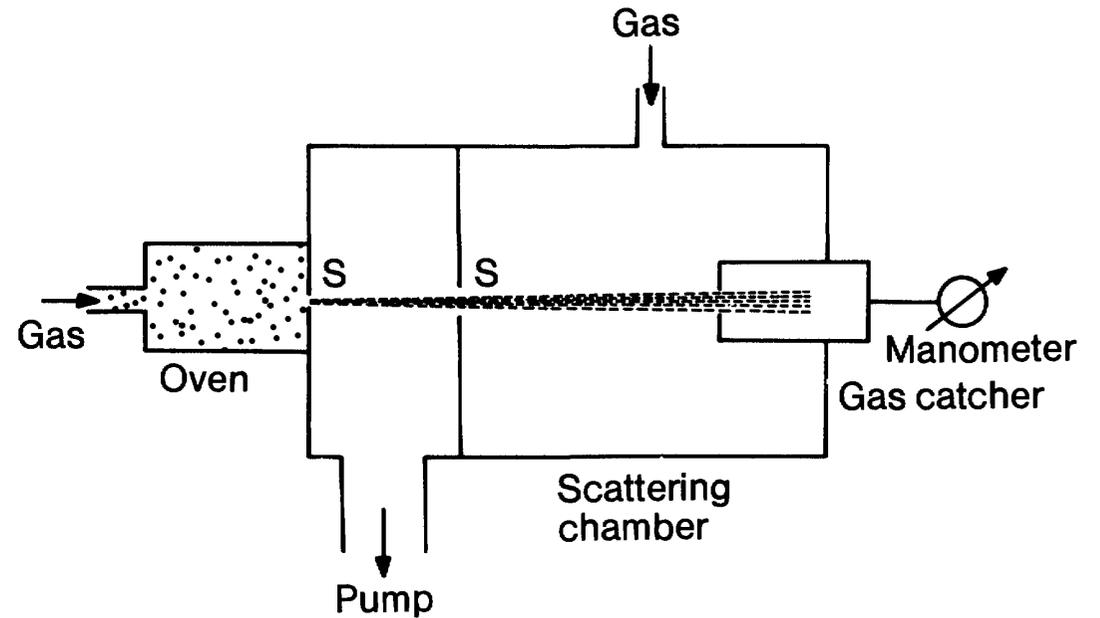
12 C⁺ 13 CH⁺ 14 CH₂⁺ 15 CH₃⁺ 16 CH₄⁺

2.4 Experimentelle Bestimmung der Grösse von Atomen

2.4.1 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.



2.4.2 Der Wirkungsquerschnitt

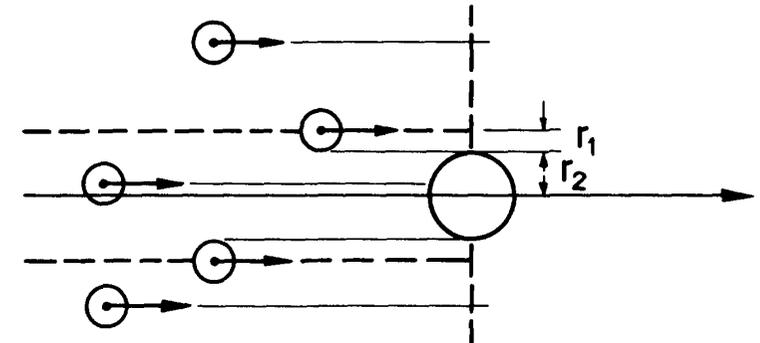
Die Stosswahrscheinlichkeit zweier Atome hängt von Ihrer Grösse ab.

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 :

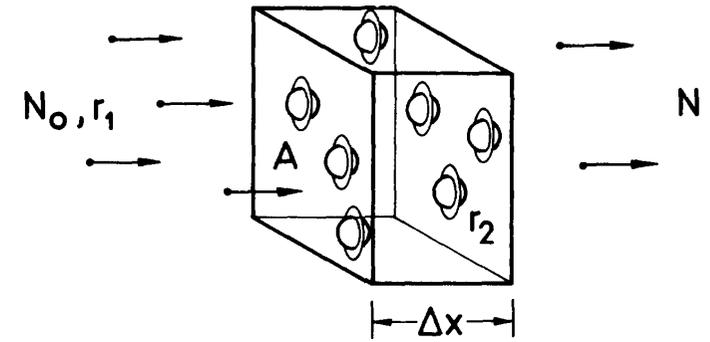
$$\sigma = \pi (r + R)^2$$



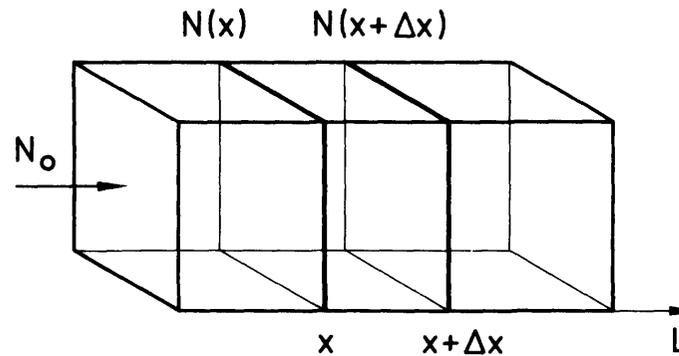
Stosswahrscheinlichkeit W :

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

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.

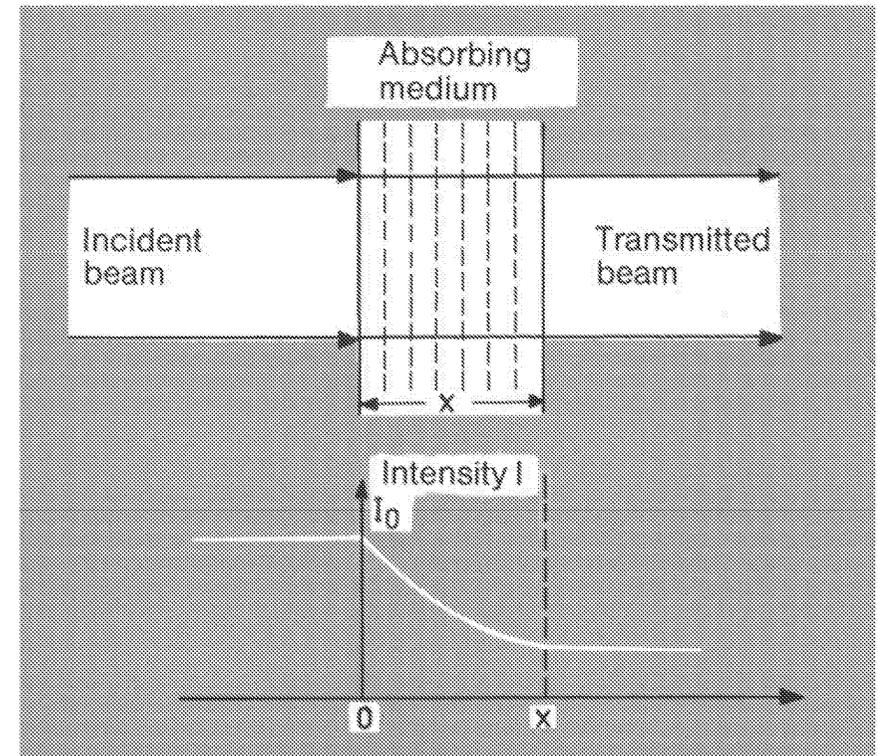
$$\lambda = \frac{1}{n 4\pi r^2} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{1}{n 4\pi \lambda}}$$

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.

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



2.4.3 Atomgrößen aus Kovolumen

Van der Waals Gleichung für reale Gase

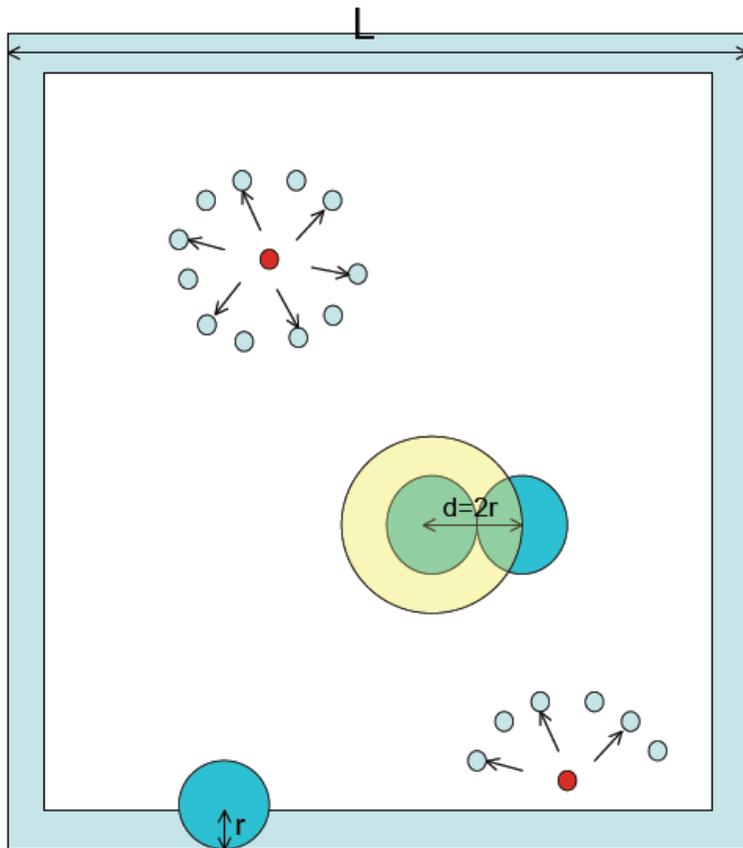
$$\left(p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = nRT$$

Binnendruck

Eigenvolumen

Eigenvolumen b der Atome:

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



p-V Diagramm eines realen Gases:

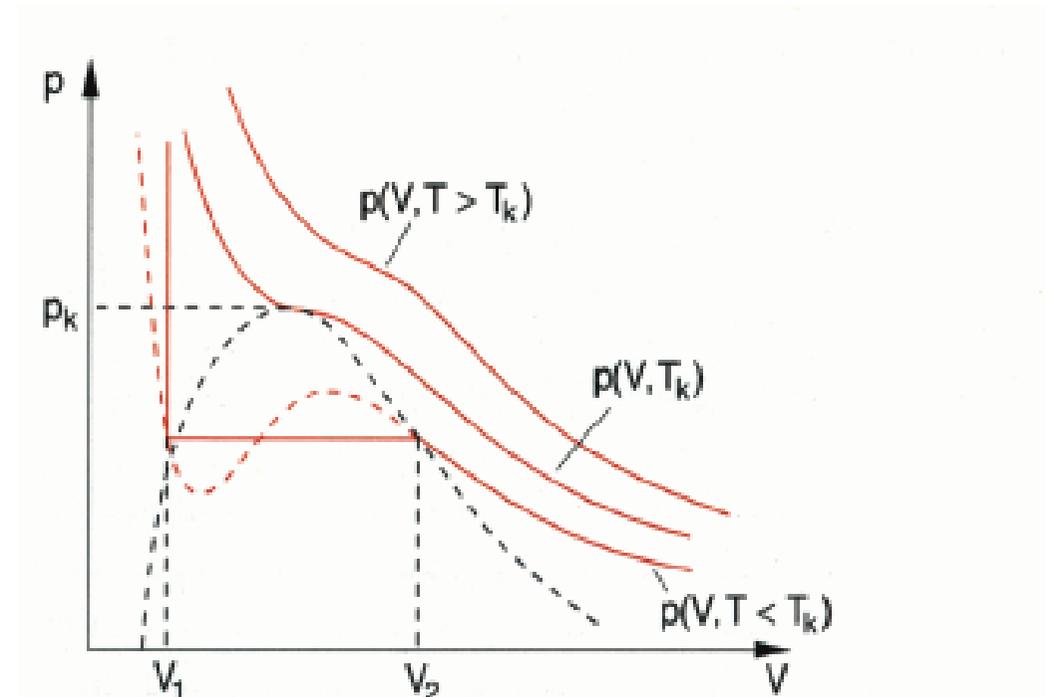


Abb. 10.70. Verlauf der van-der-Waals-Isothermen $p(V)$ in der Umgebung des kritischen Punktes (p_k, T_k)

aus Demtröder, Experimentalphysik 1

2.5 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: ○ Mögliche Themen für Vorträge in der Übungsgruppe.

- 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 ($d \sim 0.1 \text{ nm}$)

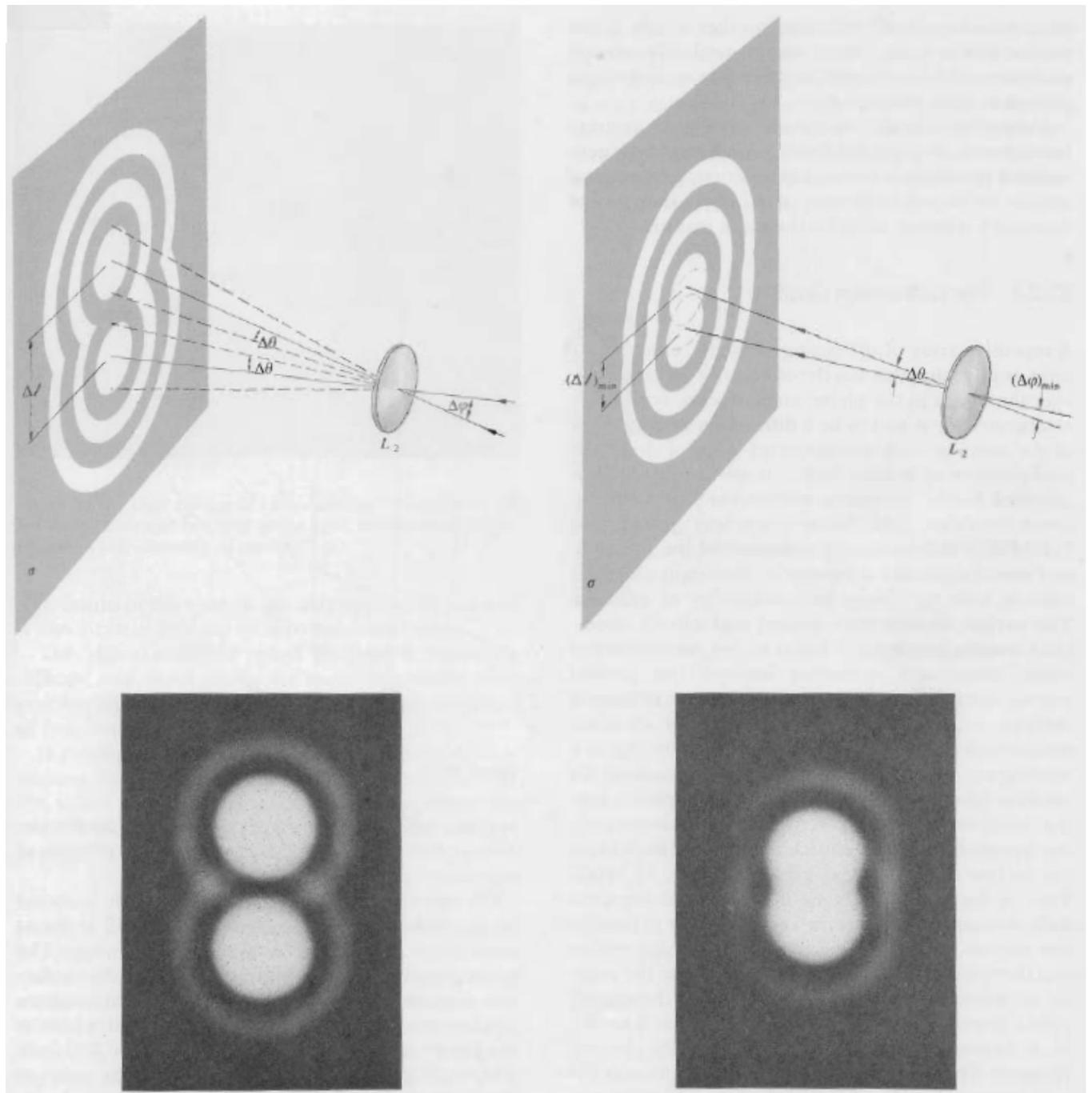
Optisches Auflösungsvermögen:

- 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.

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

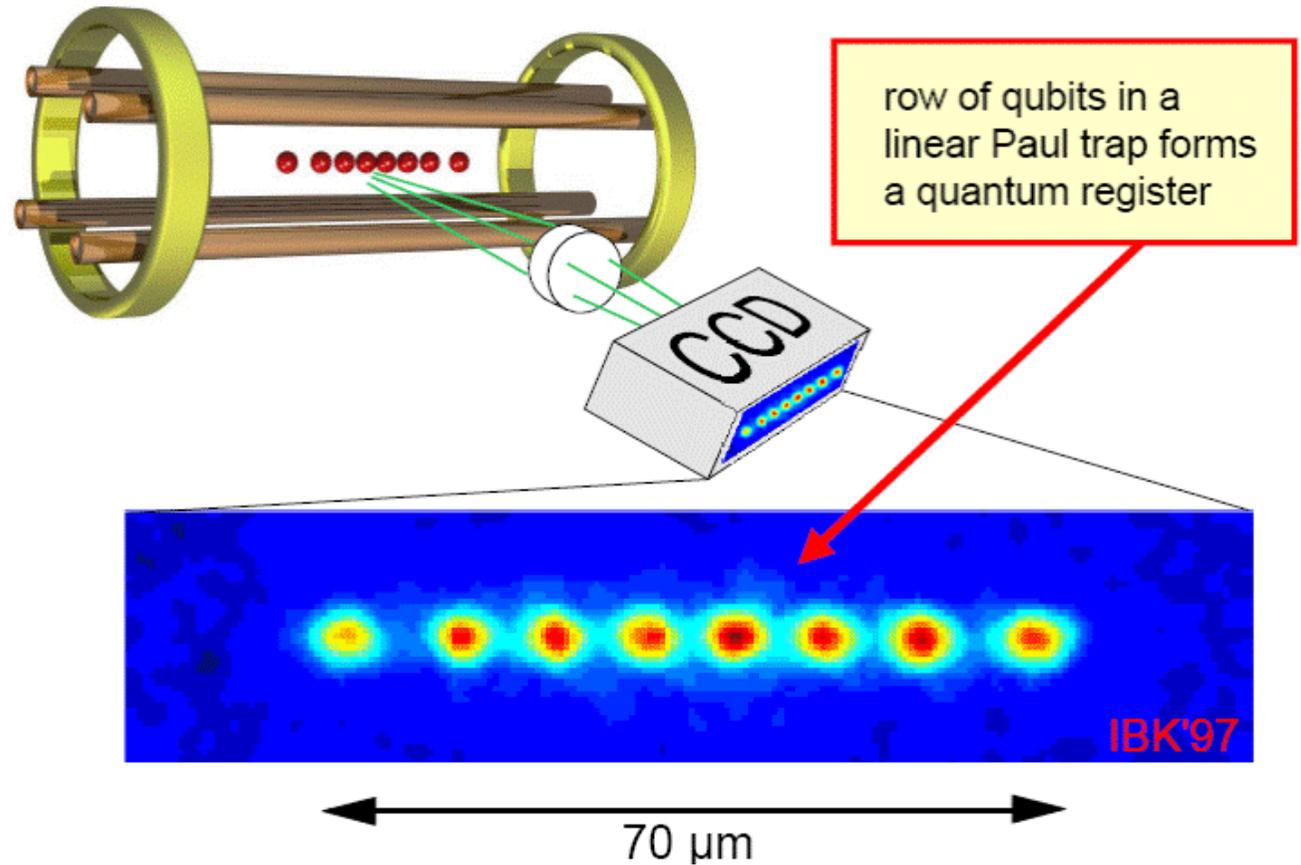
D : Durchmesser der Linse
(oder der Blende)

λ : Wellenlänge des Lichts



Beispiel Abbildungstechniken mit atomarer Auflösung: Ionenfalle

Positiv geladene Ionen in elektromagnetischer Falle:



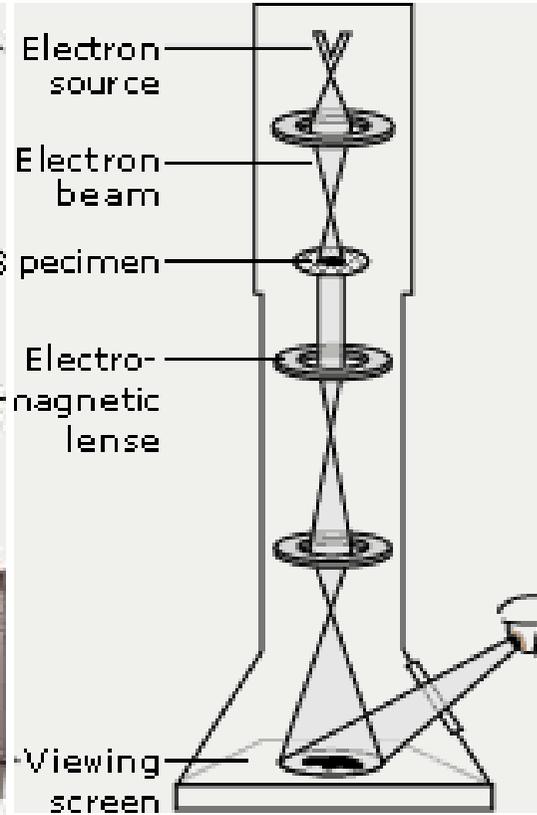
optische Abbildung mit Laser-Licht:

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

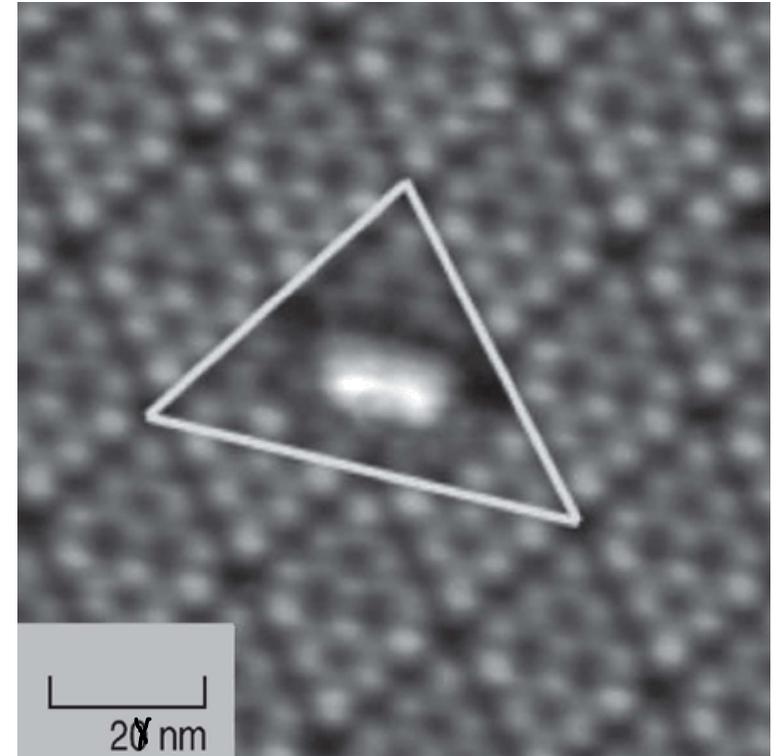
Beispiel Abbildungstechniken mit atomarer Auflösung: Transmissions-Elektronenmikroskop



TEM-Apparatur



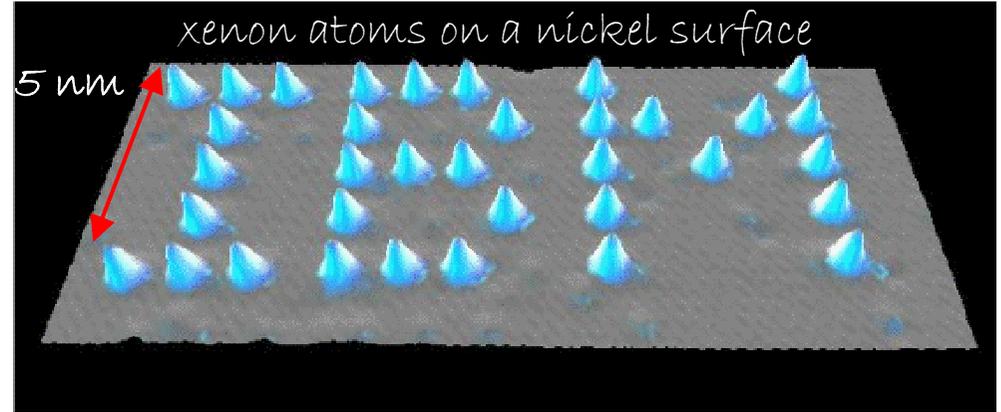
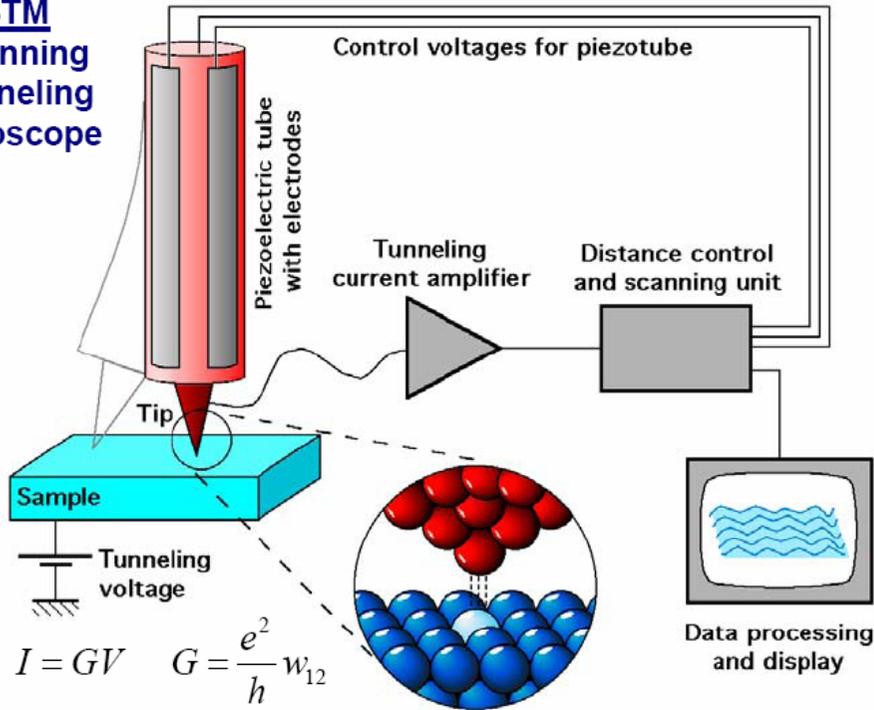
Funktionsprinzip



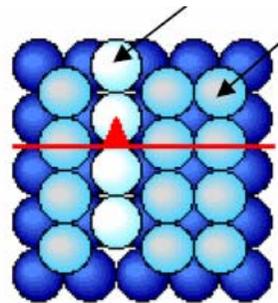
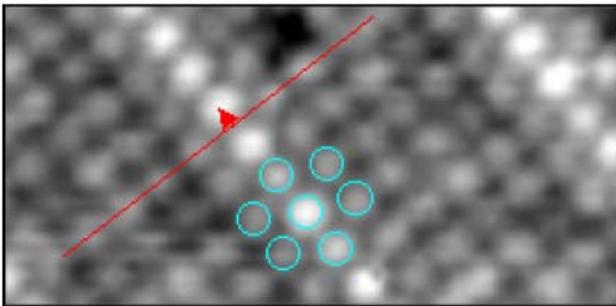
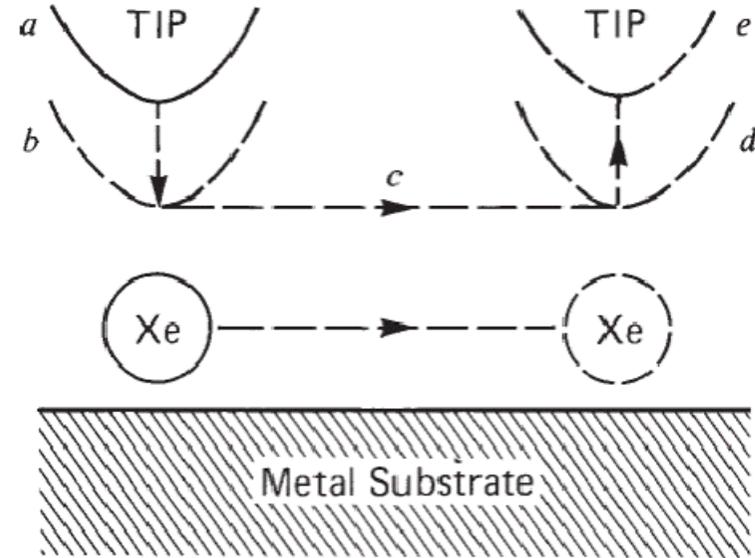
Einzellige Ti Atome auf Si(111)

Scanning Tunneling Microscope (STM)

STM
Scanning
Tunneling
Microscope



moving individual atoms around one by one



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