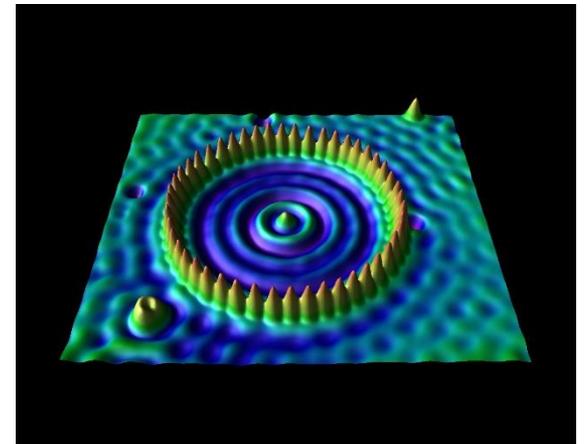
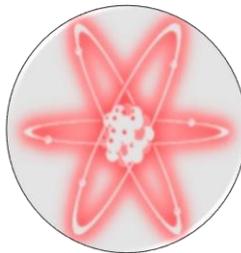
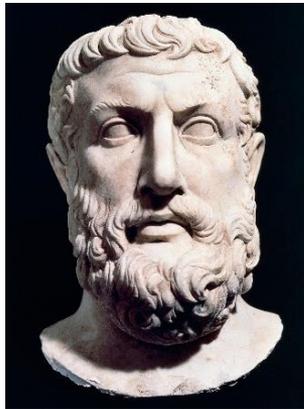


3. Atomphysik

3.1 Einleitung, Experimentelle Grundlagen

Prof. David Hunger

Physikalisches Institut, KIT Fakultät für Physik

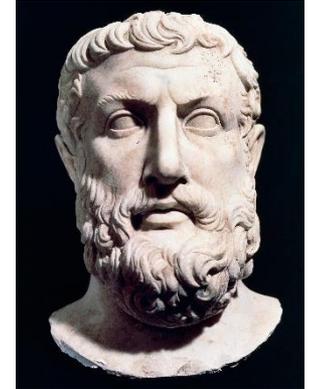


Naturphilosophische Modelle

Parmenides 520 v. Chr

das Seiende ist, das Nicht-Seiende ist nicht

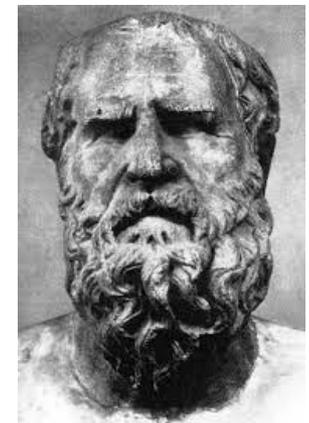
- das Seiende ist vollendet und unveränderlich
- Änderung und Bewegung ist nur Schein und Meinung
- Moderne physikalische Interpretation: 4D Raumzeit



Heraklit 520 v. Chr.

Alles fließt (panta rhei)

- Bewegung ist das eigentliche Sein, fließender Prozess des Werdens



Anaxagoras (499 – 428 v. Chr.)

*von dem Kleinen gibt es kein allerkleinstes,
sondern immer noch ein Kleineres*

Zenon (490 - 430 v. Chr.)

- Unendliche Teilbarkeit führt zu Paradoxien
- Bewegungsparadox – Der Pfeil trifft nie das Ziel

Naturphilosophische Modelle - Atomismus

Leukipp 450 v. Chr.

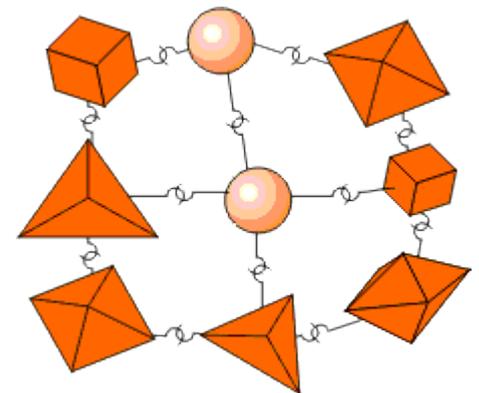
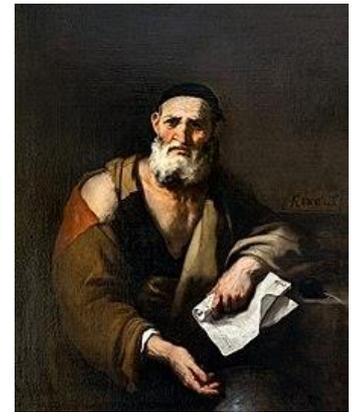
ατομος - unteilbar

- Welt = leerer Raum + Materie
- sonst keine Bewegung möglich
- Umordnung der Atome verursachen Veränderung
- Kausalgesetz: Kein Ding entsteht planlos, sondern aus Sinn und Notwendigkeit

Demokrit (460-370 v. Chr.)

*scheinbar ist Farbe, scheinbar Süßigkeit,
scheinbar Bitterkeit: wirklich nur Atome und Leeres*

- verschiedene Atome (Größe, Gestalt), wechselwirken in Wirbeln
- makroskopische Körper entstehen durch Anordnung von Atomen
- auch Sinneswahrnehmung und die Seele sind atomar
- → atomistischer Materialismus



Experimentelle Befunde

Im Mittelalter häufen sich experimentelle Befunde durch Chemiker

Atome nicht direkt sichtbar – brauche indirekte Methoden

Stoffe können zerkleinert werden und erhalten ihre Eigenschaften

- zerriebener Zucker, Salz
- Lösen fester Stoffe in Flüssigkeit
- Verdampfen
→ Zerteilen ohne Veränderung

Grenzen der Zerteilbarkeit

- Blattgold nur bis ca. 10^{-8} m Schichtdicke stabil
- Seifenhäute und Ölfilme nur bis 10^{-8} – 10^{-10} m Dicke stabil
- Dickenskalen charakteristisch für jew. Stoff

Dalton's Gesetz der konstanten Proportionen

John Dalton (1766 – 1844)

Wägung der Massenverhältnisse von Reaktanden
quantitative Analyse von Synthesen



11,1g Wasserstoff + 88,9g Sauerstoff → 100g Wasser

$$\frac{m(2H)}{m(O)} = \frac{2}{16} = \frac{1}{8} \approx \frac{11,1}{88,9}$$

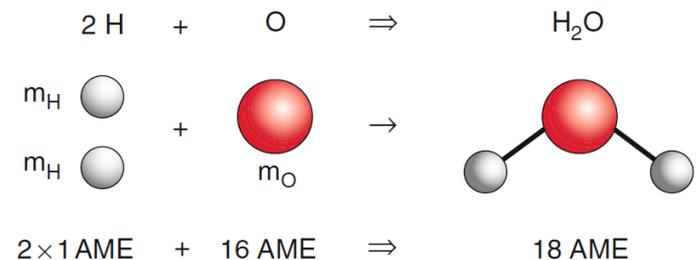
Dalton's Atomhypothese (1808):

Umwandlung = Vereinigung & Trennung von Atomen

1) alle elementaren Stoffe bestehen aus kleinsten Teilchen, die chemisch nicht weiter zerlegbar sind

2) alle Atome des selben Elements sind gleich

3) bei chemischen Verbindungen vereinigen sich Atome in ganzzahligen Mengenverhältnissen



Massenverhältnis AME

$$\text{AME} = \frac{m_x}{m_H}$$

Heute: Bezug auf ^{12}C

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} m(^{12}\text{C}) = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Das Mol & Avogadro-Konstante

- Definition des Mols:

1 mol ist die Stoffmenge die ebenso viele Teilchen enthält wie 12g Kohlenstoff ^{12}C

- Zahl der Moleküle in der Stoffmenge 1 mol heißt Avogadro Konstante (Loschmidt Zahl)

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} / \text{mol}$$

- Avogadro Hypothese: 1 mol beliebigen Gases nimmt bei Normalbedingungen ($p = 1013\text{hPa}$, $T=0^\circ\text{C}$) immer das gleiche Volumen V_M ein

$$V_M = 22.4 \text{ dm}^3 / \text{mol}$$

Experimentelle Bestimmung von N_A

Röntgenbeugung

Bestimme Gitterabstand d im Kristall

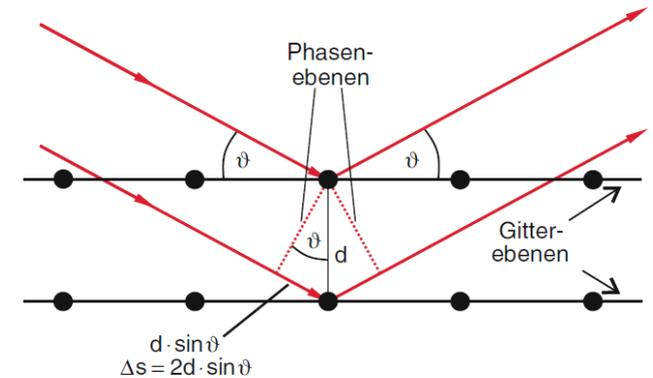
- makroskopischer Würfel mit Kantenlänge D enthält

$$N = \left(\frac{D}{d}\right)^3 \text{ Atome}$$

- daraus folgt $N_A = N \left(\frac{M}{M_K}\right)$ wenn die gewogene Masse des Kristalls M_K und die Molmasse M bekannt ist
- Gitterabstand folgt aus konstruktiver Interferenz von Röntgenwellen – Bragg Bedingung

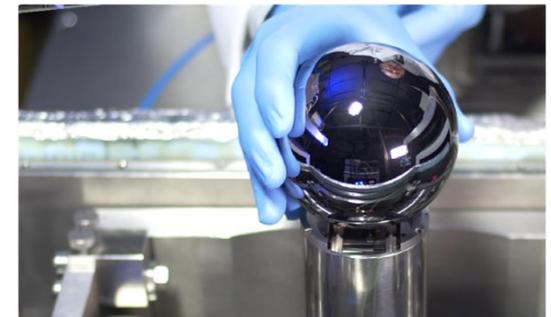
$$2d \sin \vartheta = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

- bei bekannter Wellenlänge lässt sich aus dem Winkel ϑ für maximal reflektierte Intensität d ermitteln



Avogadro Projekt

- Präzisionsexperiment an der PTB: $N_A = \frac{MVn}{M_K}$
- 1kg isotopenreine Siliziumkugel (99.99% ^{28}Si)
- Messunsicherheit $\delta N_A < 5 \times 10^{-8}$



Bestimmung der Atomgröße

Streuexperimente

Wahrscheinlichkeit für einen Stoß

$$W = \frac{\text{Fläche aller Wirkungsquerschnitte}}{\text{Gesamtfläche}} = \frac{nF\sigma\Delta x}{F}$$

Wirkungsquerschnitt $\sigma = \pi(r_1 + r_2)^2$

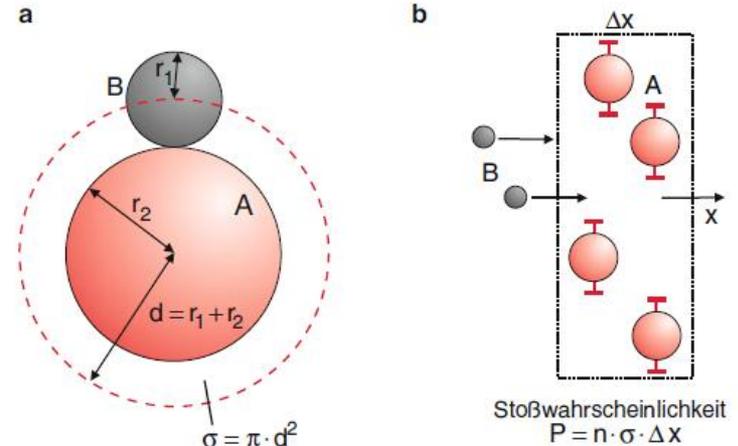
Teilchendichte $n = \frac{N}{V}$, Fläche F

Zahl der nach der Länge x nicht gestreuten Teilchen

$$N(x) = N_0 e^{-n\sigma x}$$

Messung von $N(x)$ ergibt σ , für $r_1 = r_2$ ergibt sich der Atomradius

Alternativ: Wärmeleitung / Diffusion / Viskosität von Gasen



Bestimmung der Atomgröße

Ergebnis: Atomradius $r_0 \approx 10^{-10} m = 1 \text{ \AA}$

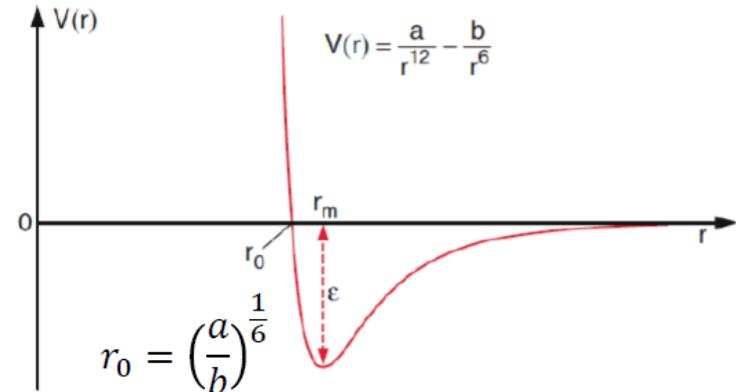
Verschiedene Größenmessmethoden ergeben unterschiedliche Werte (Faktor ~ 2 Unterschied!)

→ Atom ist keine starre Kugel, Wechselwirkung

Atom	vdW Zustands gleichung	Streuquer schnitt Diffusion	Röntgen beugung
He	1.33 Å	0.91 Å	1.76 Å
Ne	1.19 Å	1.13 Å	1.59 Å

Lennard-Jones Potential

$$V(r) = \frac{a}{r^{12}} - \frac{b}{r^6}$$



Der elektrische Aufbau von Atomen

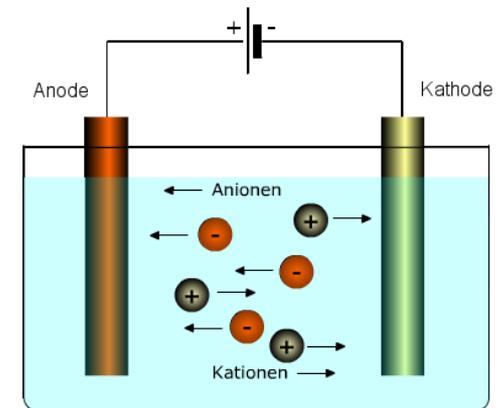
Experimentelle Befunde

- **Faraday** (1833) Elektrolyse: Moleküle können in positive und negative Ladungsträger dissoziieren die im elektrischen Feld in entgegengesetzte Richtungen wandern
- Masse- und Ladungstransport: Bei der Abscheidung von 1 mol eines chemisch einwertigen Stoffes wird die Elektrizitätsmenge

$$F = N_A \cdot e = 96485 \text{ C/mol}$$

transportiert (Faraday Konstante)

- bei Kenntnis von e folgt N_A



Der elektrische Aufbau von Atomen

Experimentelle Befunde

■ Kathodenstrahlung

Leichte, negativ geladene Teilchen

→ **Elektronen**

Lorentz Kraft $\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

Alle Elektronen bewegen sich auf der gleichen Kreisbahn: e/m für alle gleich!

■ Kanalstrahlung

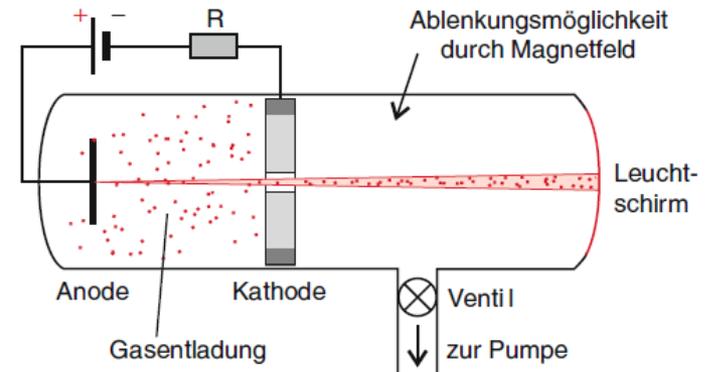
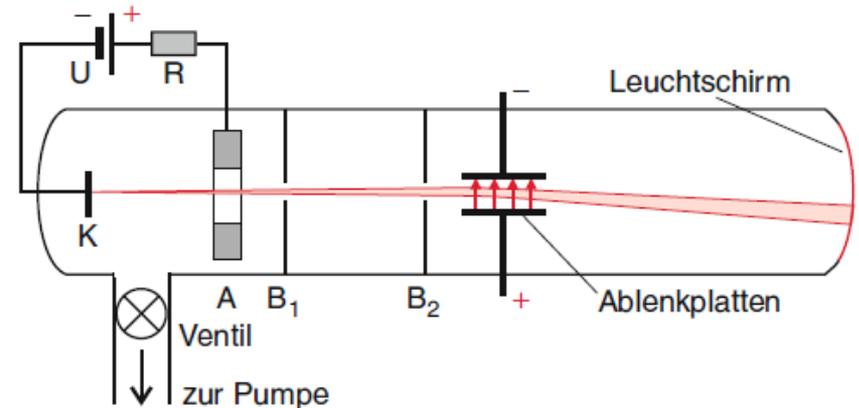
schwere, positiv geladene Teilchen

→ **Ionen**

Atome sind elektrisch neutral

→ bestehen aus gleich vielen positiven und negativen Ladungen

Coulomb Kraft für Zusammenhalt verantwortlich



Bestimmung von e und e/m

Millikan Versuch (1911)

Öltröpfchen im elektrischen Feld eines Plattenkondensators

Wirkende Kräfte:

- Elektrostatische Kraft $F_{el} = qU/d$
- Schwerkraft $F_G = mg$
- Auftrieb $m^* = m - \rho_L \frac{4}{3} \pi r^3$
- Reibung: $F_r = 6\pi\eta vr$
Viskosität η

ohne el. Feld: konstante Sinkgeschwindigkeit

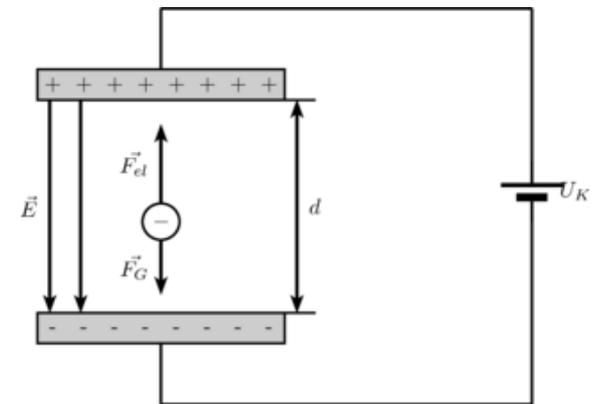
$$F_r = F_G - F_A \rightarrow v = \frac{m^* g}{6\pi\eta r}$$

Messung von v im Mikroskop ergibt Radius r

mit elektrischem Feld: Tröpfchen in der Schwebe

$$F_{el} = F_G - F_A$$

$$q \frac{U}{d} = m^* g \rightarrow q = \frac{m^* g d}{U}$$



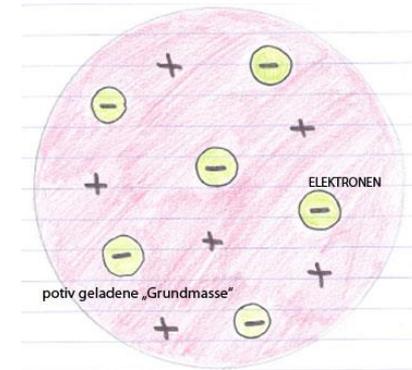
$$\text{Elementarladung } e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Die Struktur von Atomen

Wie sind Ladungen räumlich verteilt?

Thomson (1856 – 1940) Atommodell als Rosinenkuchen

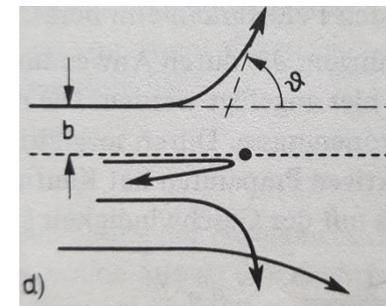
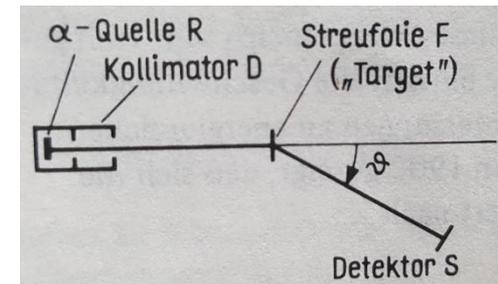
kontinuierliche Verteilung der positiven Ladung (Teig) mit lokalisierten Elektronen (Rosinen)



Rutherford (1871 – 1935): Streuversuche (1909)

- α Teilchen an dünner Goldfolie gestreut
- hohe Energie (10MeV) um in das Atom zu sehen
- Integraler Streuquerschnitt $\sigma = \pi r^2$
- differentieller Streuquerschnitt: Winkelverteilung

$$\frac{d\sigma(\vartheta)}{d\Omega}$$



Die Struktur von Atomen

■ Streuung von α -Teilchen an Elektron:

$$m_\alpha \gg m_e$$

$$\Delta p = m_\alpha(v - v') = m_e v_e \quad (I)$$

$$\Delta E = \frac{m_\alpha}{2}(v^2 - v'^2) = \frac{m_e}{2}v_e^2 \quad (II)$$

Eliminiere v_e : // // $\frac{1}{2}(v + v') = \frac{1}{2}v_e$, in (I) $\rightarrow v' = v \frac{m_\alpha - m_e}{m_\alpha + m_e}$

$$\Delta v = v - v' = v \left(1 - \frac{m_\alpha - m_e}{m_\alpha + m_e}\right) = v \frac{2m_e}{m_\alpha + m_e}$$

$$\vartheta_{max} < \frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta v}{v} = \frac{2m_e}{m_\alpha + m_e} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ rad}$$



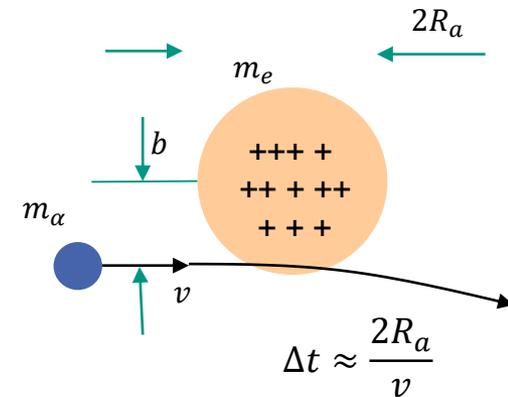
■ Streuung an ausgedehnter Ladungskugel:

$$b > R_a: F_C = 0 \text{ (neutrale Kugel)}$$

$$b \leq R_a: F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R_a^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e \cdot 79e}{R_a^2}$$

$$\frac{dp}{dt} = F \rightarrow \Delta p = F \Delta t = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e \cdot 79e}{R_a^2} \cdot \frac{2R_a}{v}$$

$$\vartheta_{max} < \frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e \cdot 79e}{R_a^2} \cdot \frac{2R_a}{v} \cdot \frac{1}{m_\alpha v} = 1.8 \times 10^{-4} \text{ rad}$$



→ erwarte nur kleine Impulsänderungen, kleine Winkeländerungen

Atommodell von Rutherford (1871 – 1937)

- Beobachtung: Manche Teilchen werden um bis zu 180° abgelenkt

Dies ist so unwahrscheinlich, als ob man mit einer Pistole auf einen Wattebausch schießt, und die Kugel prallt zurück

→ Thomson'sches Atommodell ist falsch

$$\vartheta_{max} < const. \frac{1}{R} \frac{1}{m_e v}$$

große ϑ_{max} nur wenn $R \ll R_a$; z.B. für $\vartheta_{max} = 1$ rad:

$$\frac{R_a}{R} = \frac{1.8 \cdot 10^{-4} \text{ rad}}{1 \text{ rad}} \rightarrow R \approx 5 \times 10^{-14} \text{ m}$$

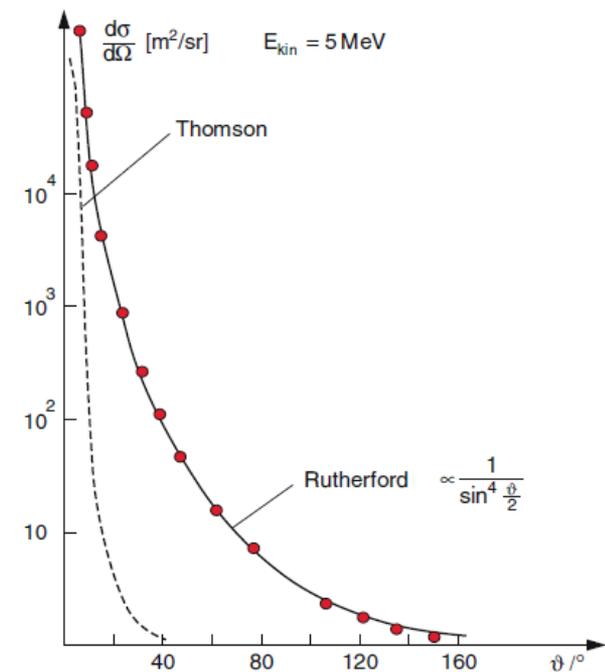
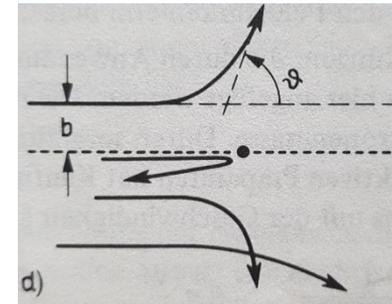
- Winkelverteilung für ruhenden Punktstreuer und Ablenkung im Coulomb Feld

$$\frac{d\sigma(\vartheta)}{d\Omega} = \left(\frac{ZZ'e^2}{4E_{kin}} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}}$$

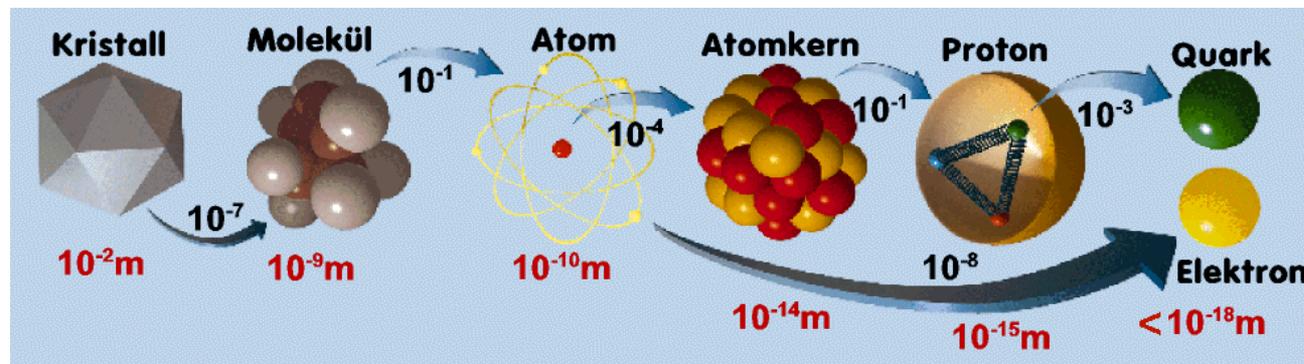
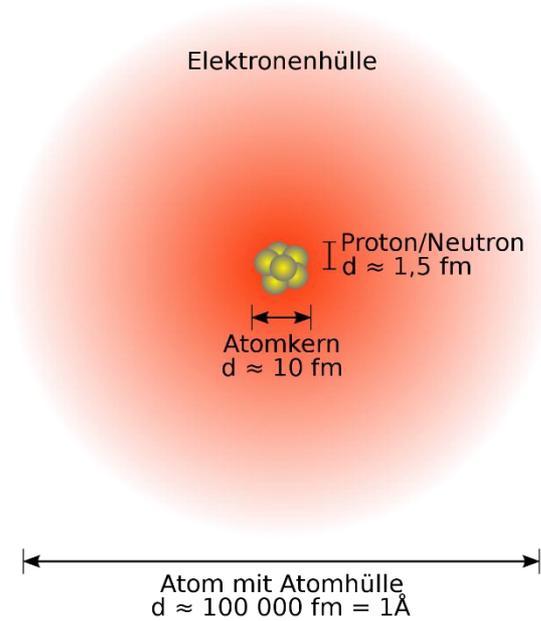
Solange Daten dem $\frac{1}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}}$ Gesetz folgen gilt noch das

Coulomb Potential; selbst zentraler Stoß bei 5MeV trifft noch nicht auf Kern

Kernradius $\sim 10^{-15} \text{ m}$



Das moderne Atommodell



Energie

meV

eV

keV

MeV

GeV

TeV

Kann man Atome sehen?

Indirekt: Brown'sche Molekularbewegung

1827 von Brown beobachtet: Staubkörner in Wasser
 Erklärung 1905 Von Einstein, Smoluchowski, Langevin

- Atome stoßen zufällig an Mikropartikel
- Bewegungsgleichung (1D)

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_x - b \frac{dx}{dt}$$

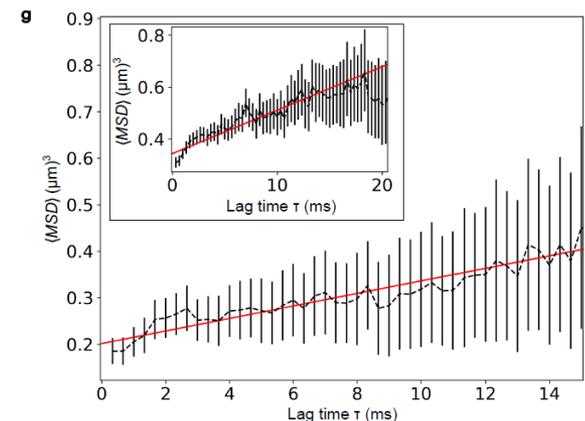
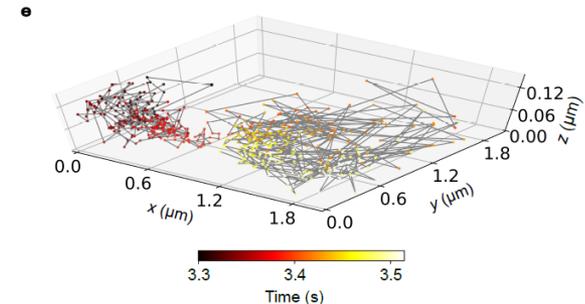
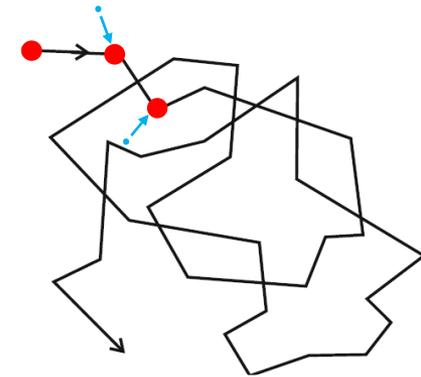
- Kraft von Medium F_x

- Reibungskraft $-b \frac{dx}{dt} = -6\pi r \eta v$ (Stokes Gesetz)

mittlerer quadratischer Abstand $\langle x \rangle^2$ nimmt linear mit der Zeit zu

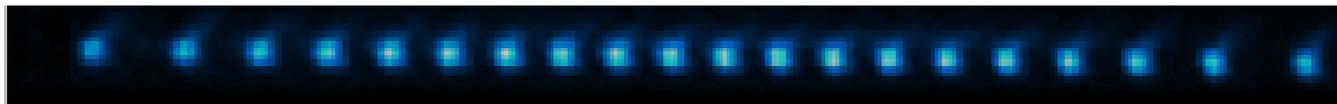
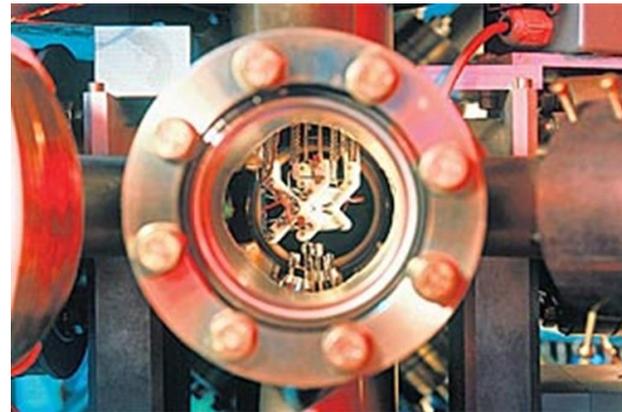
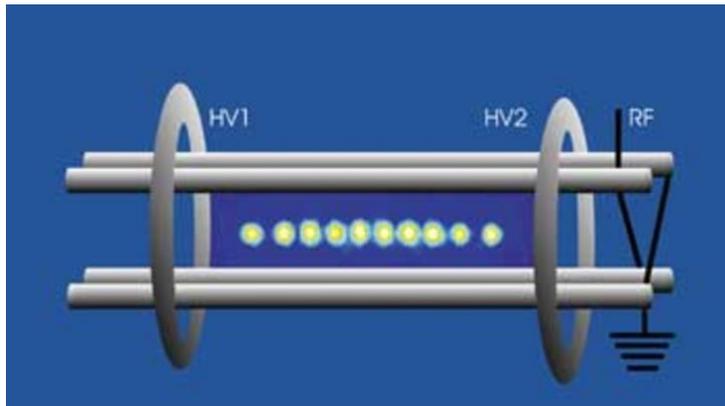
$$\langle x \rangle^2 = \frac{k_B T}{3r\pi\eta} t$$

- ermöglicht Bestimmung von k_B



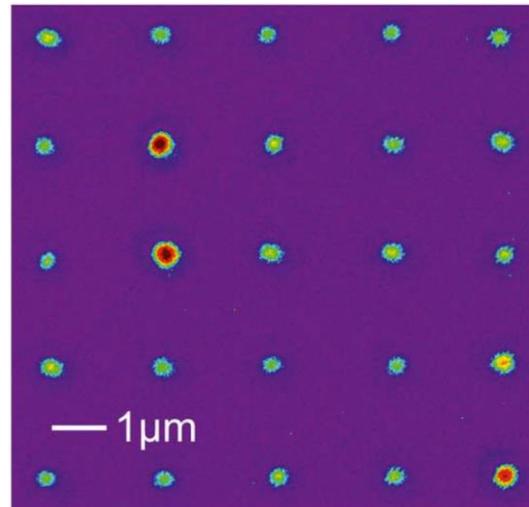
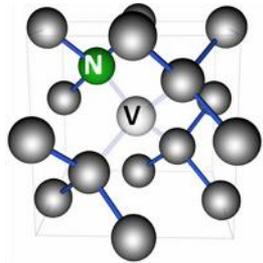
Fluoreszenzdetektion

Gefangene einzelne Atome in einer Ionenfalle

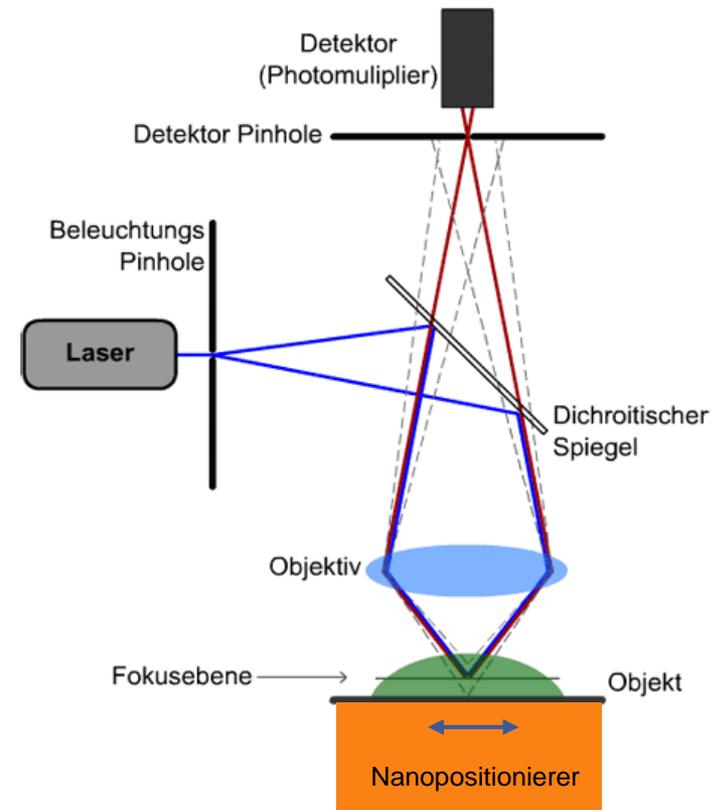


PRX 8, 021012 (2018)

Farbzentren in Diamant, Fluoreszenzmikroskopie

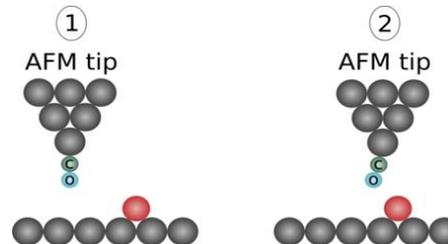
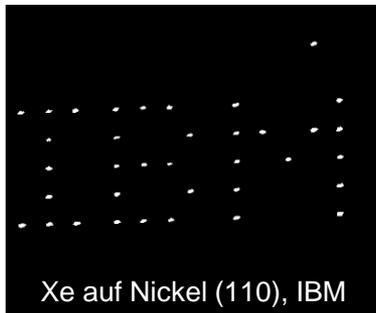
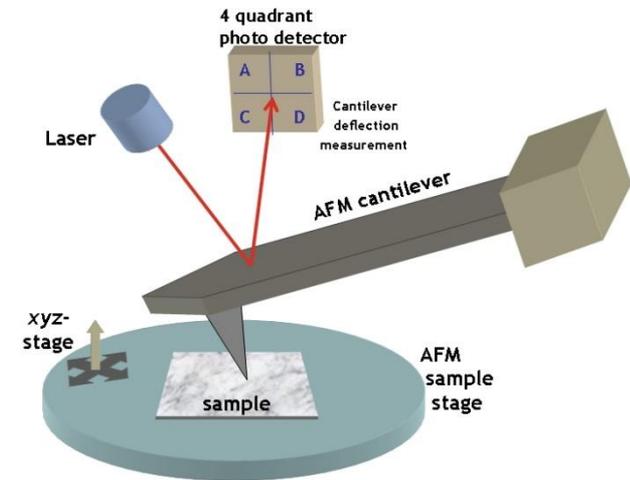


Chen et al, Optica 6, 662 (2019)

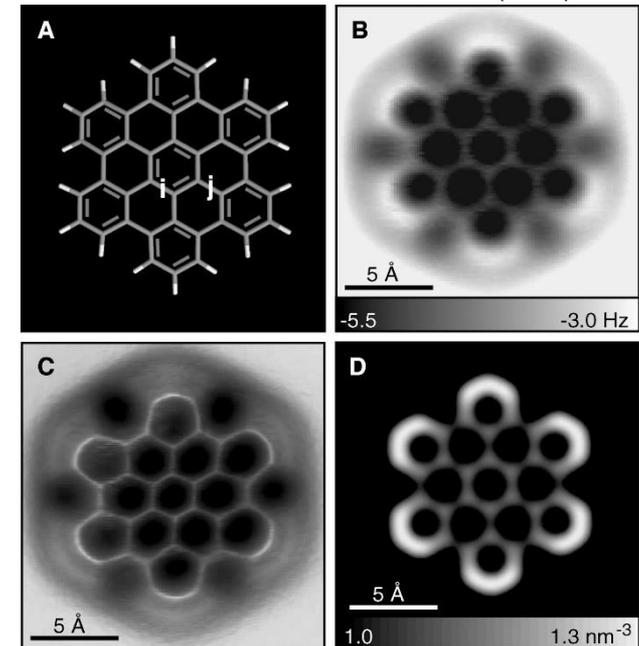
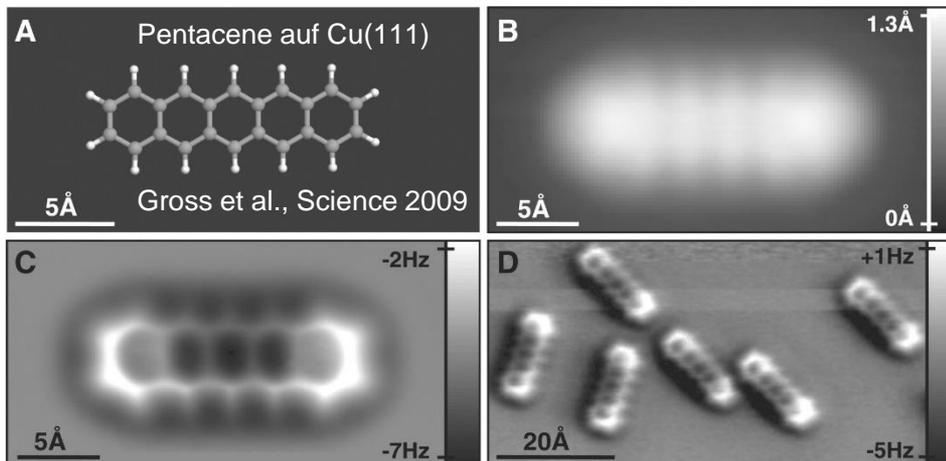


Rasterkraftmikroskop (AFM)

- mechanische Oszillation von Si Mikrobalken
- Kraftmessung durch Auslese von Änderung von Schwingungsfrequenz und -amplitude
- Funktionalisierung mit CO Molekülen

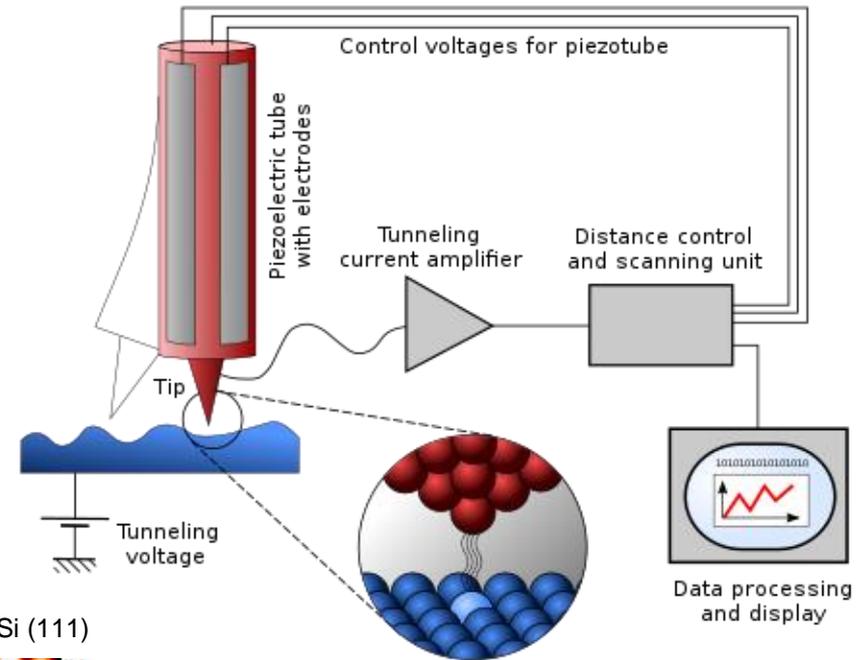


Gross et al., Science 337, 1326 (2013)

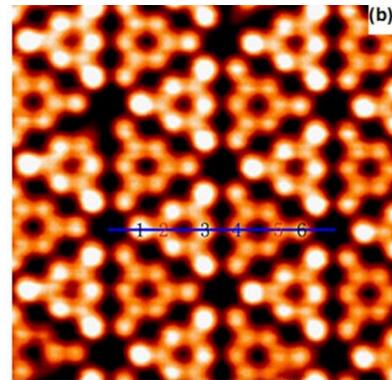


Rastertunnelmikroskop

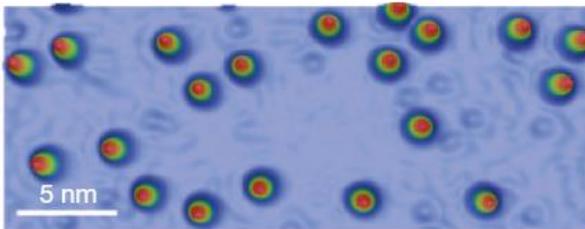
- Tunneln von Elektronen zwischen Spitze und Oberfläche
- Messung von Tunnelstrom
- zeigt Elektronenzustandsdichte



Guo et al JPCM (2014), Si (111)



Miyamachi et al. Nature (2013)
Ho auf Pt(111)



Crommie et al. Science (1993)
Fe auf Cu(111)

