

# Experimentalphysik III, Modul BP-09

## Teilmodul: Einführung in die Atomphysik

Prof. Dr. Alfred Müller

WS 2010/11

Stand vom 14.10.2010

### Termine:

#### Vorlesung

Mo. 8:15 – 10:00 Uhr H I (mit Experimenten)

Mi. 10:00 – 11:45 Uhr H SZ

#### Übungen

Gruppe Müller Mi. 8:15 – 9:45 Uhr, H SZ

Gruppe Schippers Mi. 8:15 – 9:45 Uhr, SZ 023

# Experimentalphysik III, Modul BP-09

**Zu diesem Modul gehören:**

- I. Vierstündige Vorlesung
- II. Zweistündige Übungen
  
- III. Blockpraktikum (12 Versuche, nach der Vorlesungszeit)

**Zum Bestehen des Moduls gehören folgende Prüfungsleistungen**

- I. Klausur zur Vorlesung (Wichtung: 50%),  
Voraussetzung: 50% der Hausaufgaben)
  
- II. Abschlusskolloquium oder Klausur zum Praktikum (Wichtung: 50%)  
Voraussetzung: alle Versuchsprotokolle

# Experimentalphysik III, Modul BP-09

## Vorgesehene Prüfungstermine zum Modul im WS 2009/10

### Klausur

(Teilnahmebedingung: 50% der Hausaufgaben)

**09.02.2011**

9-12 Uhr, H SZ

### Ausgleichsprüfung für Teilmodul Vorlesung

(Nachklausur)

**01./08. 04. 2011 ?**

9-12 Uhr, SZ 023

### 1. bzw. 2. Wiederholungsprüfung

**WS 2011/12**

vorläufig geplant 08.02.2012

bzw. 30.03.2012

### Blockpraktikum

**28.02. – 18.03.2011**

### Abschlussprüfung für Praktikum

**18.03.2011**

# Ablaufplanung

## Vorlesung:

insgesamt 31 Doppelstunden verfügbar  
Montag in H I ermöglicht Experimente  
Mittwoch in H SZ (Hörsaal Strahlenzentrum)

## Laborbesichtigung:

geplant 16. Februar 2011

## Übungen:

Einteilung in zwei Gruppen:  
Müller, Schippers

insgesamt 26 Stunden verfügbar,  
Hausaufgaben, **Präsenzübungen**  
Lösung der Hausaufgaben (50% der  
erreichbaren Punkte) als Voraussetzung  
für die Teilnahme an der Klausur

## Tutorien:

Einteilung in drei Gruppen:  
Kaija Spruck,  
Josephina Werner,  
Arno Becker

Termine nach Absprache  
**Hausaufgaben**, Präsenzübungen

# Organisation über Stud.IP

Bitte melden Sie sich über STUD.IP als Teilnehmer/Teilnehmerin an:

## Name der Veranstaltung in STUD.IP

**Vorlesung:**

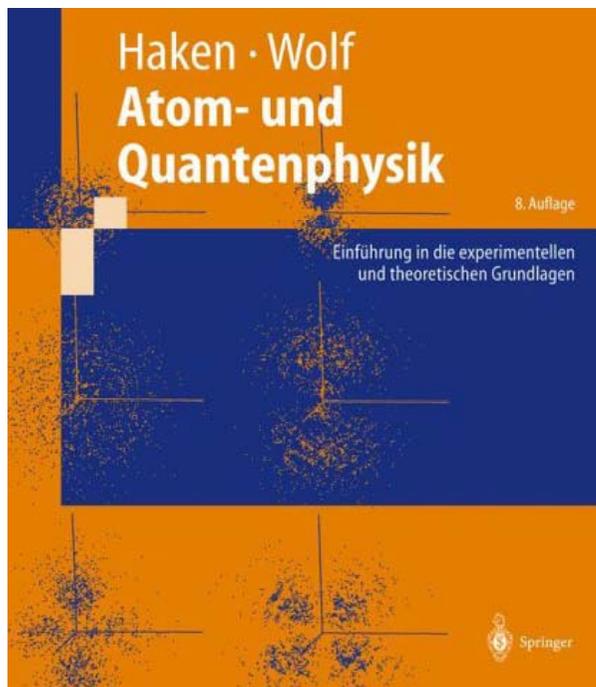
**Experimentalphysik III für Physiker  
Atom- und Quantenphysik**

**Übungen:**

**Übungen zur Experimentalphysik III**

# Literatur

## Lehrbuch für die Vorlesung



### **Atom- und Quantenphysik**

Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen

Reihe: Springer-Lehrbuch,

**Haken**, Hermann, **Wolf**, Hans C.

8., aktualisierte u. erw. Aufl., 2004, XX, 531 S. 307 Abb., 32 Tab.,

177 Aufgaben und vollständigen Lösungen., Geb.

ISBN: 3-540-02621-5

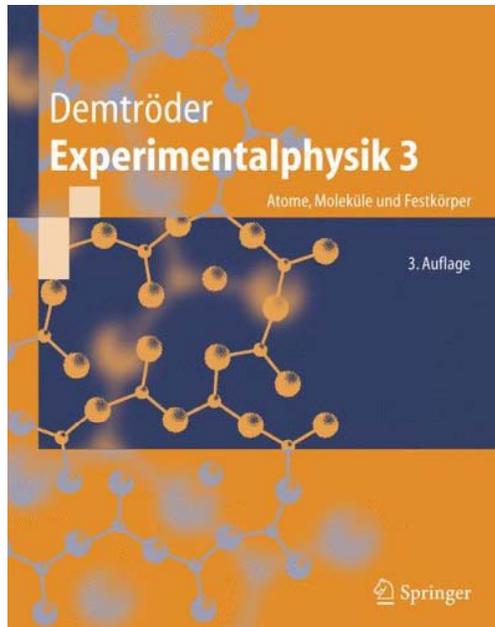
Versandfertig innerhalb von 3 Tagen

**Ladenpreis 49,95 €**

**Versandfertig bei Amazon in 24 Stunden**

# Literatur

## Lehrbuch für die Vorlesung



### Einleitung

- Entwicklung der Atomvorstellung
- Entwicklung der Quantenphysik
- Grundlagen der Quantenmechanik
- Das Wasserstoff-Atom
- Atome mit mehreren Elektronen
- Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Atome
- Laser
- Moleküle
- Experimentelle Methoden der Atom- und Molekülphysik
  - Die Struktur fester Körper
  - Dynamik der Kristallgitter
  - Elektronen im Festkörper
  - Halbleiter
  - Optische Eigenschaften von Festkörpern
  - Amorphe Festkörper
  - Flüssigkeiten, Flüssigkristalle und Cluster
  - Oberflächen

**Amazon-Preis: EUR 44,95**, Broschiert - 639 Seiten,  
4. Auflage 2010, 44,94 €, 650 Seiten

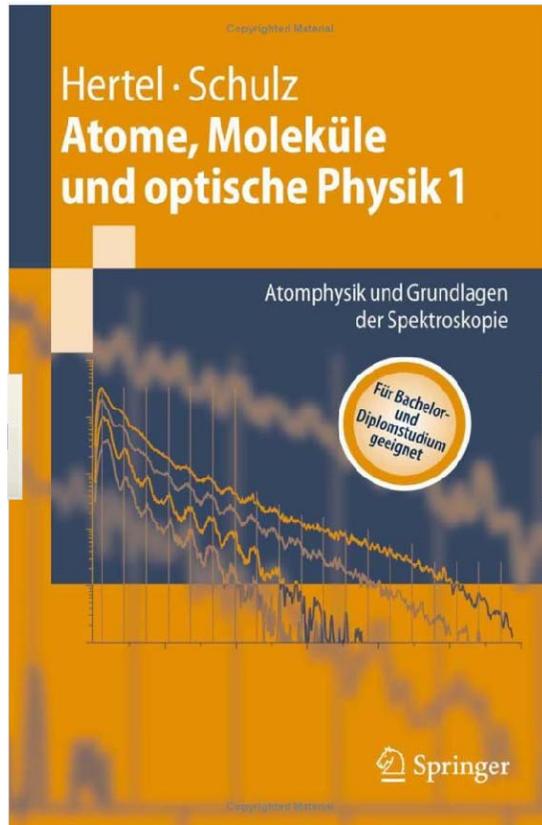
**Online-Version:**

<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03911-9>

---

# Literatur

## Ergänzende, eigenständig empfehlenswerte Lehrbücher



**Hertel, Ingolf V., Schulz, C.-P.**

### Atome, Moleküle und optische Physik 1

Atomphysik und Grundlagen der Spektroskopie

Reihe: Springer-Lehrbuch

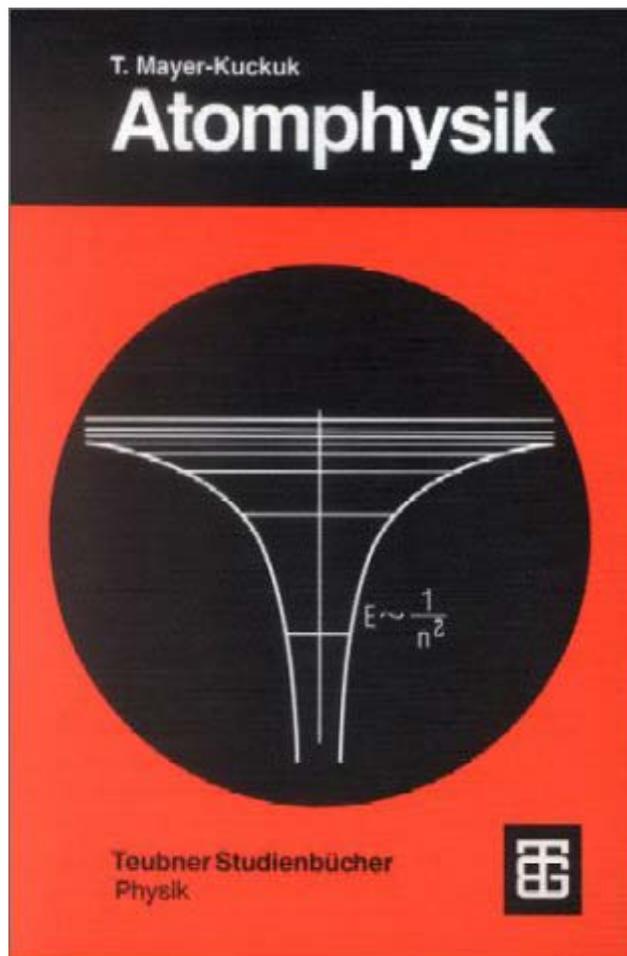
2008, ISBN 978-3-540-30613-9, Softcover

Versandfertig innerhalb von 3 Tagen

49,95 €

# Literatur

Ergänzende, eigenständig empfehlenswerte Lehrbücher



**Mayer-Kuckuk, Theo**

**Atomphysik**

Eine Einführung

Aus der Reihe:

[Teubner Studienbücher Physik](#)

B.G. Teubner Verlag

5., durchgesehene und erweiterte Aufl. 1997.

276 S. Mit 138 Abb. u. 7 Tab.

1 Spektraltafel 13,7 x 20,5 cm Br.

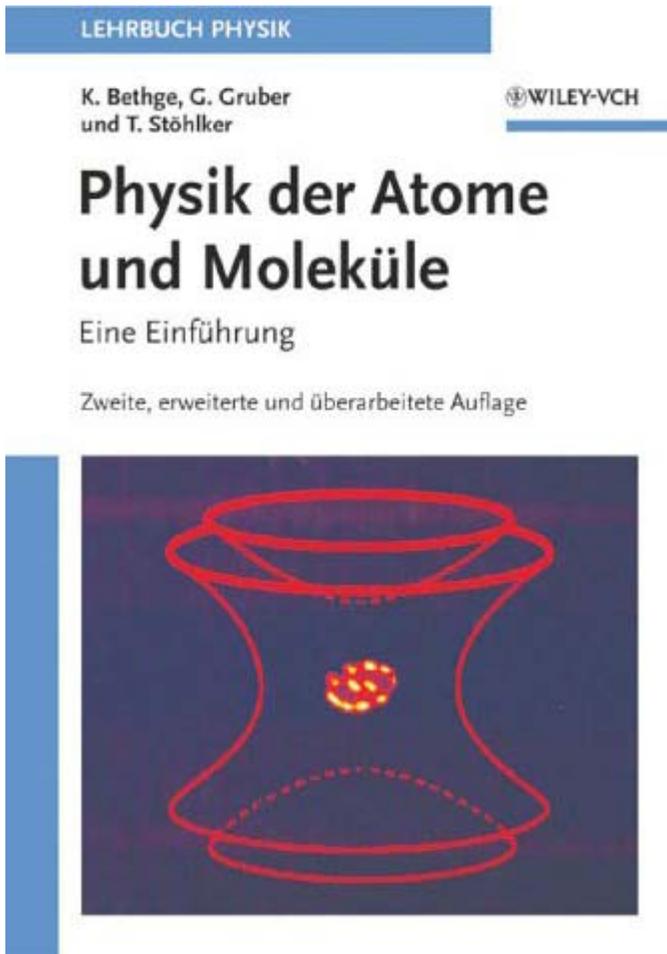
**ISBN:** 3-519-43042-8

**EUR:** 28,90

**Amazon-Preis: EUR 28,90**

# Literatur

## Ergänzende, eigenständig empfehlenswerte Lehrbücher



**Bethge**, Klaus und  
Gruber, Gernot / Stöhlker, Thomas

### Physik der Atome und Moleküle

Eine Einführung

Die Neuauflage des Klassikers deckt neben den Grundlagen auch die zahlreichen modernen Anwendungen ab, z.B. Quantenoptik, Atom- und Ionenfallen, Hochpräzisionsspektroskopie, Atome in starken Magnetfeldern, Bose-Einstein-Kondensate etc.

August 2004

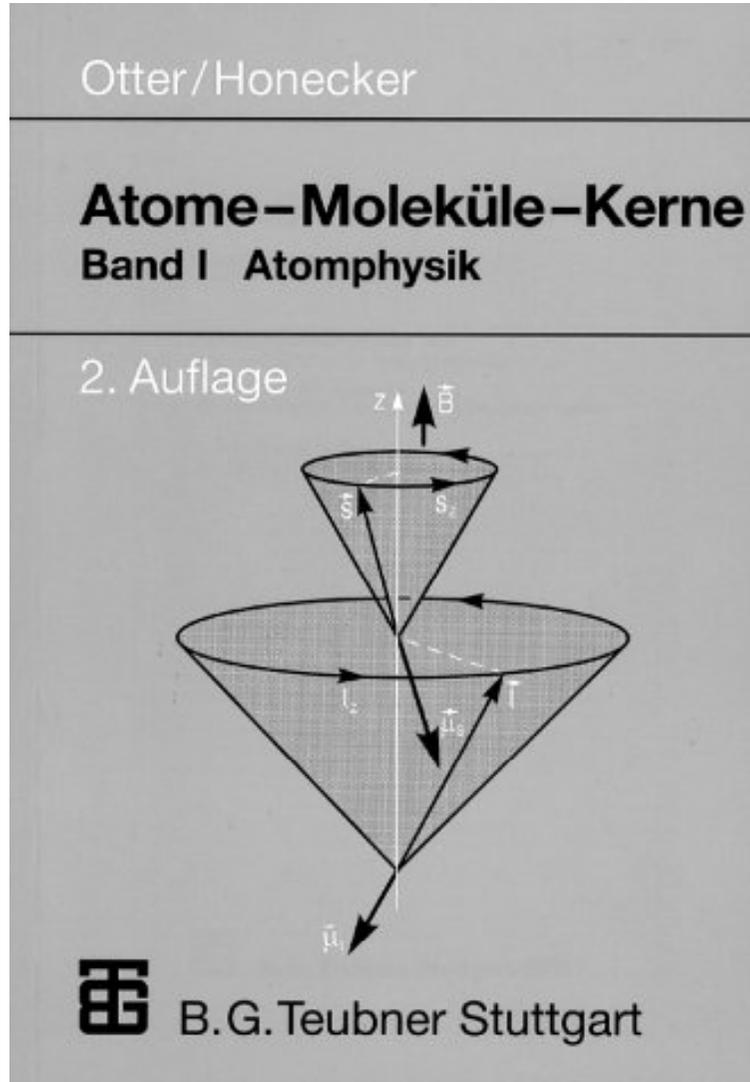
ISBN 3-527-40463-5

59,- Euro / 87,- SFR

**Amazon-Preis: EUR 59,00**

# Literatur

## Ergänzende, eigenständig empfehlenswerte Lehrbücher



### **Atome - Moleküle - Kerne**

Band III Atome:  
Fragen und Antworten  
B.G. Teubner Verlag 2001.  
156 S. Mit 26 Abb.

17 x 24 cm Br.

**ISBN:** 3-519-00329-5

**EUR:** 18,90

### **Atome - Moleküle - Kerne**

Band I : Atomphysik

B.G. Teubner Verlag

2., überarbeitete Aufl. 1998.

471 S. Mit 192 Abb. u. 19 Tab.

16,2 x 22,9 cm Br.

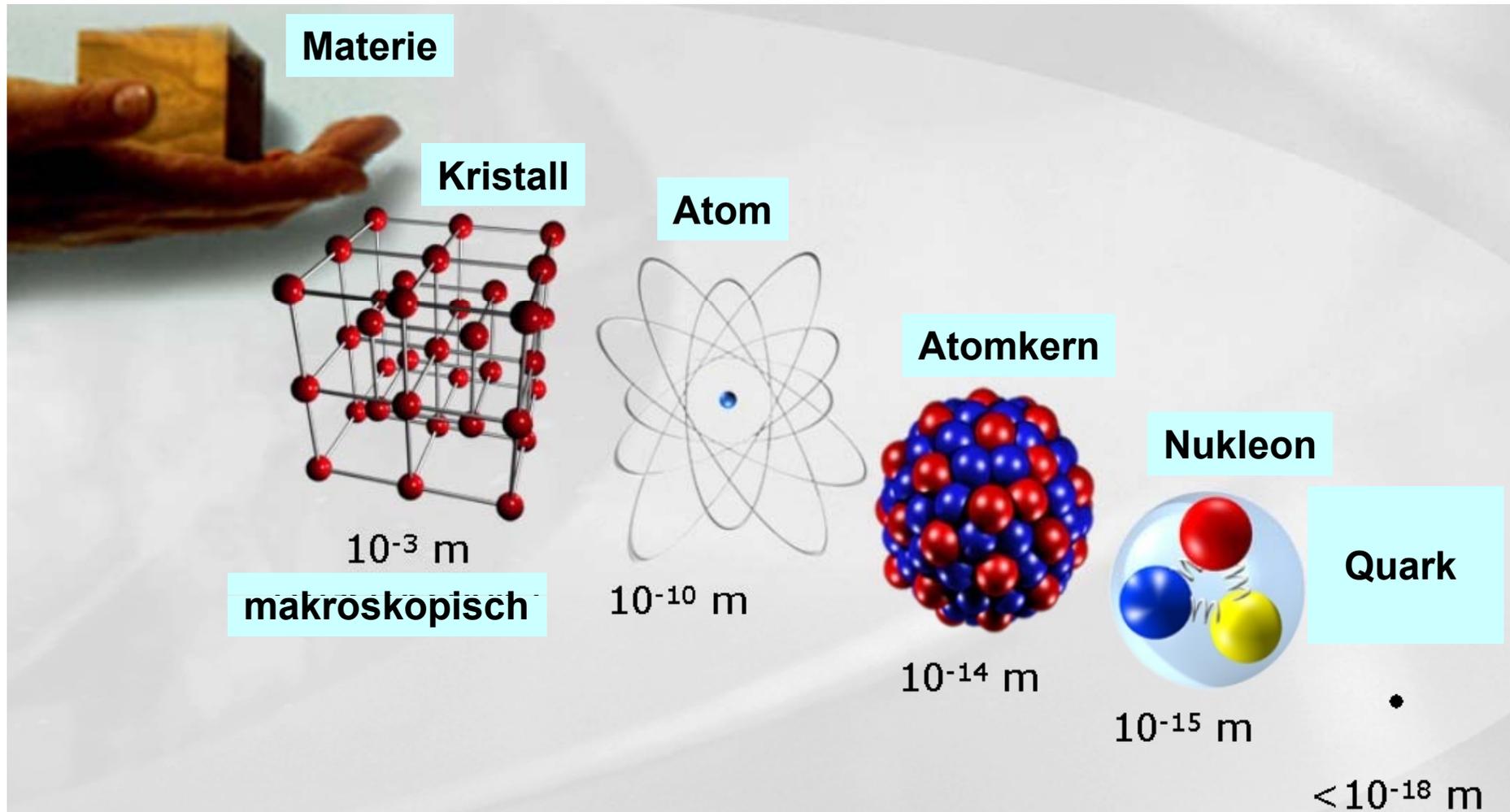
**ISBN:** 3-519-13219-2

**EUR:** 34,90

**Kap. 1:**

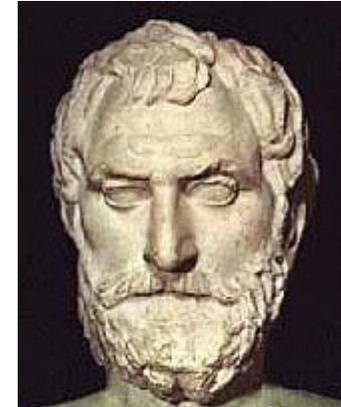
**Einleitung**

# Struktur der Materie nach heutigem Wissen



# Entwicklung der Vorstellung von Elementen

Wasser als Urelement



Thales von Milet  
ca. 624 – 547 v. Chr.



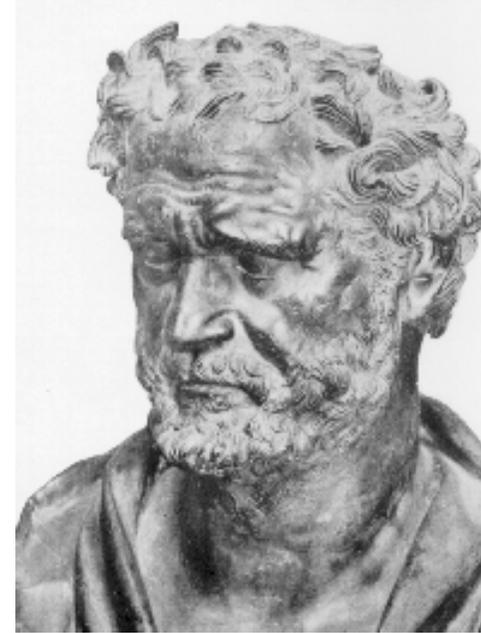
Anaxagoras  
ca. 500 – 428 v. Chr.

**Werden und Vergehen** erklären sich durch  
**Zusammensetzung bzw. Trennung**  
zuvor existierender Einzeldinge

# Vorstellung kleinster Bausteine



**Leukipp** (Idealbild)



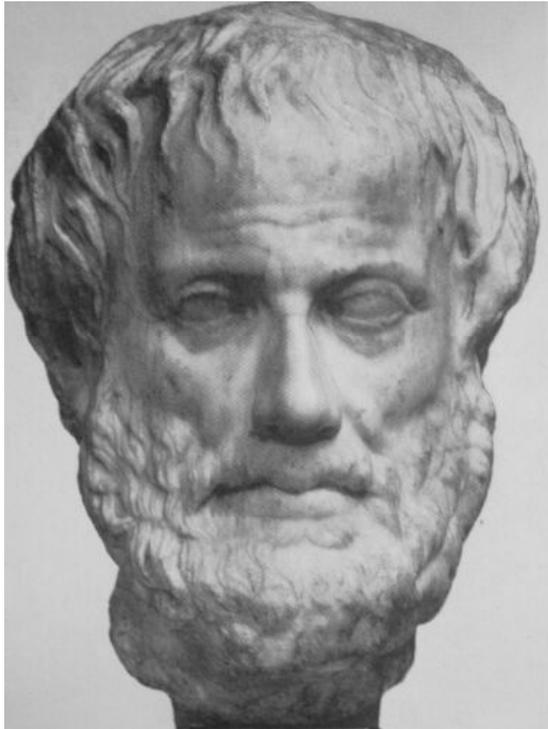
**Demokrit**

Leukipp (ca 440 v Chr.) und sein Schüler Demokrit (469-370 v.Chr.)

Leukipp: es gibt kleinste Bausteine, dazwischen befindet sich „Leere“

Demokrit: Atomvorstellung ατομοζ = unteilbar, unzerschneidbar

# Gegenmeinung: Vorstellung stetiger Erfüllung des Raums mit Materie



Aristoteles  
384 – 322 v. Chr.

Nach seiner Meinung  
lässt die Natur kein Vakuum zu.  
Es gibt demnach keinen leeren Raum

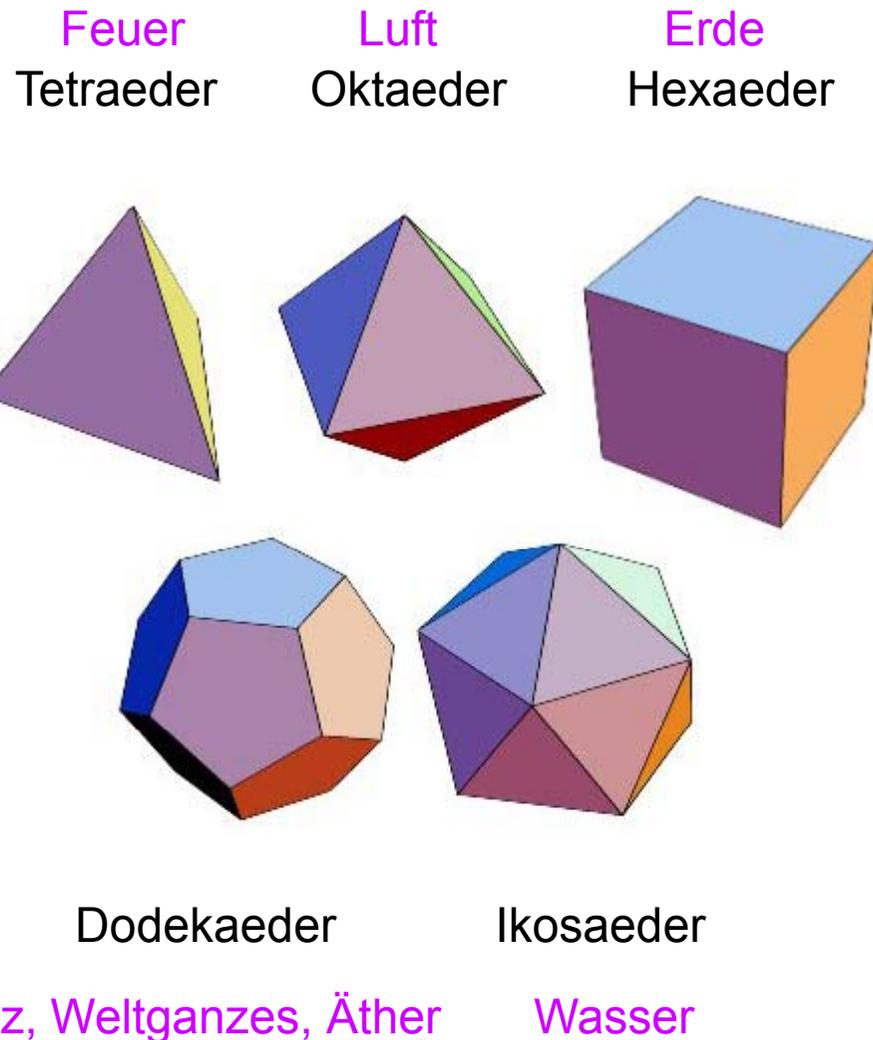
-etwa zwischen Atomen, die damit  
eine sinnlose Modellvorstellung bieten

Demokrit „hatte Glück“,  
Aristoteles dagegen „hatte Pech“  
mit den ohne experimentelle Befunde  
entwickelten Vorstellungen von der  
Struktur der Materie

# Die Platonischen Körper und die 4 klassischen Elemente



Platon  
427 - 347 v.Chr



# Die Philosophie des Aristoteles bestimmt die Naturvorstellungen des Mittelalters

Ab dem 17. Jahrhundert  
setzte sich zunehmend die  
Atomvorstellung durch



Pierre Gassendi  
1592 - 1655

Gassendi griff als erster die  
Überlegungen von Demokrit  
wieder auf.

Er sprach von

„Kräften“ zwischen den Atomen

(Werden und Vergehen: bei Thales u. Anaxagoras)

# Neue Vorgehensweise: Experimente

## Schärfung des Elementbegriffs



Robert Boyle  
1627 - 1691

Robert Boyle in „The sceptical Chymist“  
**Elemente** sind bestimmte primitive und **einfache**,  
völlig **unvermischte Körper**; sie enthalten keine  
anderen Körper, sie sind die **Zutaten**, aus denen  
alle perfekt gemischten Körper zusammengesetzt  
sind und in welche diese letztlich zerlegt werden



Antoine Lavoisier  
1743 - 1794

Experimenteller Nachweis für die Anlagerung von  
Sauerstoff bei der Verbrennung

**Ein Element ist ein Stoff, der mit chemischen Methoden  
( Wärme, Licht, mechanische oder elektrische Energie )  
nicht weiter zerlegt werden kann.**

# Experimenteller Befund: Die Gesetze der konstanten bzw. multiplen Proportionen

Die Gewichtsmengen, in denen sich die Elemente untereinander verbinden, sind stets die gleichen oder stehen in einfachen, ganzzahligen Verhältnissen zueinander



Joseph Louis Proust  
1754 - 1826

## Beispiel:

14 g Stickstoff + 16 g Sauerstoff ergeben 30 g Stickoxid  
14 g Stickstoff + 32 g Sauerstoff ergeben 46 g Stickoxidul

# Die atomistische Deutung der Gesetze der konstanten bzw. multiplen Proportionen



John Dalton  
1766 - 1844

„A New System of Chemical Philosophy“

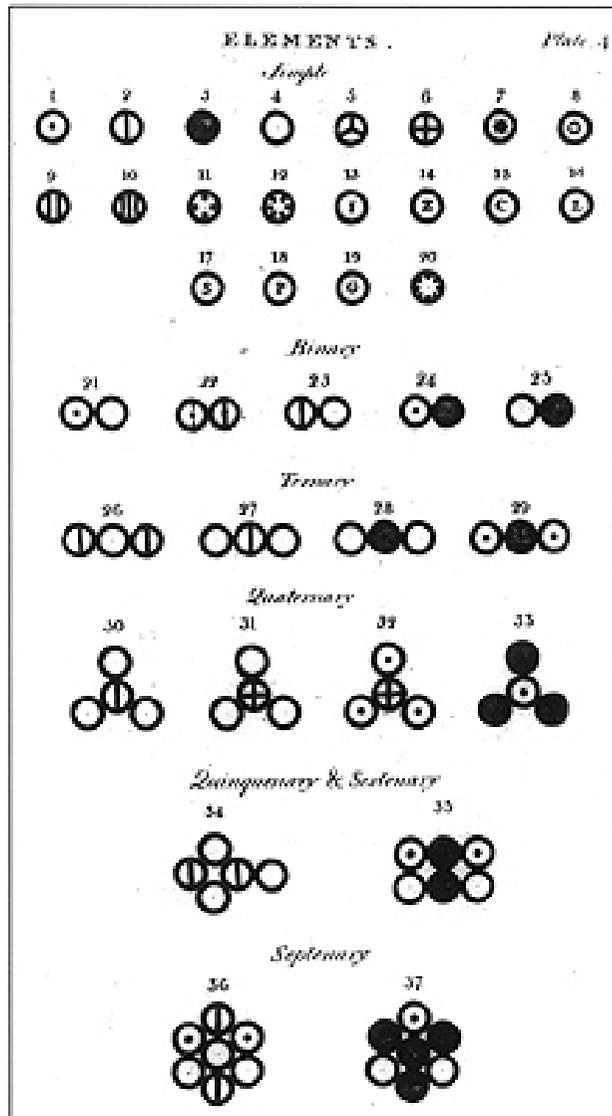
**All matter consists of tiny particles.**

**Atoms are indestructible and unchangeable.**

**Elements are characterized by the mass of their atoms.**

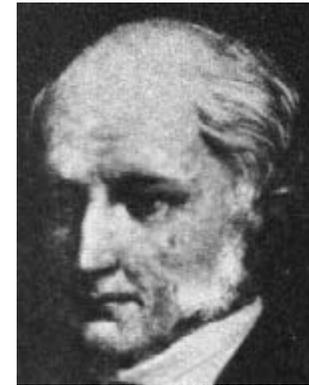
**When elements react, their atoms combine in simple, whole-number ratios**

# Dalton's Elemente und ihre Verbindungen



# Folgerung aus der Beobachtung relativer Massen: Wasserstoff als Baustein der Elemente

Atomgewichte erscheinen  
als ganzzahlige Vielfache  
des Atomgewichts von  
Wasserstoff



William Prout  
1785-1850

s. Aufbau der Atomkerne aus Nukleonen

# Gasvolumina bei Reaktionen



Louis Joseph Gay-Lussac  
1778 -1850

**1 Volumeneinheit Sauerstoff  $O_2$   
+ 1 Volumeneinheit Stickstoff  $N_2$**

**2 Volumeneinheiten NO**

**Gay-Lussac: auch bekannt durch  $V_{\text{gas}} \sim T$**

# Zahl von Atomen in Gasvolumina



Amadeo Avogadro  
1776 -1856

Folgerung aus den Gesetzen der konstanten bzw. multiplen Proportionen von Massen und Gasvolumina bei Reaktionen:

**Gleiche Volumina verschiedener Gase  
enthalten**

(bei gleichem Druck und bei gleicher Temperatur)

**gleich viele Atome bzw. Moleküle**

1 Liter Helium enthält ebenso viele Moleküle wie 1 Liter Kohlendioxid (p, T identisch)

# Avogadro-Konstante

$$M_{\text{Stoffmenge}} = N \cdot m_{\text{Stoffatom}}$$

$$V_{\text{Stoffmenge}} = N \cdot V_0$$

Einführung der Stoffmenge **1 Mol**: Stoffmenge mit derjenigen Masse in Gramm, die das relative Atomgewicht vorgibt

Beispiel 1 Mol Helium: 4 g Helium

In 4 g Helium sind  $N_A$  Heliumatome,  
in 32 g Sauerstoff sind  $N_A$  Sauerstoffmoleküle.

Diese Atome bzw. Moleküle nehmen bei gleichen Druck- und Temperaturwerten das gleiche Volumen ein (22.4 l unter Normalbedingungen).

# Avogadro-Konstante: Zugang zur Masse (und zur Größe) von Atomen

CODATA 2006:  $N_A = 6.022\,141\,79(30) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Erstmalig bestimmt von **Johann Josef Loschmidt** (1865)

Verbindung der **Atomistik von Gasen** (mittlere freie Weglänge) mit der zugehörigen makroskopisch messbaren **Diffusionskonstanten**

unter der Annahme, dass **kondensierte Gase** die **dichteste Packung** der Atome/Moleküle einnehmen

erhielt Loschmidt den Wert  $d = 1\text{nm}$  für den Durchmesser eines Luftmoleküls, rund einen **Faktor 3 zu groß**



# Atomistik der Elektrizität

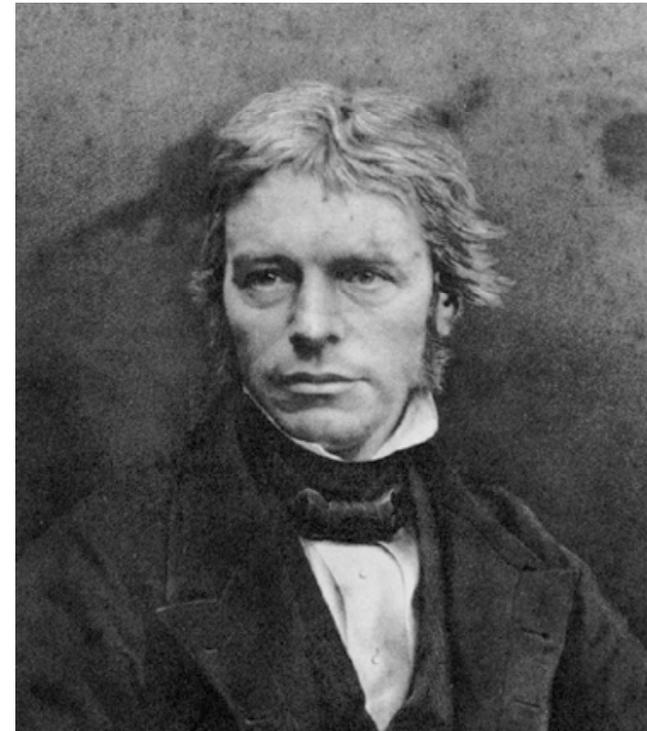
## Elektrolyse:

abgeschiedene Menge eines Materials  
proportional zur Ladungsmenge

Ladungsmenge zur Abscheidung von  
1 Mol einer einwertigen Substanz:

Faradaysche Konstante

$$F = N_A \cdot e$$



Michael Faraday (1791-1867)

# Atomistik der Energie

$$E = h \cdot \nu$$

## Plancksche Konstante

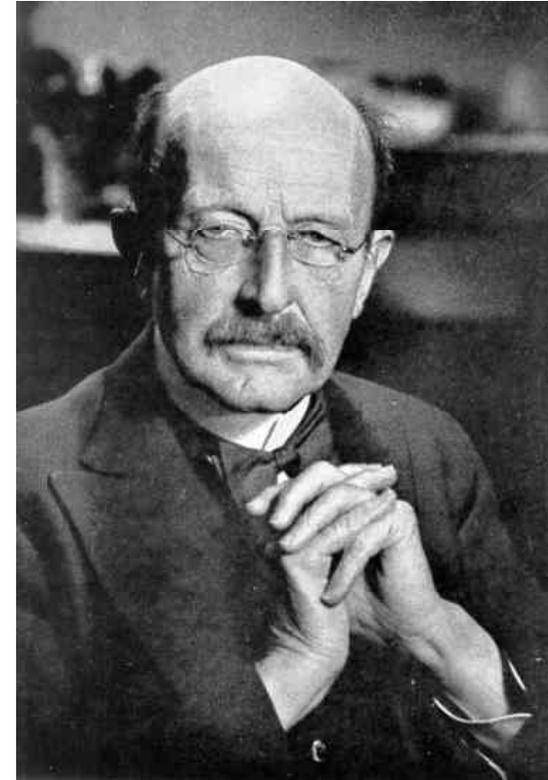
(CODATA 2002):

$$h = 6.626\ 0693(11) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

(CODATA 2006):

$$h = 6.626\ 068\ 96(33) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

Beginn der Atom- und Quantentheorie



Max Planck 1858 – 1947  
Nobelpreis 1918

# Fundamentale Konstanten: [physics.nist.gov/cuu/index.html](http://physics.nist.gov/cuu/index.html)

Adresse  <http://physics.nist.gov/cuu/index.html> ↕ Wechseln zu Links

**Physics Laboratory**  
**Physical Reference Data**

**NIST**  
National Institute of Standards and Technology

[Home](#) [Products and Services](#) [Physical Reference Data](#) [Research Areas](#) [Contact](#) [Search](#)

**The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty**

Information at the foundation of modern science and technology from the [Physics Laboratory](#) of [NIST](#)

[Detailed contents](#)

[Fundamental Physical Constants](#)

[Values of the constants](#) and related information  
[Searchable bibliography](#) on the constants

[International System of Units \(SI\)](#)

[In-depth information on the SI](#), the modern metric system

[Uncertainty of Measurement Results](#)

[Guidelines](#) for the expression of uncertainty in measurement

[About this reference.](#) [Feedback.](#)

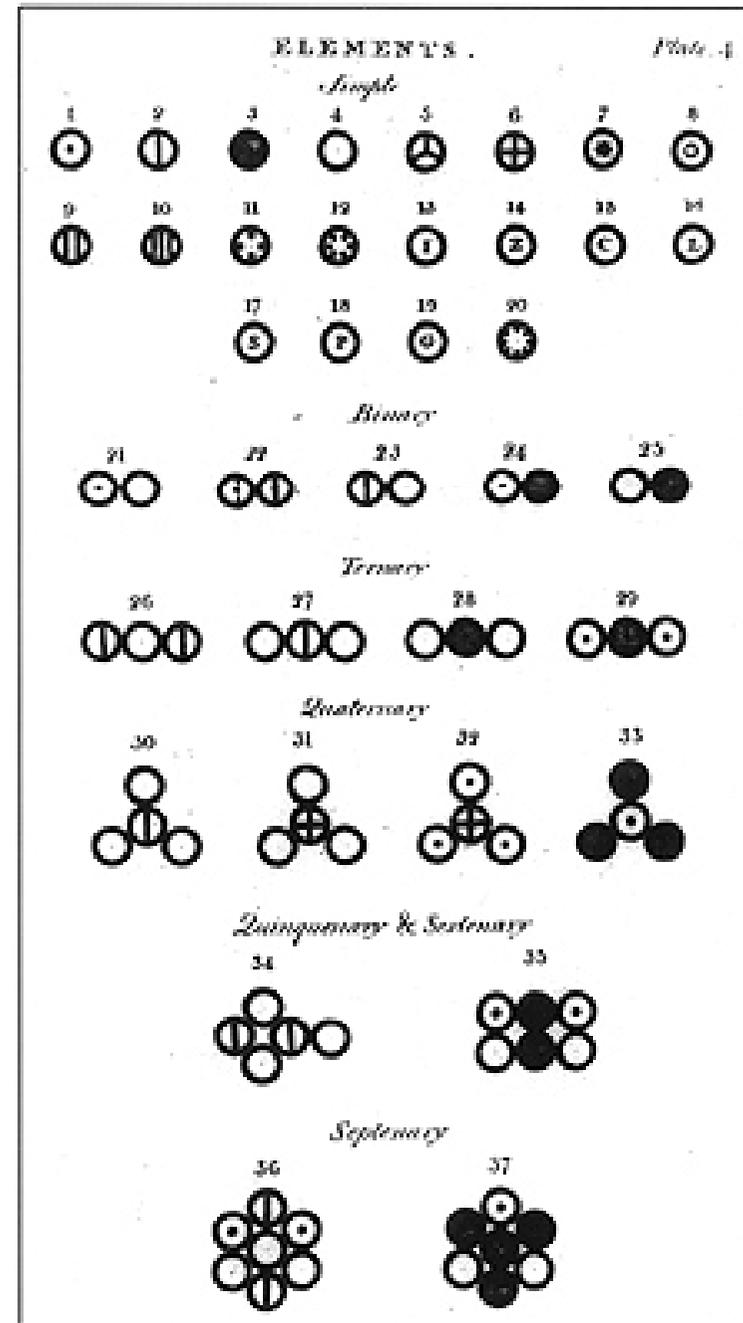
Online: February 1998 - Last update: December 2003  
[Privacy Policy / Security Notice](#) - [NIST Disclaimer](#)

# Atomhypothese: Status bis ca.1895

Aufbau der Atome unbekannt

ELEMENTS				
	Hydrogen	1	Strontian	46
	Azote	5	Barytes	68
	Carbon	5	Iron	50
	Oxygen	7	Zinc	56
	Phosphorus	9	Copper	56
	Sulphur	13	Lead	90
	Magnesia	20	Silver	190
	Lime	24	Gold	190
	Soda	28	Platina	190
	Potash	42	Mercury	167

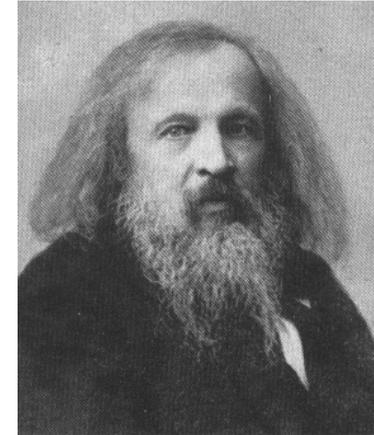
Daltons  
Vorstellungen



Elektron noch nicht identifiziert

# Das erste Periodensystem der Elemente (1869)

Handwritten manuscript of the periodic table by Dmitri Mendeleev, showing elements arranged in columns with their atomic weights and names in Cyrillic script.

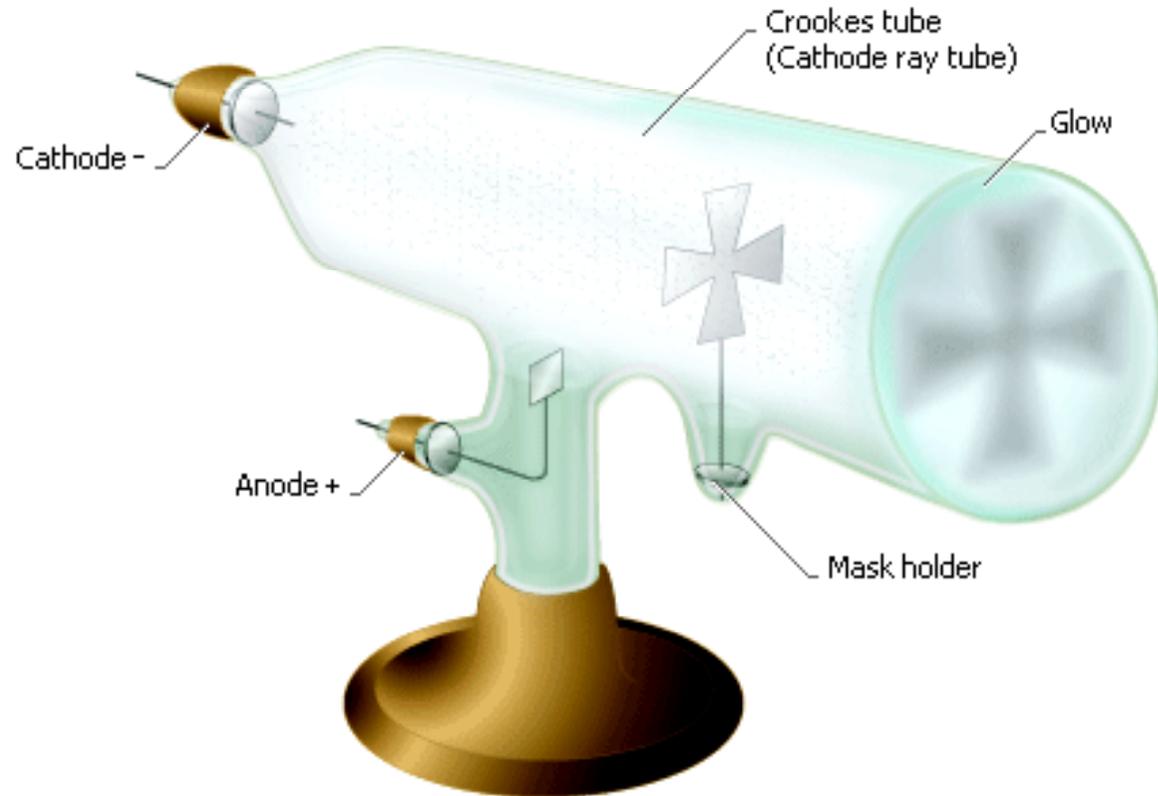
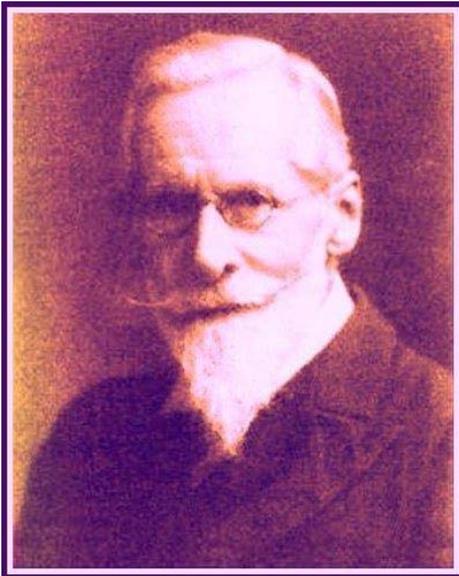


Dmitri Mendelejew  
1834-1907

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182
			Cr = 52	Mo = 96	W = 189
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
		Ni =	Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
			Zn = 65,2	Cd = 112	
			? = 68	Ur = 116	Au = 197?
			? = 70	Sn = 118	
			As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
			Se = 79,4	Te = 128?	
			Br = 80	I = 127	
			Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
			Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207
			? = 92		
			La = 94		
			Di = 95		
			Th = 118?		
H = 1	Be = 9,4	Mg = 24			
	B = 11	Al = 27,4			
	C = 12	Si = 28			
	N = 14	P = 31			
	O = 16	S = 32			
	F = 19	Cl = 35,5			
	Li = 7	K = 39			
		Ca = 40			
		? = 45			
		?Er = 56			
		?Yt = 60			
		?In = 75,6			

# Kathodenstrahlen: Werkzeug auf dem Weg zur Modernen Physik

W. Crookes 1879:



Faszinierte Beobachter dieser Experimente:

**W. C. Röntgen**

**H. Becquerel**

**J. J. Thomson**

# Unbekannte neue Strahlen



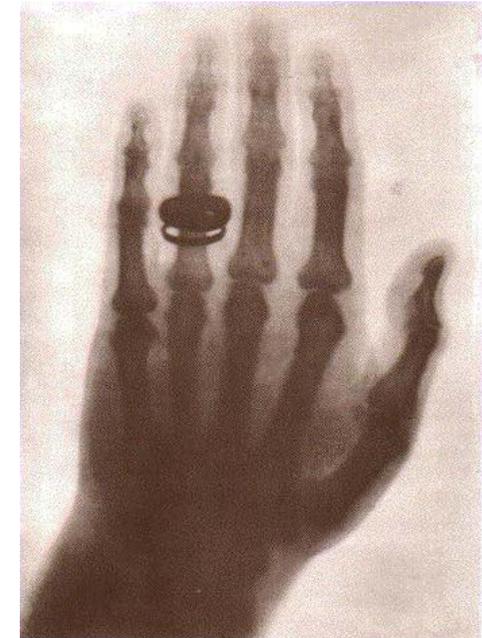
Wilhelm Conrad Röntgen  
1845-1923

## W. C. Röntgen

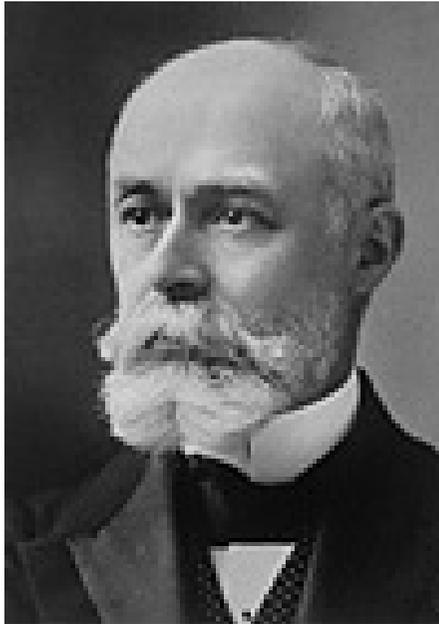
1879 – 1888  
08.Nov.1895  
10.Dez.1901

Physik-Professor in Gießen  
Entdeckung der X-Strahlen  
erster Nobelpreis für Physik

Eine optisch dicht eingepackte Entladungsröhre vermochte in einem dunklen Raum ein phosphoreszierendes Material zum Leuchten anzuregen (1895)



# Entdeckung der Radioaktivität



Antoine Henri  
Becquerel  
1852-1908

Nobelpreis  
1903  
zusammen mit  
Pierre und Marie  
Curie

## Aus Bequerels Nobelpreis-Vortrag

*66 - 1896 - 90. ... Sulfate double d'uranyle et de Potassium ...  
Papier noir - Curie de Curie ...  
Exposé au Salon le 27. de la Cour d'Oratoire ...  
Vendredi le 5 Mars.*

Verpackte  
Photoplatte

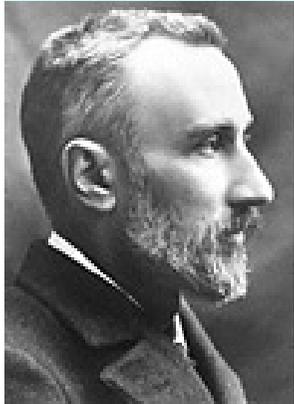


Verpackte  
Photoplatte  
mit  
Metallkreuz  
abgedeckt

Lumineszierendes Uransalz schwärzte eine optisch dicht verpackte Photoplatte ohne selbst durch Primärstrahlung (Licht, Wärme) angeregt zu werden; das Salz strahlt „von selbst“ (1896)

# Radioaktive Strahlung, radioaktive Elemente

Nobelpreis Physik 1903  
zusammen mit Henri Becquerel



Pierre Curie  
1859-1906



Marie Curie,  
geb. Sklodowska  
1867-1934

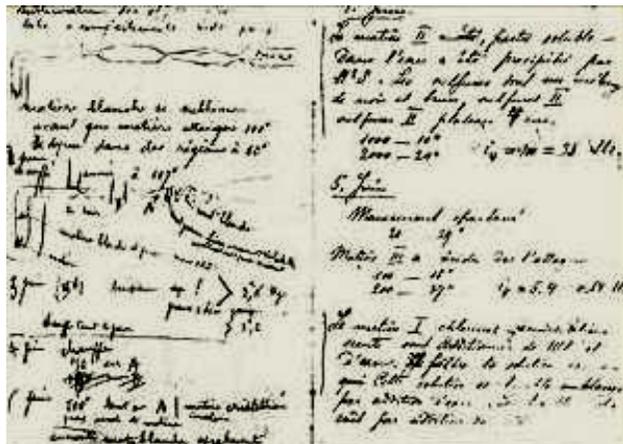
Nobelpreis  
Chemie  
1911

Entdeckung der  
Radioaktivität in Thorium,

Entdeckung der Elemente  
Polonium und Radium  
(beide 1898),

Isolation von reinem Radium  
aus Tonnen von Pechblende,

Untersuchung der  
Eigenschaften radioaktiver  
Strahlung



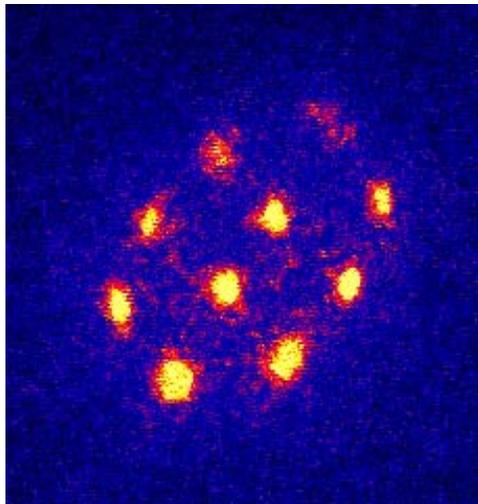
Laborbuch 1898

# Hauptthema dieser Vorlesung: Atomphysik



Institut für Atom- und Molekülphysik

24 Nobelpreisträger  
aus dem Bereich der  
Atom- und Molekül-  
physik seit 1986



**Kap. 2:**

**Größe von Atomen,**

**„Sichtbarmachen“ von Atomen**

# Atomare Masseneinheit

1 atomare Masseneinheit =  $1 m_u = 1/12 m(^{12}\text{C})$

$m(^{12}\text{C})$  : Masse des neutralen Kohlenstoffatoms

**CODATA\* 2006**

$$1 m_u = 1.660\,538\,782(83) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m_u / m_u = 5.0 \cdot 10^{-8}$$

$$1 m_u = 931.494\,028(23) \times 10^6 \text{ eV}/c^2$$

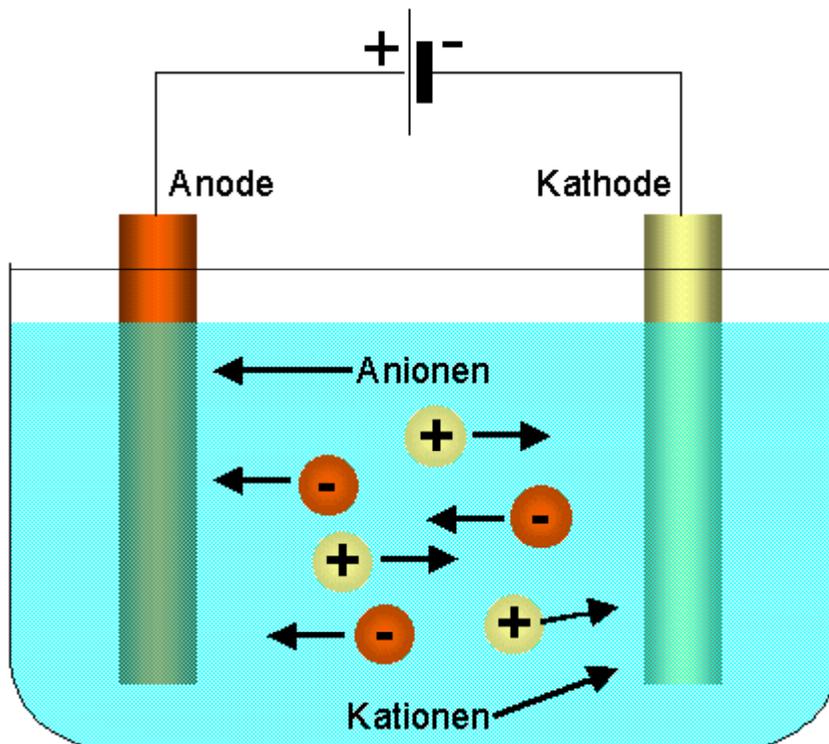
$$\Delta m_u / m_u = 2.5 \cdot 10^{-8}$$

\* CODATA: Committee on Data for Science and Technology

# Avogadro-Zahl aus der Elektrolyse

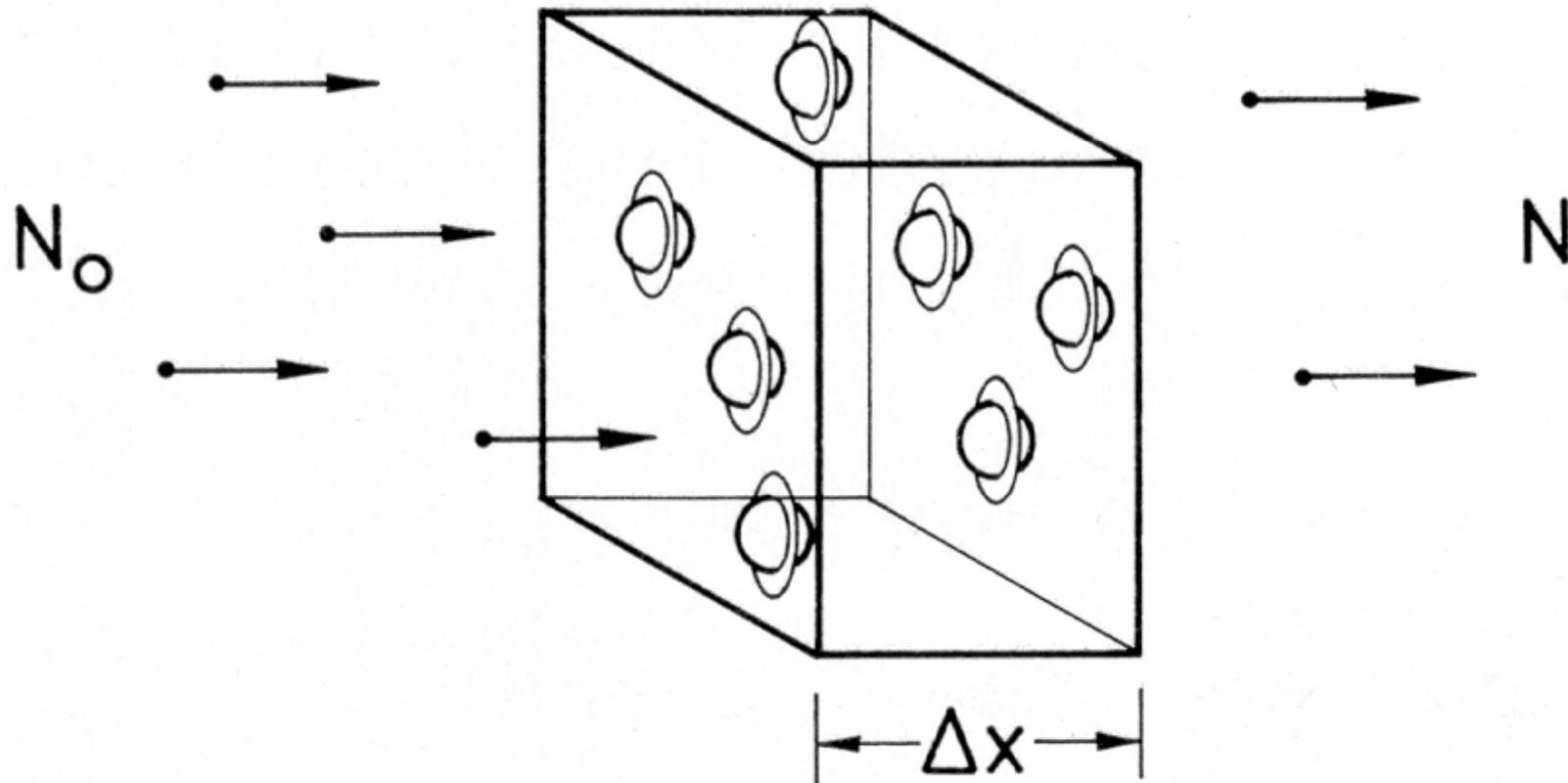
$$N_A = F / e$$

$F = 96\,485.3399(24) \text{ C mol}^{-1}$  durch Messung von Stromstärke und Zeit  
Separate Messung der Elementarladung notwendig



Der **Elektrolyt** kann z.B. wässrige **Silbernitratlösung** sein. Daraus werden **Ag<sup>+</sup> Ionen** zur negativen Elektrode transportiert und dort abgeschieden. Mit **96485 As** kann man  $96485 \cdot 1.118 \text{ mg} = 107.87 \text{ g}$  Silber abscheiden, d.h. **1 Mol Silber**.

# Streuung von Projektilen an Targets



# Der Begriff des Wirkungsquerschnitts

Ein Wirkungsquerschnitt hat als Einheit eine Fläche. Der Wirkungsquerschnitt sagt etwas über die **Reaktionswahrscheinlichkeit** von Teilchen und Quanten in ihren **Wechselwirkungsprozessen** aus.

Ausgangsvorstellung ist ein **Teilchenstrahl**, der eine Materiescheibe (ein **Target**) durchdringt und dabei bestimmte **Ereignisse** (z.B. eine chemische Reaktion oder die Emission von Elektronen einer bestimmten Energie in einen bestimmten Winkelbereich) auslöst.

Da die studierten Ereignisse auf atomarer und sub-atomarer Ebene ablaufen, kann man die um jedes Targetteilchen herum angeordnete Zielscheibe nicht sehen. Die **Größe der Zielscheibe** kann man nur **aus Streuexperimenten** ermitteln. Die Größe dieser Zielscheibe ergibt wichtige Aussagen über die Wechselwirkungsprozesse zwischen den beteiligten Stoßpartnern, sie wird als **Wirkungsquerschnitt** bezeichnet. Der Wirkungsquerschnitt für eine Wechselwirkung zwischen einem Teilchen und einem Atom kann sehr viel kleiner sein als die Projektionsfläche des Atoms.

Man unterscheidet totale, sowie einfach und mehrfach **differentielle Wirkungsquerschnitte**, je nachdem wie detailliert man das Streueignis definiert.

Bei der sogenannten Rutherfordstreuung beispielsweise wird der einfach differentielle Wirkungsquerschnitt  $d\sigma/d\Omega$  durch Beobachtung der Streuung in einen bestimmten Raumwinkelbereich  $d\Omega(\theta)$  ermittelt.

# Beispiel: Neutrino - Wirkungsquerschnitte

In jeder Sekunde werden wir von ca. **100 Billionen** ( $10^{14}$ ) **Neutrinos** durchdrungen

Neutrinos unterliegen der Schwachen Wechselwirkung → **kaum Reaktionen**

Ein Strahl von Neutrinos wird in Materie abgeschwächt gemäß

$$N_{\nu} = N_{\nu}(0) \exp\left(-\frac{x}{d}\right)$$

Die Materiestrecke, auf der die Strahlintensität auf  $1/e$  absinkt, ist

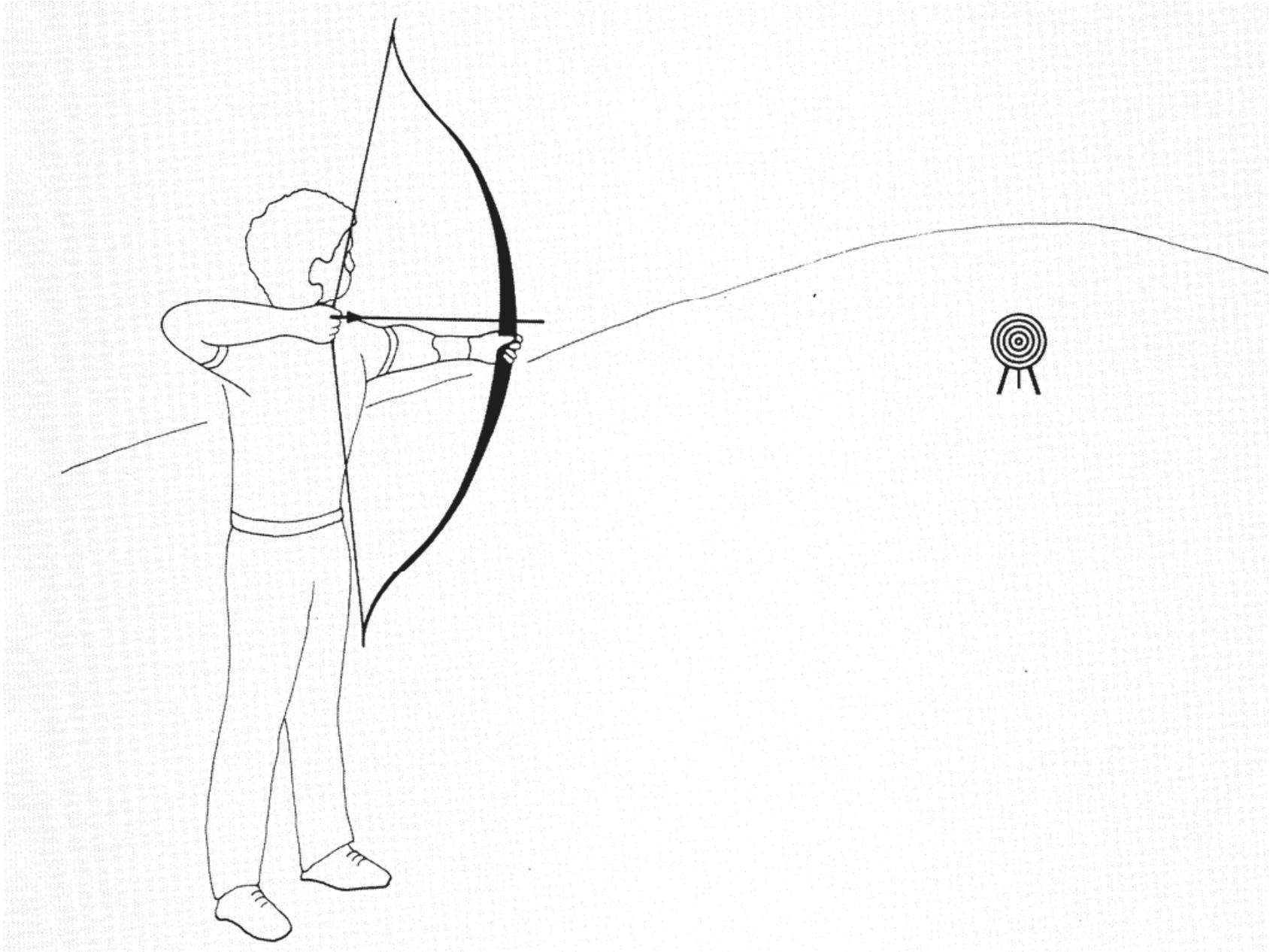
$$d = \frac{1}{n\sigma}$$

Dabei ist  $n$  die **Volumendichte** der Materieteilchen,  $\sigma$  **der sogenannte totale Wirkungsquerschnitt** für Neutrinostreuung.

Dieser Wirkungsquerschnitt ist von der Größenordnung  $\sigma = 10^{-43} \text{ cm}^2$ . Nimmt man die Atomdichte von Blei mit  $n = 11.34 \text{ g/cm}^3 \cdot 6 \cdot 10^{23} / 208 \text{ g} = 3.3 \cdot 10^{23} / \text{cm}^3$ , so ergibt sich  $d = 3 \cdot 10^{19} \text{ cm} = 10^9$  Lichtsekunden, bzw.  **$d = 32$  Lichtjahre.**

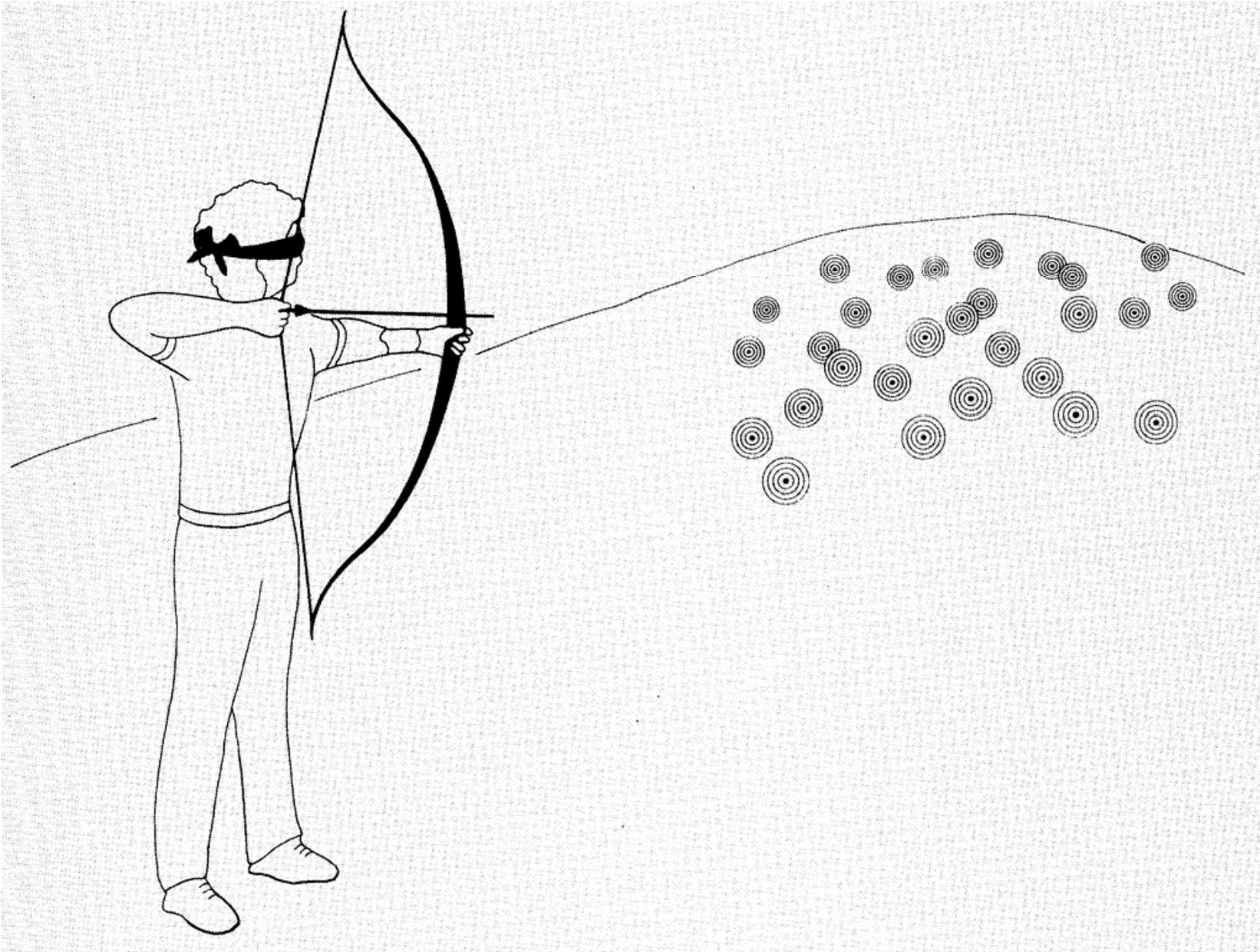
Würde man Bleikerne unmittelbar hintereinanderreihen, d.h.  $n \approx 10^{38} / \text{cm}^3$ , so wäre  $d = 1000 \text{ m}$ , die Neutrinos können mehr als  $10^{16}$  Bleikerne einfach durchdringen

# Normale Zielscheibe, Bogenschütze zielt auf Mitte



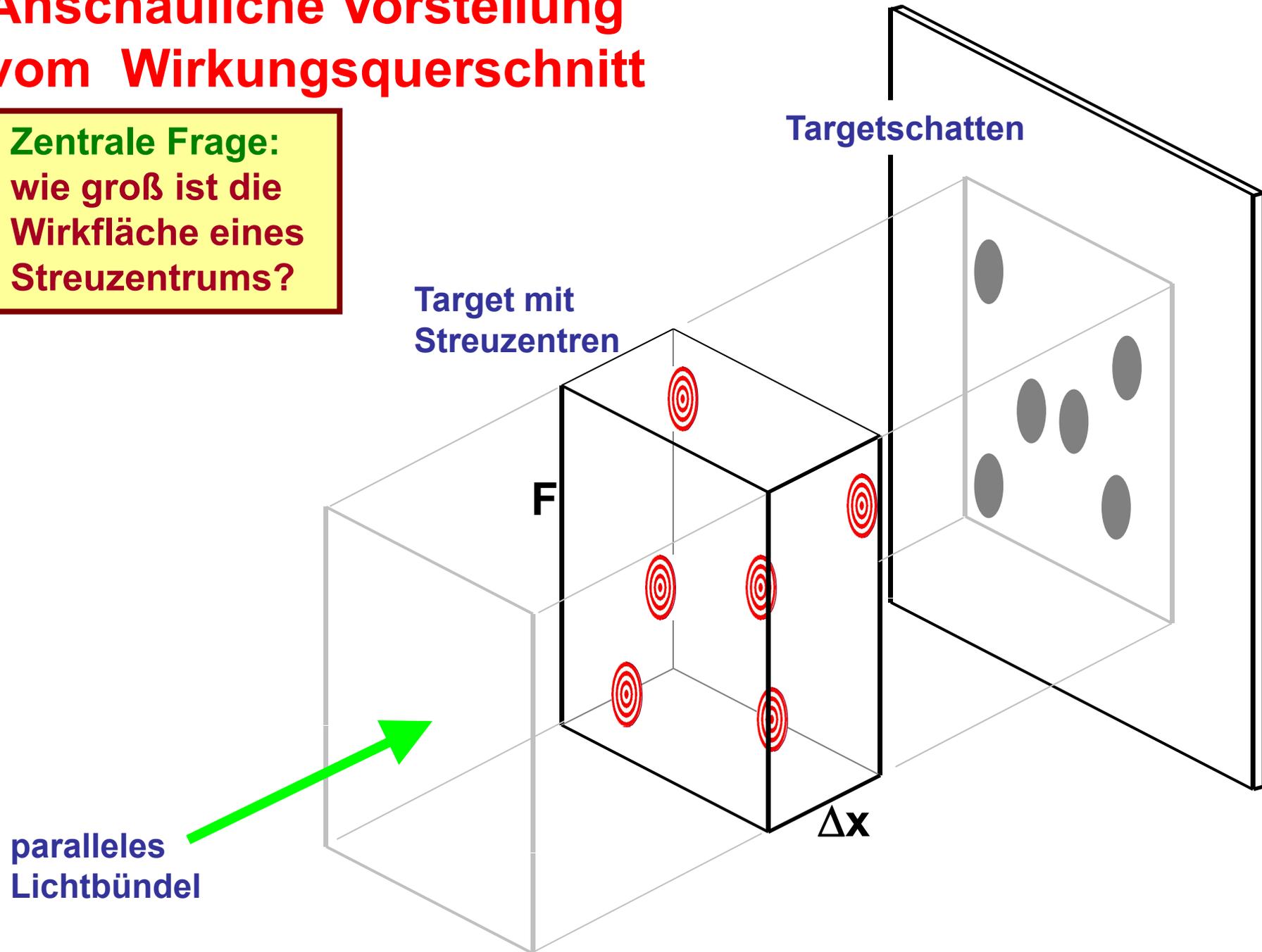
# Atomare Zielscheiben, Bogenschütze zielt blind

Es gibt aber viele Zielscheiben



# Anschauliche Vorstellung vom Wirkungsquerschnitt

**Zentrale Frage:**  
wie groß ist die  
Wirkfläche eines  
Streuzentrums?



# Anschauliche Vorstellung vom Wirkungsquerschnitt

räumliche Dichte der Streuzentren  $n$   
bekannt:

Beleuchtetes Targetvolumen

$$\Delta V = \Delta x \cdot F$$

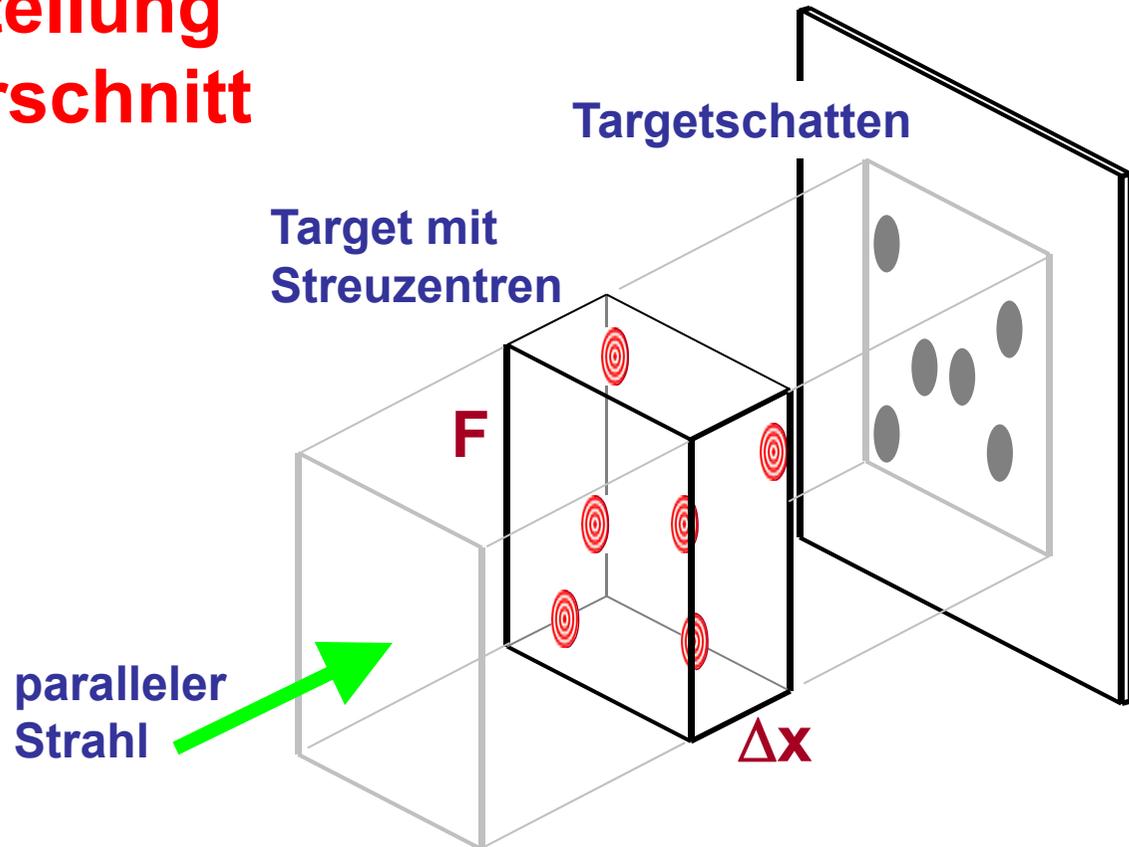
Zahl der beleuchteten Streuzentren

$$\Delta N = \Delta x \cdot F \cdot n$$

Flächendichte der Streuzentren

$$\Delta N/F = \Delta x \cdot n$$

(Flächenbelegung)



Wirkfläche der Streuzentren:  $\sigma$   
Messgröße Absorptionswahrscheinlichkeit =  
Schattenfläche/Gesamtfläche =  $\Delta P = \Delta N \cdot \sigma / F$   
 $= \Delta x \cdot n \cdot \sigma$

# Messung eines totalen Wirkungsquerschnitts

Schattenflächen i.a. viel zu klein für eine direkte Messung; die Zahl der Streuzentren ist dagegen sehr hoch

Beispiel:

Goldtarget mit

$F = 0.1 \text{ cm}^2$ ,  $\Delta x = 50 \mu\text{m}$

$\rho = 19.3 \text{ g/cm}^3$ ,  $M = 197 \text{ g}$ :

$$\Delta N = n \cdot F \Delta x$$

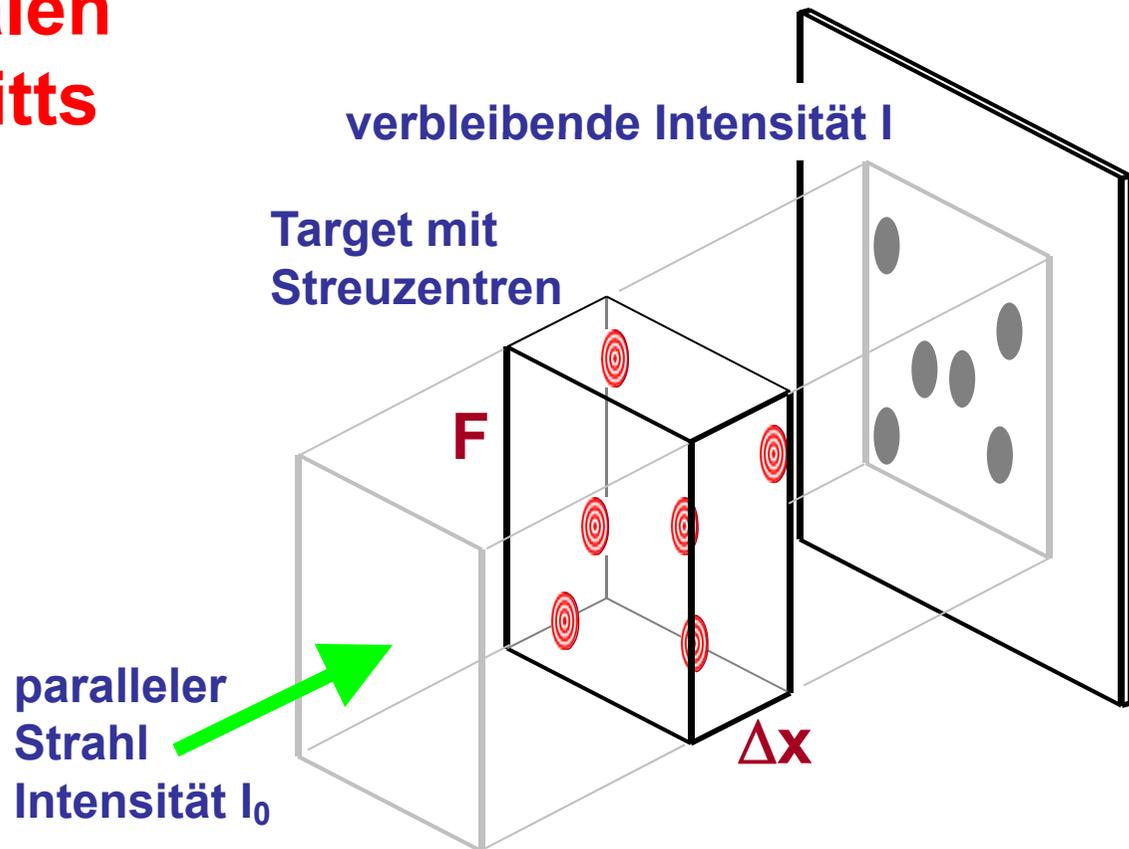
$$= \rho N_A / M \cdot F \Delta x$$

$$= 2.9 \cdot 10^{19} \text{ Au Atome}$$

Messmöglichkeit:

Bestimmung der

Strahlintensität mit ( $I$ )  
und ohne Target ( $I_0$ )



Falls für die Reaktionswahrscheinlichkeit gilt

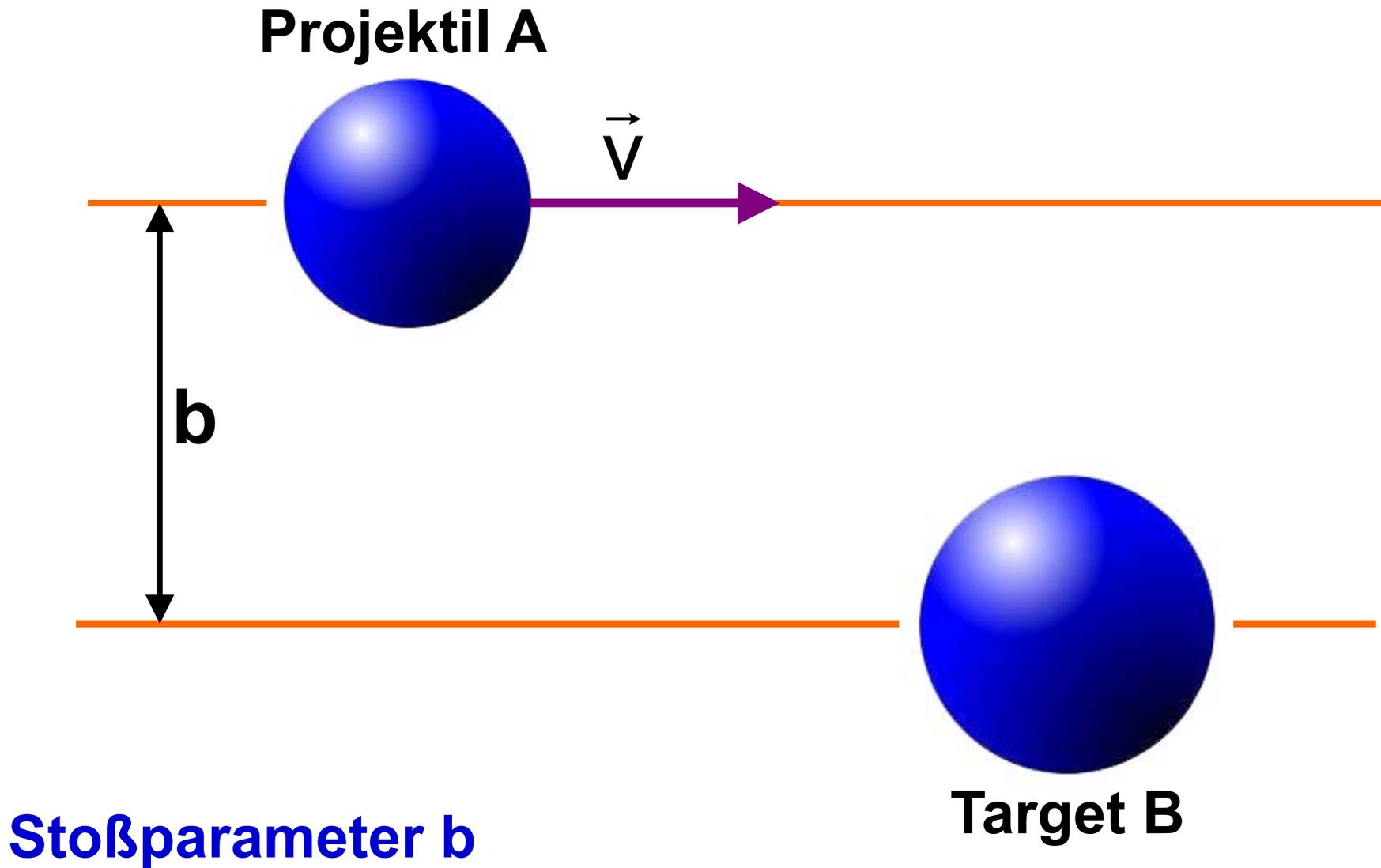
$P = (I_0 - I) / I_0 \ll 1$ , dann ist die Reaktionsrate

$$(I_0 - I) = R = I_0 \cdot \Delta N / F \cdot \sigma = I_0 \cdot n \cdot \Delta x \cdot \sigma$$

Damit ergibt sich  $\sigma$  aus makroskopisch

$$\text{messbaren Größen: } \sigma = R / (I_0 \cdot n \cdot \Delta x)$$

# Elastische Streuung starrer Kugeln



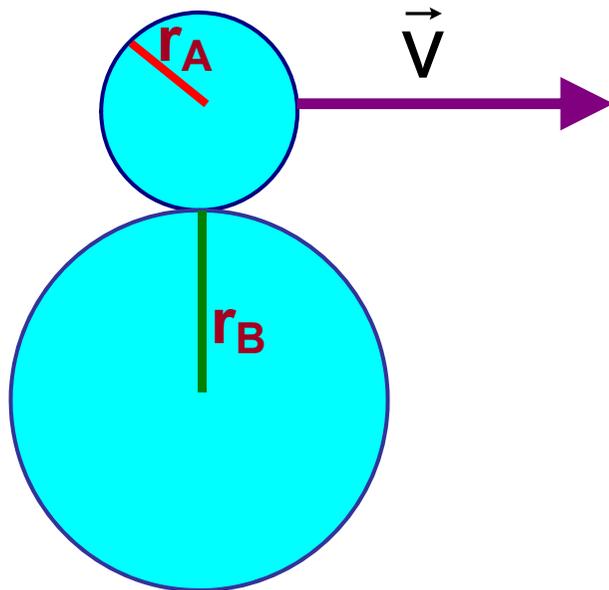
# Wirkungsquerschnitt für den Stoß starrer Kugeln

Gesucht:

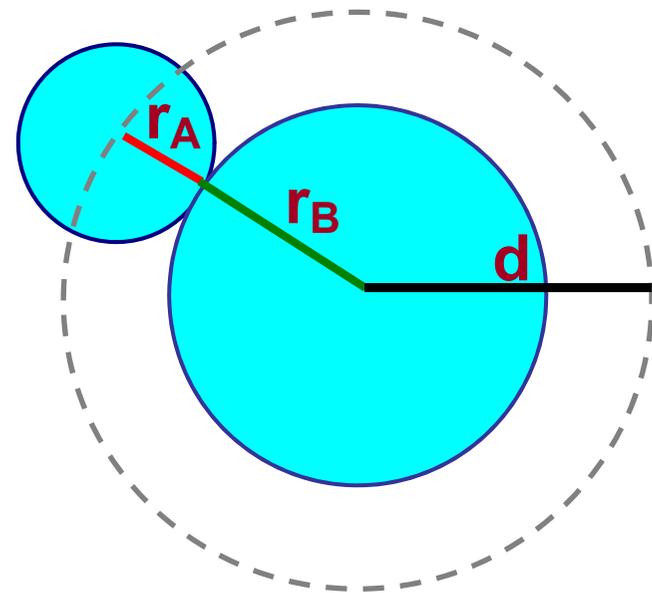
maximaler Stoßparameter  $b_{\max} = d$ , bei dem eine Streuung stattfindet.

Streuung tritt ein, wenn das Projektil das Target beim Stoß berührt, d.h. für  $b < r_A + r_B$ , d.h.  $b_{\max} = d = r_A + r_B$

Seitenansicht

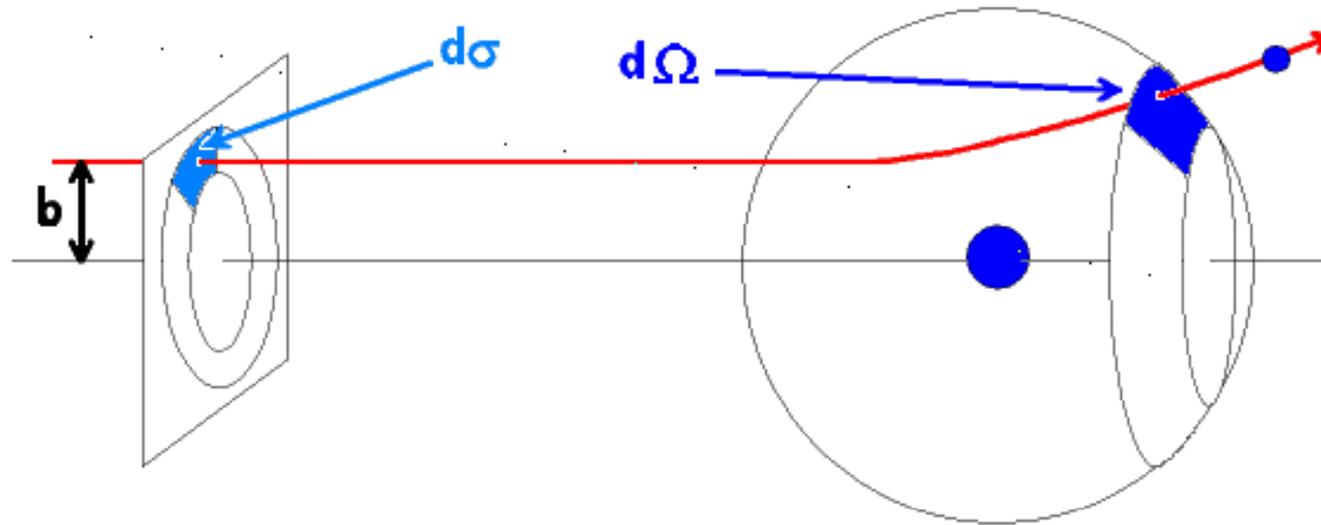


Frontalansicht in Richtung der Projektiltrajektorie



Totaler Wirkungsquerschnitt:  $\sigma = \pi \cdot (r_A + r_B)^2$

# (Winkel-)Differentieller Wirkungsquerschnitt



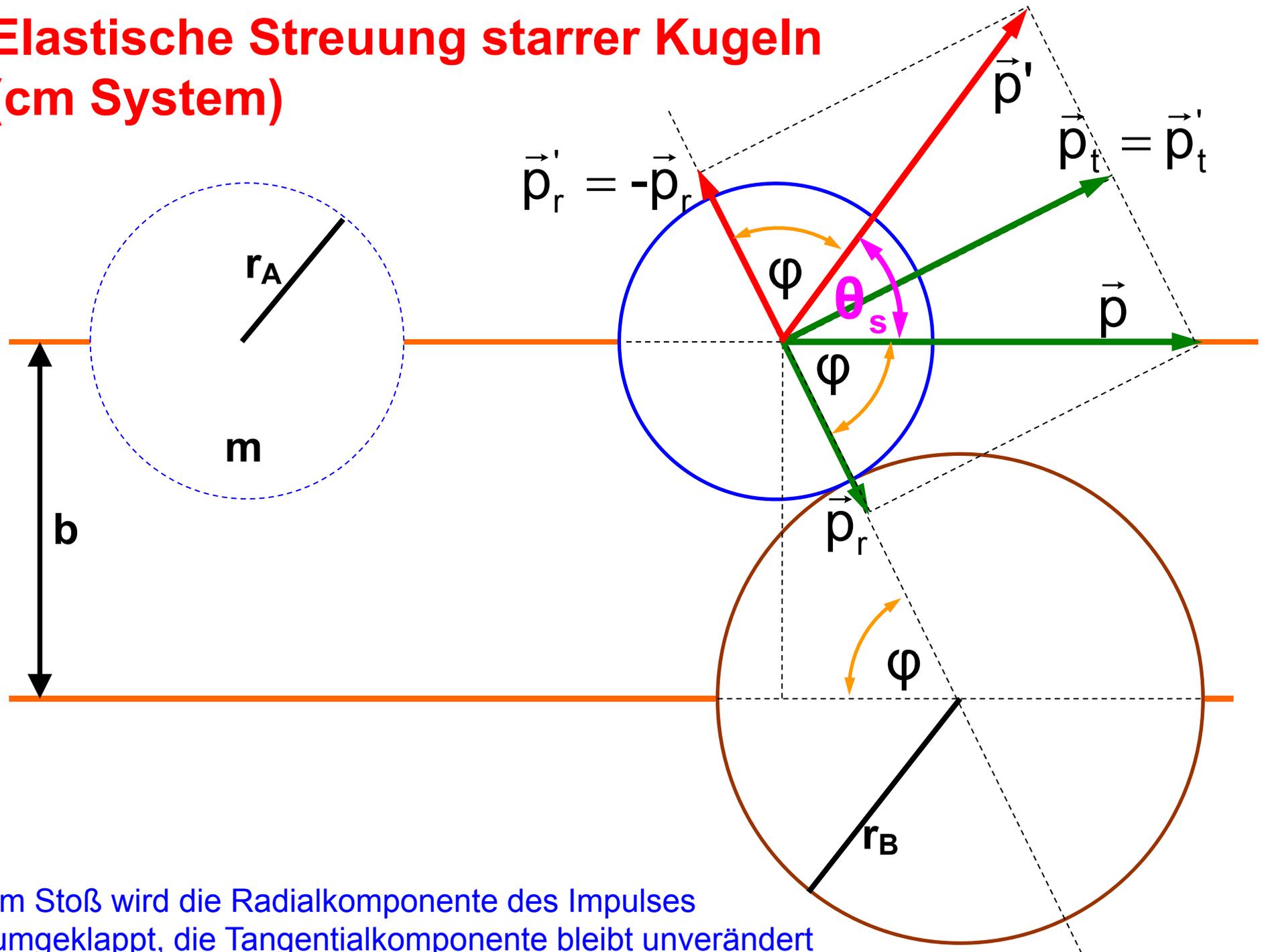
Treten Projektile durch die Wirkungs-Teilfläche  $d\sigma$ , so werden sie in das Raumwinkelement  $d\Omega$  (unter dem Winkel  $\theta$ ) gestreut

$$d\sigma = \Delta\varphi \cdot b db$$

$$d\Omega = \Delta\varphi \cdot \sin\theta d\theta$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{b}{\sin\theta} \left| \frac{db}{d\theta} \right|$$

# Elastische Streuung starrer Kugeln (cm System)



Im Stoß wird die Radialkomponente des Impulses umgeklappt, die Tangentialkomponente bleibt unverändert

# Wirkungsquerschnitt für elastische Streuung starrer Kugeln

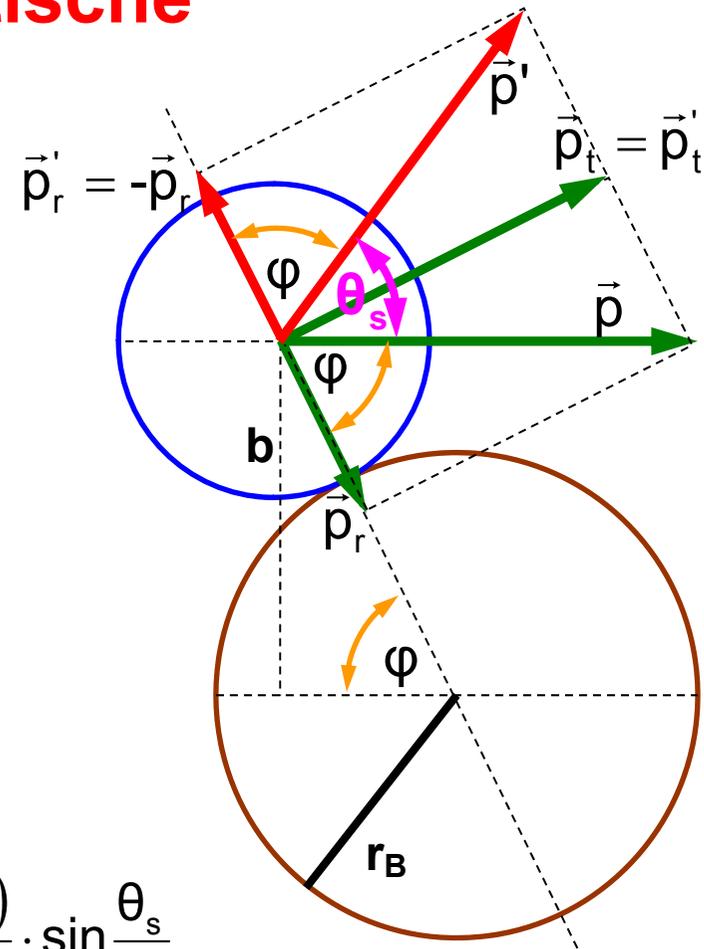
$$\sin\varphi = \frac{b}{r_A + r_B}$$

$$b = (r_A + r_B) \cdot \sin\varphi = (r_A + r_B) \cdot \sin\left(\frac{180^\circ - \theta_s}{2}\right)$$

$$b = (r_A + r_B) \cdot \cos\frac{\theta_s}{2}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta_s) = \frac{b}{\sin\theta_s} \left| \frac{db}{d\theta_s} \right| = \frac{(r_A + r_B) \cdot \cos\frac{\theta_s}{2}}{2\sin\frac{\theta_s}{2} \cdot \cos\frac{\theta_s}{2}} \cdot \frac{(r_A + r_B)}{2} \cdot \sin\frac{\theta_s}{2}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta_s) = \frac{(r_A + r_B)^2}{4}$$



winkelunabhängiger differentieller Wirkungsquerschnitt

# Schwerpunktsystem $\leftrightarrow$ Laborsystem

Targetteilchen sei zunächst in Ruhe; es nimmt im Stoß einen Impuls auf,

Bei elastischer Streuung gilt:

## Schwerpunktsystem:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{cm}}}, \theta_{\text{cm}}, v_0$$

### vor dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{cm}} = \frac{m}{2} v_0^2$$

### nach dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{cm}} = \frac{m}{2} v_0^2$$

## Laborsystem:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{Lab}}}, \theta_{\text{Lab}}, v_0, v_1, v_2$$

### vor dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{Lab}} = \frac{m_1}{2} v_0^2$$

### nach dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{Lab}} = \frac{m_1}{2} v_1^2 + \frac{m_2}{2} v_2^2$$

## Umrechnungen cm $\leftrightarrow$ Lab (nicht-relativistisch)

$$\frac{d\sigma(\theta_{\text{Lab}})}{d\Omega_{\text{Lab}}} = \frac{d\sigma(\theta_{\text{cm}})}{d\Omega_{\text{cm}}} \frac{d\Omega_{\text{cm}}}{d\Omega_{\text{Lab}}} = \frac{d\sigma(\theta_{\text{cm}}(\theta_{\text{Lab}}))}{d\Omega_{\text{cm}}} \frac{\sin\theta_{\text{cm}} d\theta_{\text{cm}}}{\sin\theta_{\text{Lab}} d\theta_{\text{Lab}}}$$

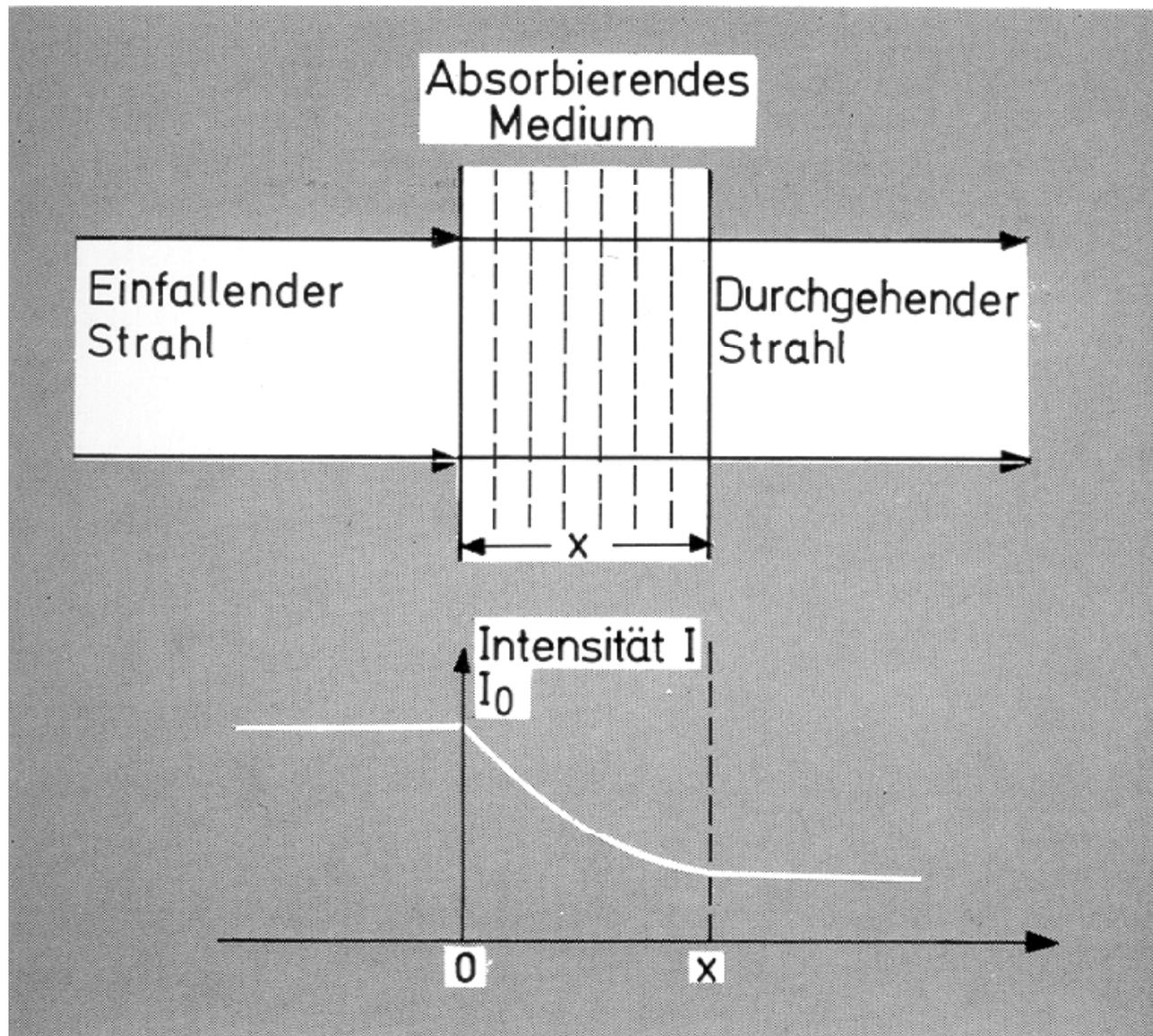
### Elastische Streuung:

$$\theta_{\text{Lab}} = \arctan\left(\frac{\sin\theta_{\text{cm}}}{\cos\theta_{\text{cm}} + m_1/m_2}\right)$$

$$\theta_{\text{cm}} = \arcsin\left[\frac{m_1}{m_2} \sin\theta_{\text{Lab}} \cos\theta_{\text{Lab}} \pm \sin\theta_{\text{Lab}} \sqrt{1 - \left(\frac{m_1}{m_2} \sin\theta_{\text{Lab}}\right)^2}\right]$$

$$v_1 = v_0 \frac{m_1}{m_1 + m_2} \left[ \cos\theta_{\text{Lab}} \pm \sqrt{(\cos\theta_{\text{Lab}})^2 + \frac{(m_2^2 - m_1^2)}{m_1^2}} \right]$$

# Abnahme der Zahl ungestreuter Projektile

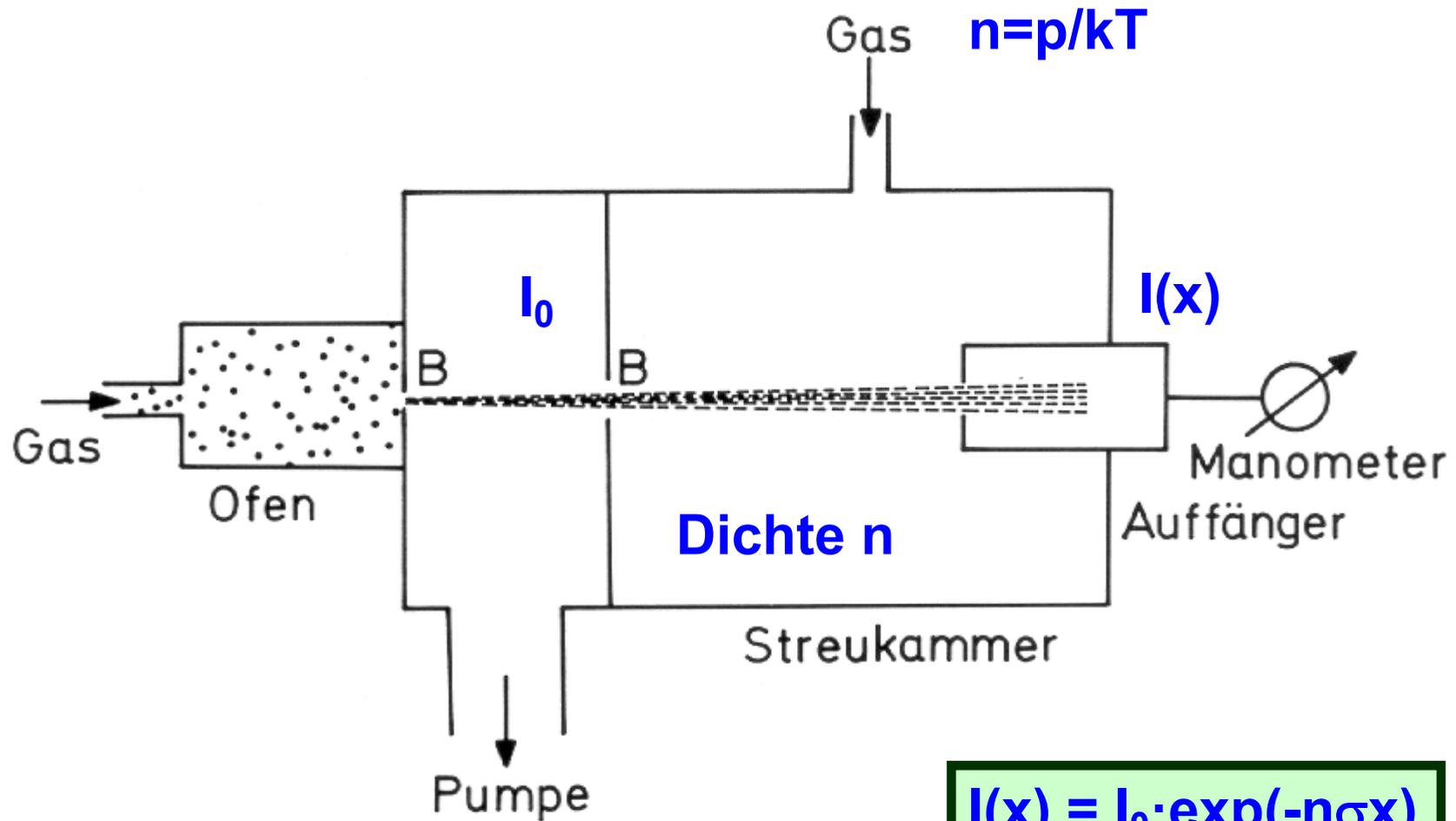


**Totaler Wirkungsquerschnitt starrer Kugeln:**  
$$\sigma = \pi \cdot (r_A + r_B)^2$$

**Idee:**  
**Bestimmung von Atomradien durch Streuexperimente**

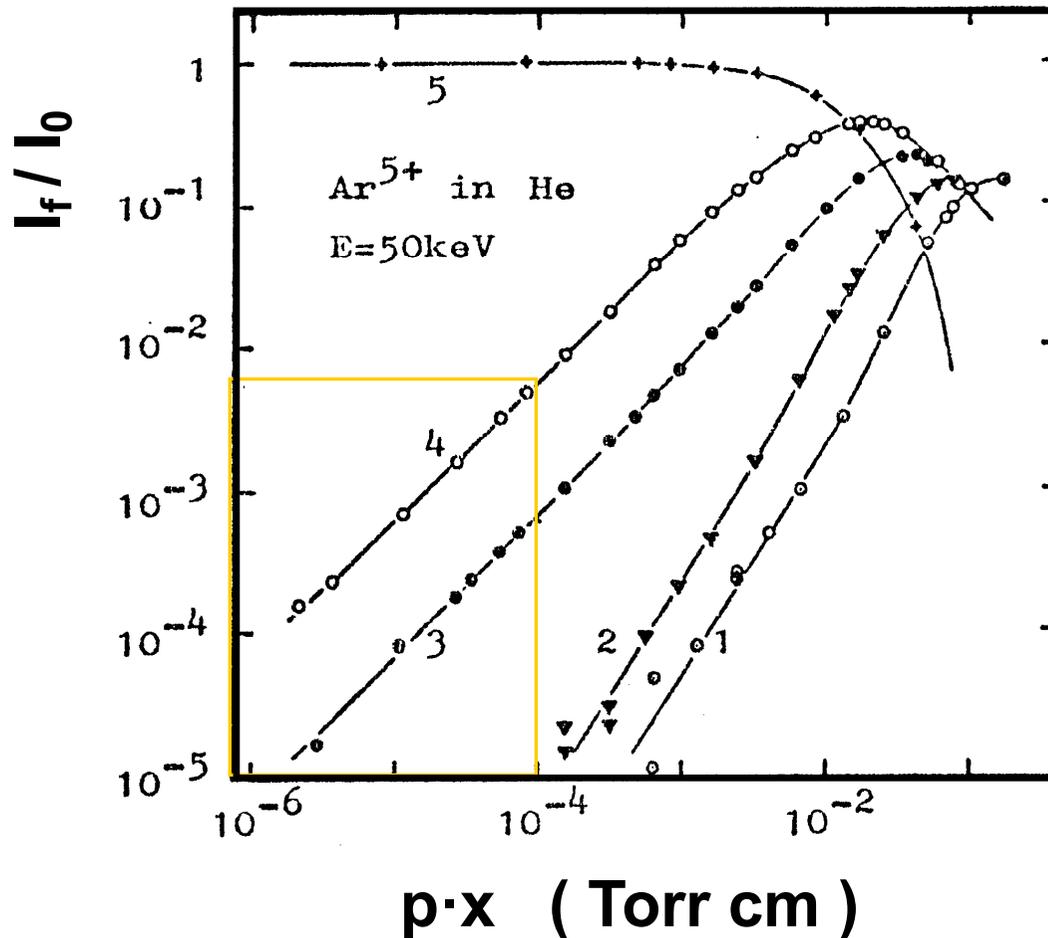
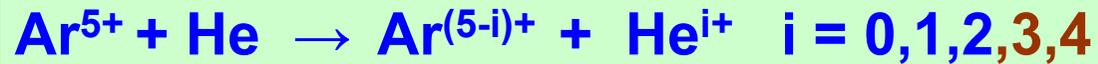
# Bestimmung von Atomdurchmessern Streuexperimente mit Atomstrahlen

Pionierarbeiten von Max Born durchgeführt



# Einzelstoßbedingung

Beispiel: Ladungstransfer in Ion-Atom Stößen



$$I_4 / I_0 = \sigma_{5,4} \cdot n \cdot x$$
$$= \sigma_{5,4} \cdot (p/kT) x$$

$$\sigma_{5,4} \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$$

# Atomgröße aus Kenntnis der Avogadro-Zahl

Siehe Präsenzübung: Volumen eines Atoms in flüssigem Helium unter der Annahme einer dichten Kugelpackung

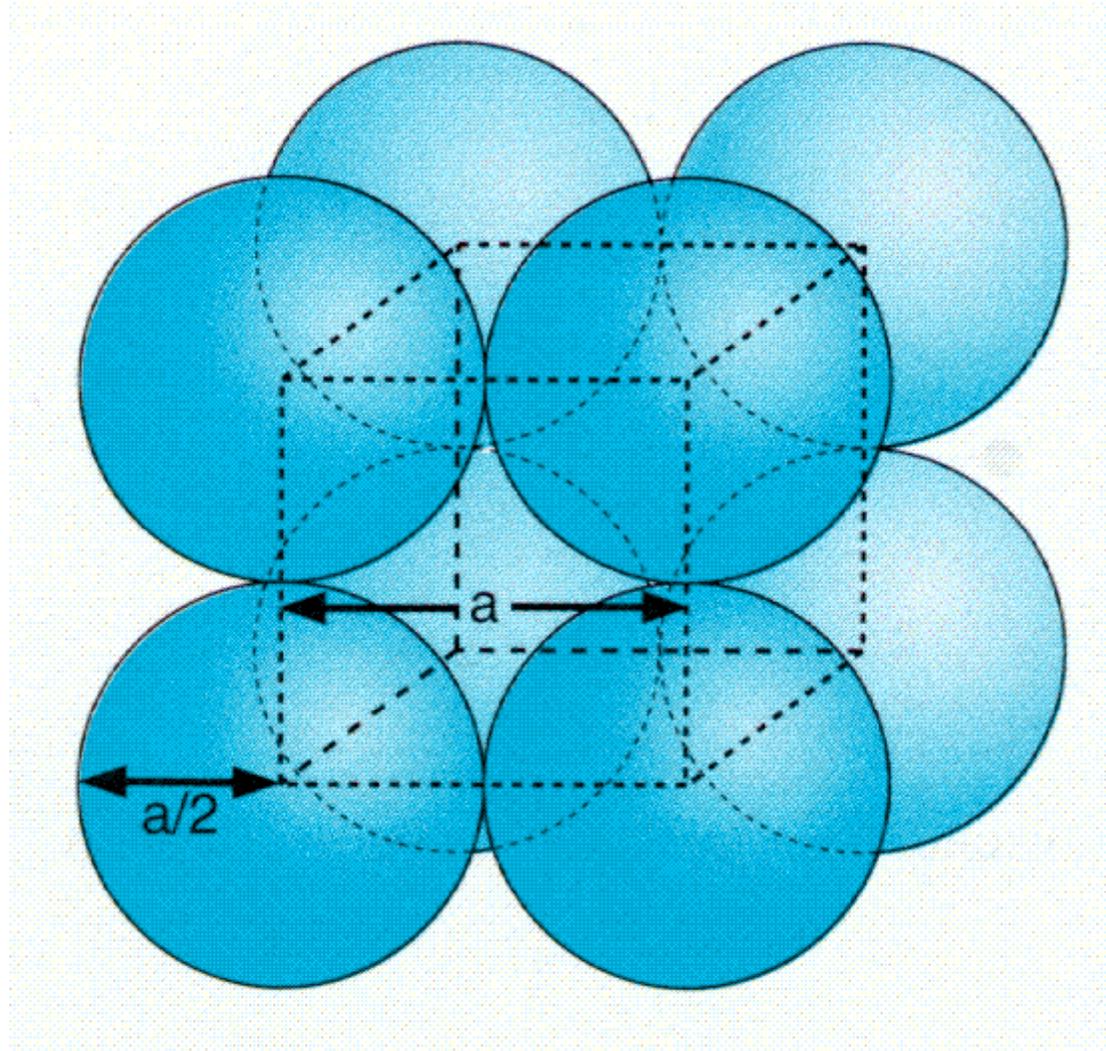
Annahme von Wassermolekülen in einem Einheitswürfel der Kantenlänge  $a$  ergibt als Molekülradius  $a \approx 3.1 \text{ \AA}$

## Öltröpfchenmethode

Experiment

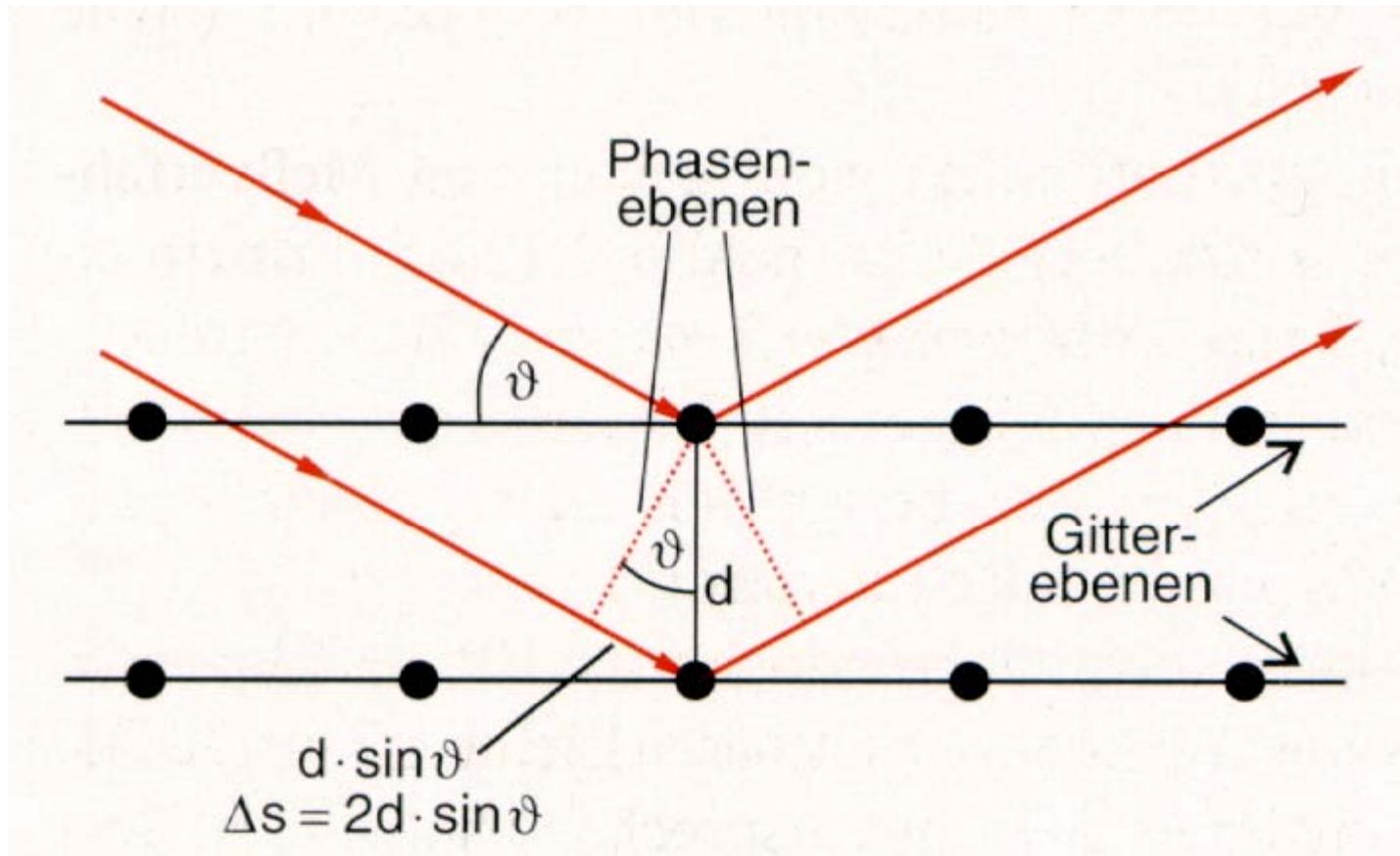
Tropfen mit Volumen  $V_{\text{Tropfen}}$  breitet sich zu einer monomolekularen Schicht der Dicke  $h$  auf einer Fläche  $F$  auf Wasser aus. Der Moleküldurchmesser ergibt sich zu  $h = V_{\text{Tropfen}} / F$

# Atomgröße aus der Packungsdichte in Kristallen



Abstand  $a$  ist der zweifache Atomradius

# Beugung an Kristallen: Bragg Bedingung



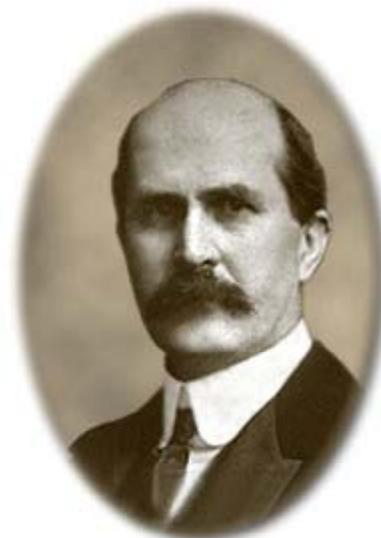
Konstruktive Interferenz, wenn  $\Delta s = 2d \cdot \sin \vartheta = m \cdot \lambda$

$m = 1, 2, 3$

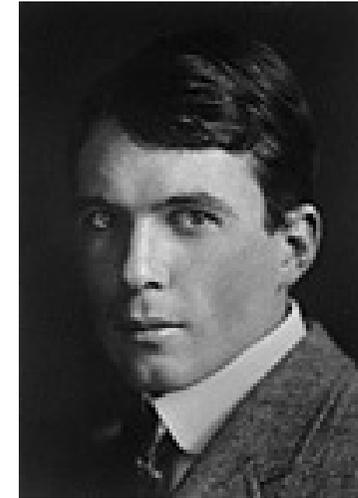
# Röntgenbeugung an Kristallen



Max von Laue  
(1879 – 1960)

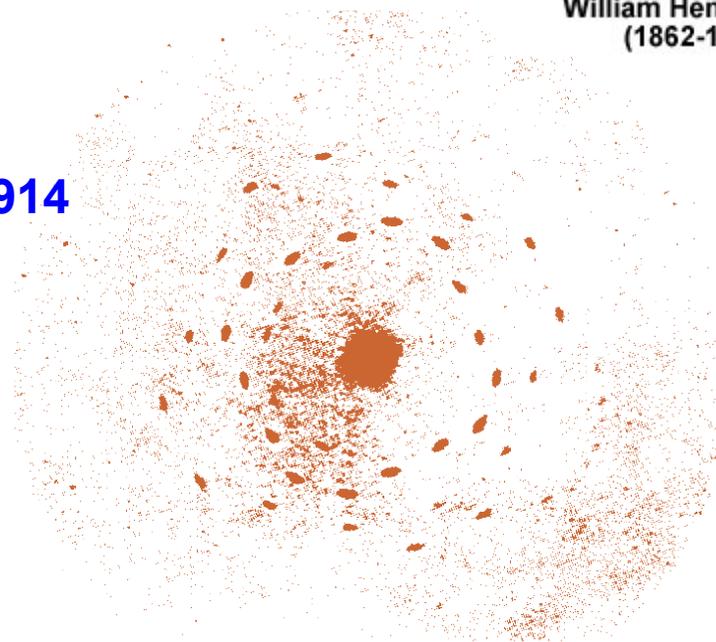


William Henry Bragg  
(1862-1942)



William Lawrence Bragg  
(1890 – 1971)

**Nobelpreis 1914**

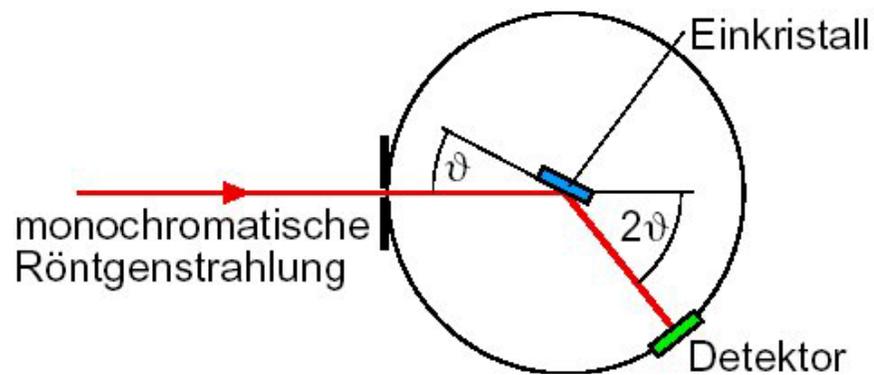


**Nobelpreis 1915**

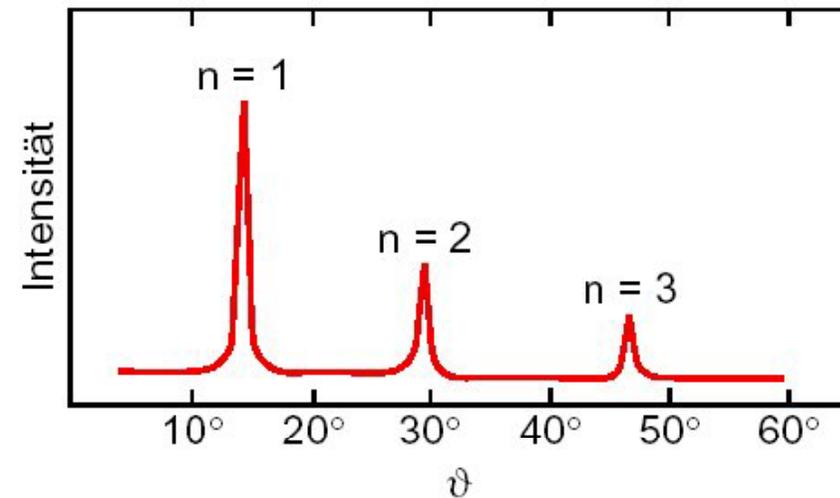
# Braggsche Röntgenbeugung (monochromatische Röntgenstrahlung))

Reflexion von einem drehbaren Einkristall  
(Detektor wird mit dem Kristall mitgeschwenkt):

Beugungsmaxima bei unterschiedlich indizierten Gitterebenen

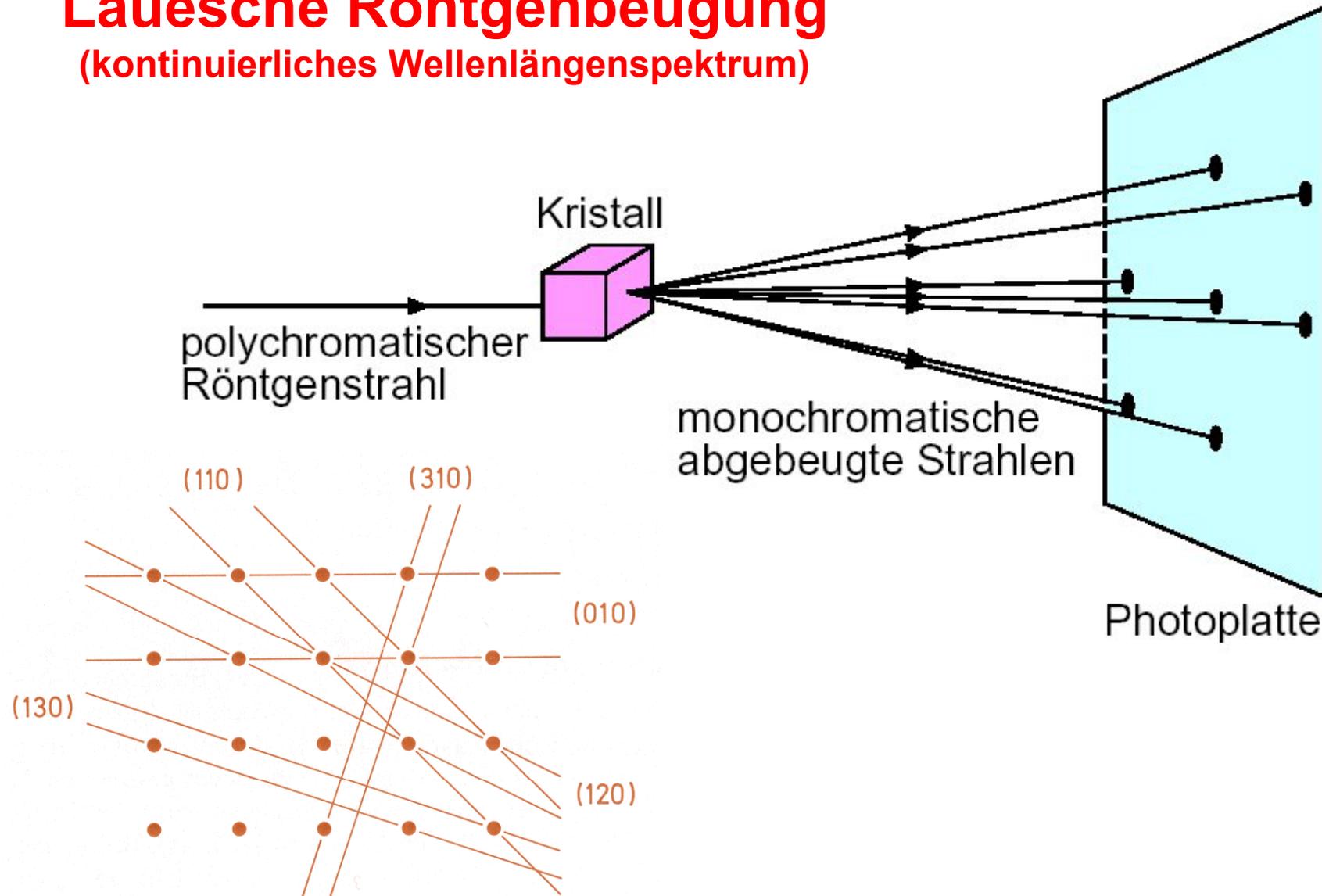


Schema einer Vorrichtung zur Aufnahme eines Röntgenspektrums nach dem Drehkristallverfahren



Röntgenspektrum nach dem Drehkristallverfahren

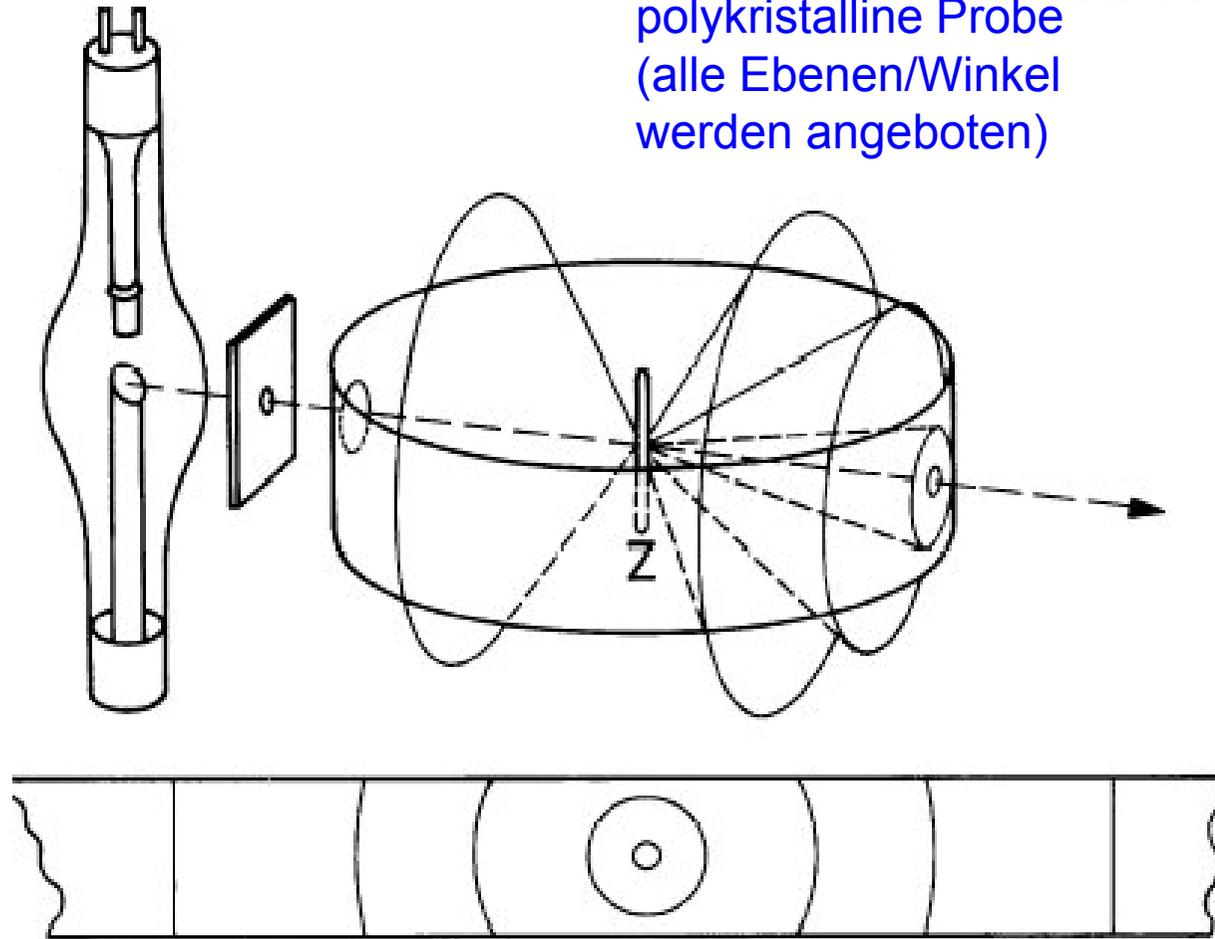
# Lauesche Röntgenbeugung (kontinuierliches Wellenlängenspektrum)



Im Kristall treten unterschiedlich indizierte Gitterebenen auf  
Konstruktive Interferenz nur bei den passenden Wellenlängen

# Debye-Scherrer Verfahren der Röntgenbeugung

Monochromatisches Licht,  
polykristalline Probe  
(alle Ebenen/Winkel  
werden angeboten)



jeweils unter einem bestimmten Streuwinkel (bzw. Abstand von der Strahlachse) bekommt man für eine eindeutig indizierte Gitterebene ein Intensitätsmaximum



**Paul Scherrer**  
1890 - 1969

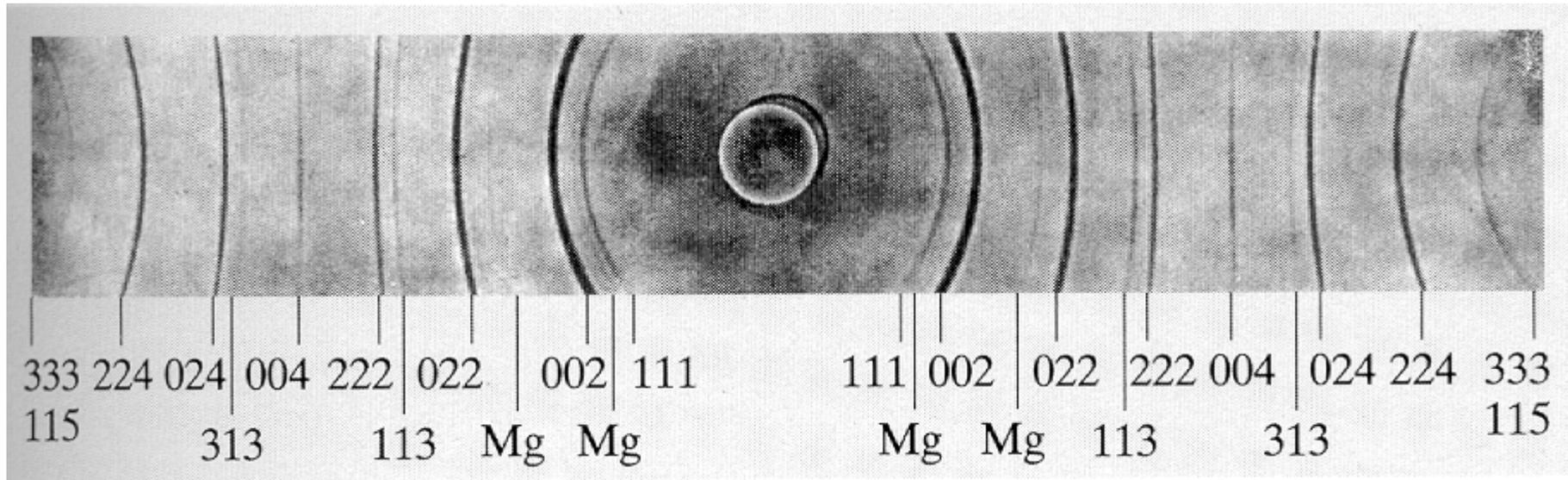


**Petrus (Peter)  
Josephus  
Wilhelmus Debye**  
1884 - 1966

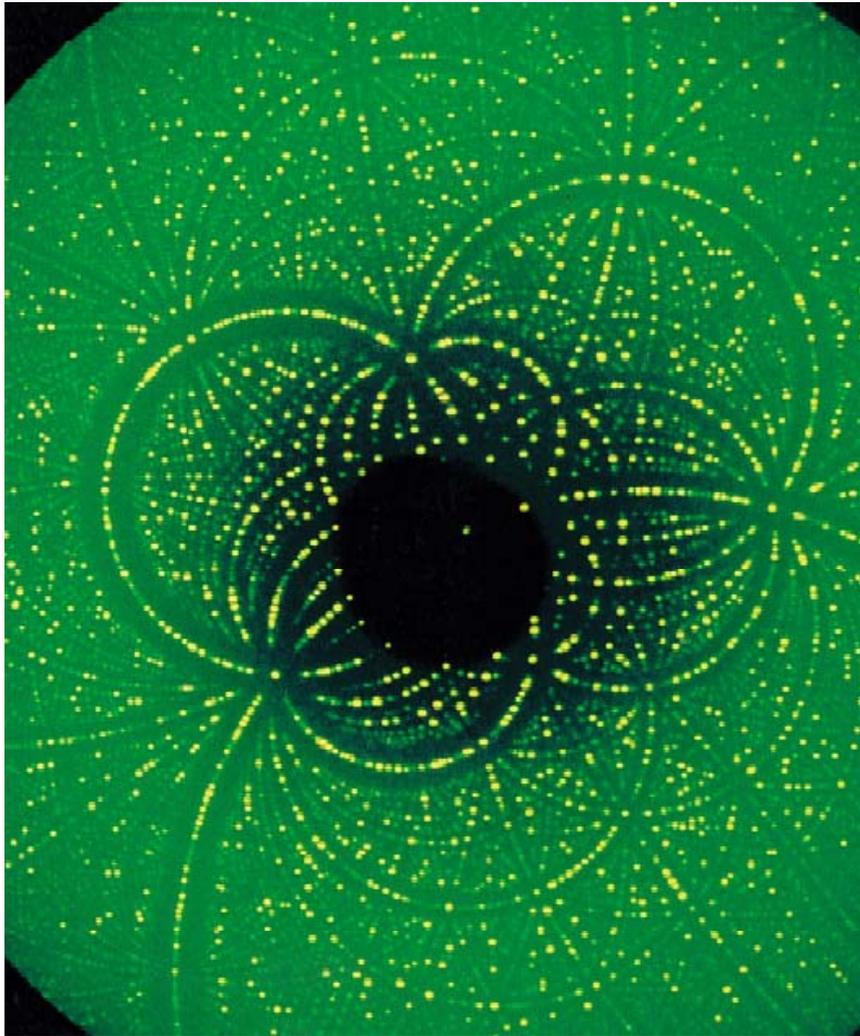
**Nobelpreis  
Chemie 1936**

# Debye-Scherrer Aufnahme von MgO Pulver

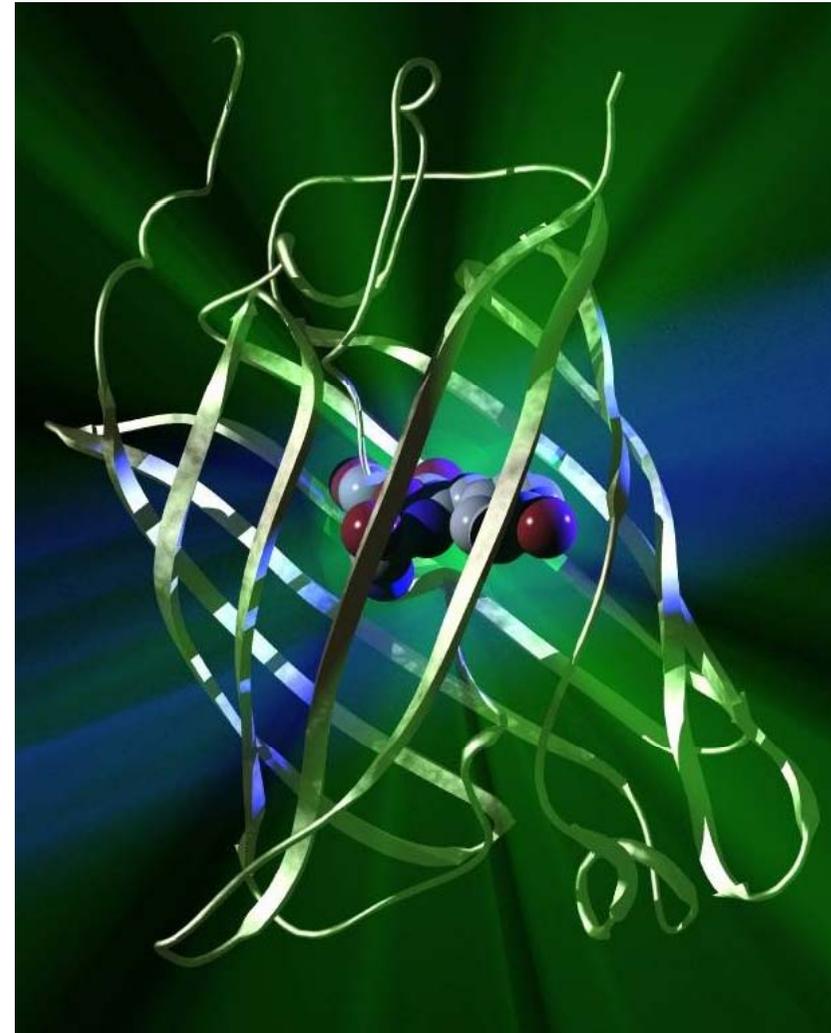
MgO Pulver, „resonante“ Ebenenscharen sind mit Laueschen Indizes bezeichnet



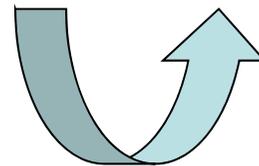
# Röntgen-Beugung an kristallisierten Biomolekülen



Die hier dargestellten Bilder gehören nicht unmittelbar zusammen



Aus einem gemessenen Beugungsmuster erhält man durch geeignete Rückrechnung (Transformation)

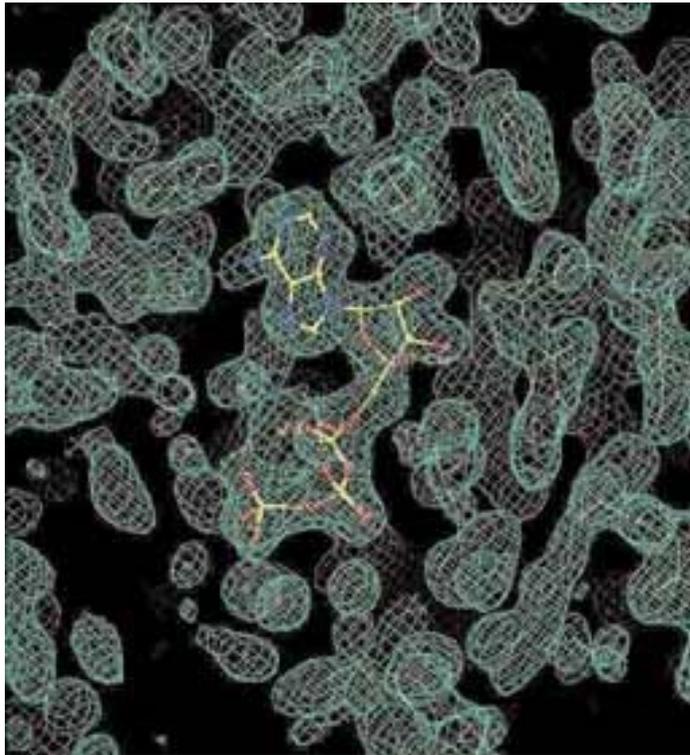


Information über Aufbau und Struktur auch von komplexen Molekülen

# Röntgen-Strukturanalyse von Biomolekülen

Standardtechnik:

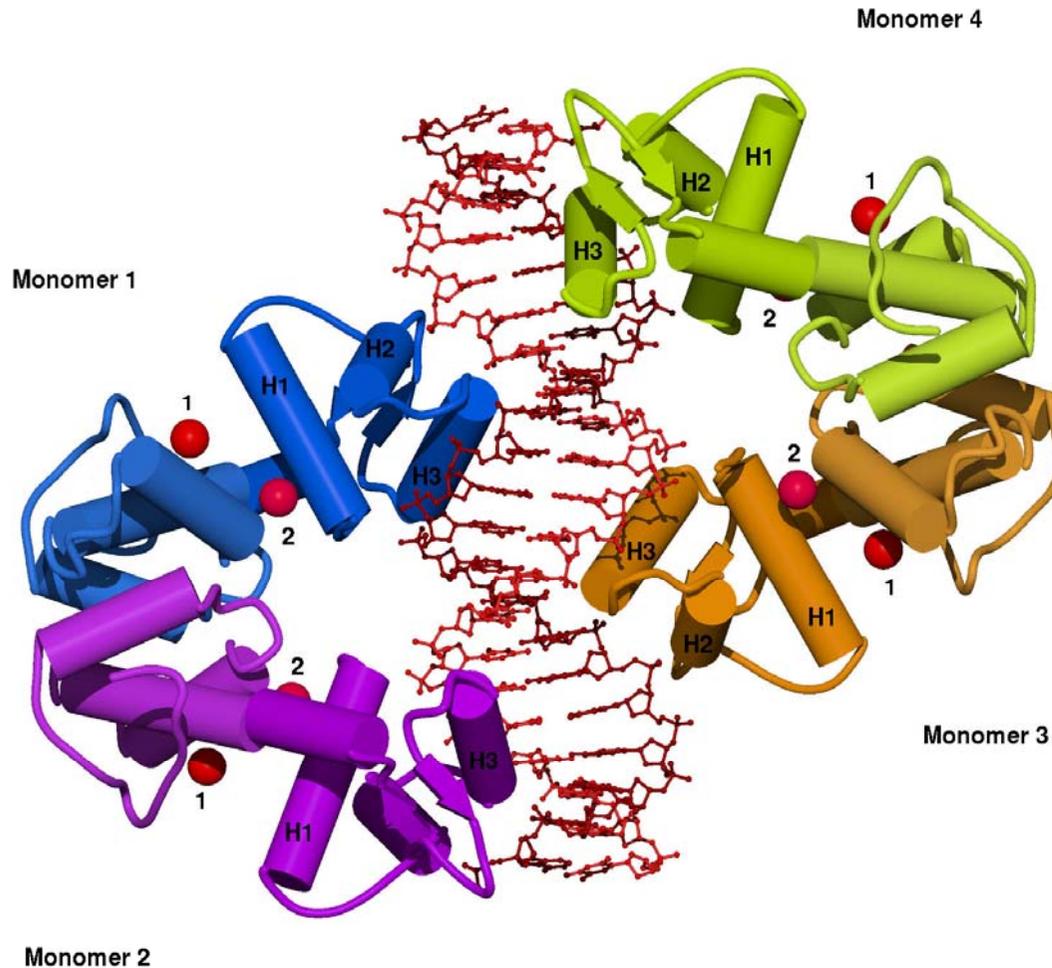
Kristallisierung  
Röntgenbeugung  
Computeranalyse



Beobachtung von  
Elektronendichteverteilungen

# Zukunft mit Röntgen Laser

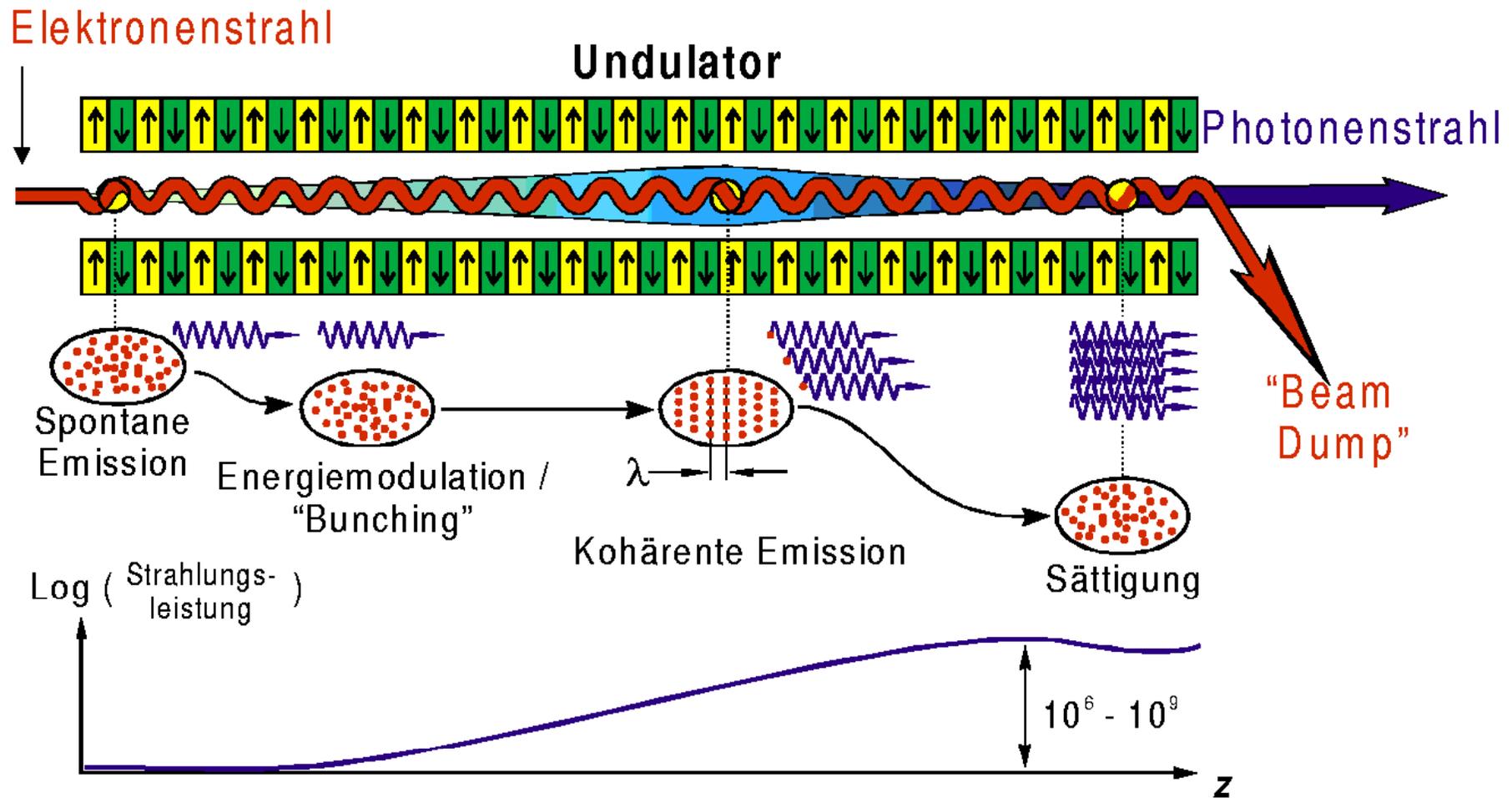
**Protein-DNA-Komplex**  
untersucht mit der Methode  
der Proteinkristallographie



Komplexe aus DNA und Proteinen extrem schwierig zu kristallisieren. Um ihre Struktur und Funktion im lebenden Organismus aufzuklären, bietet der Röntgenlaser neue Möglichkeiten, die ohne die herkömmliche Kristallisation auskommen.

# Röntgenlaser SASE-FEL:

self-amplification of spontaneous emission - free-electron laser

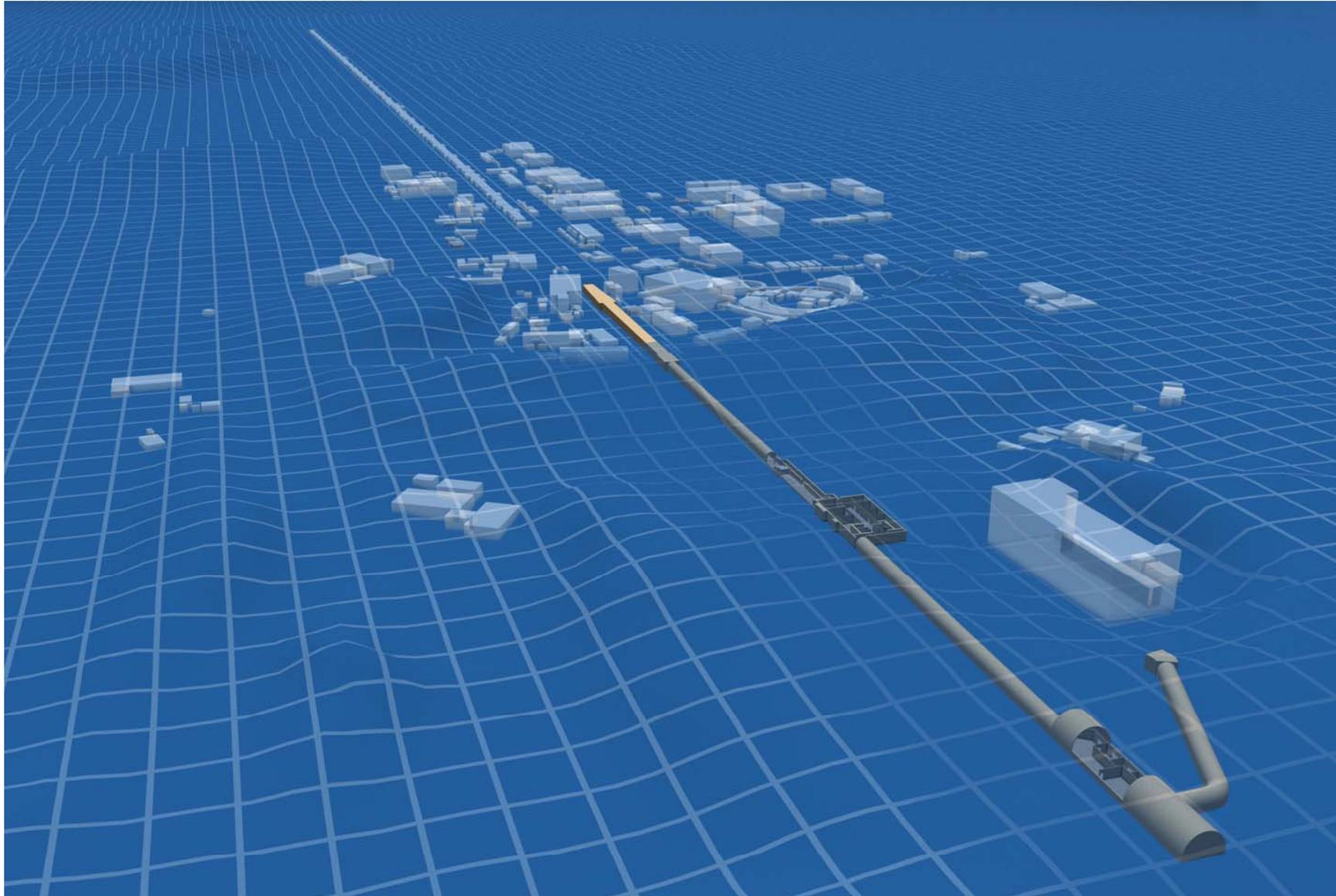


# LCLS\* Stanford - Undulatorstruktur



\* Linac Coherent Light Source

# LCLS Stanford

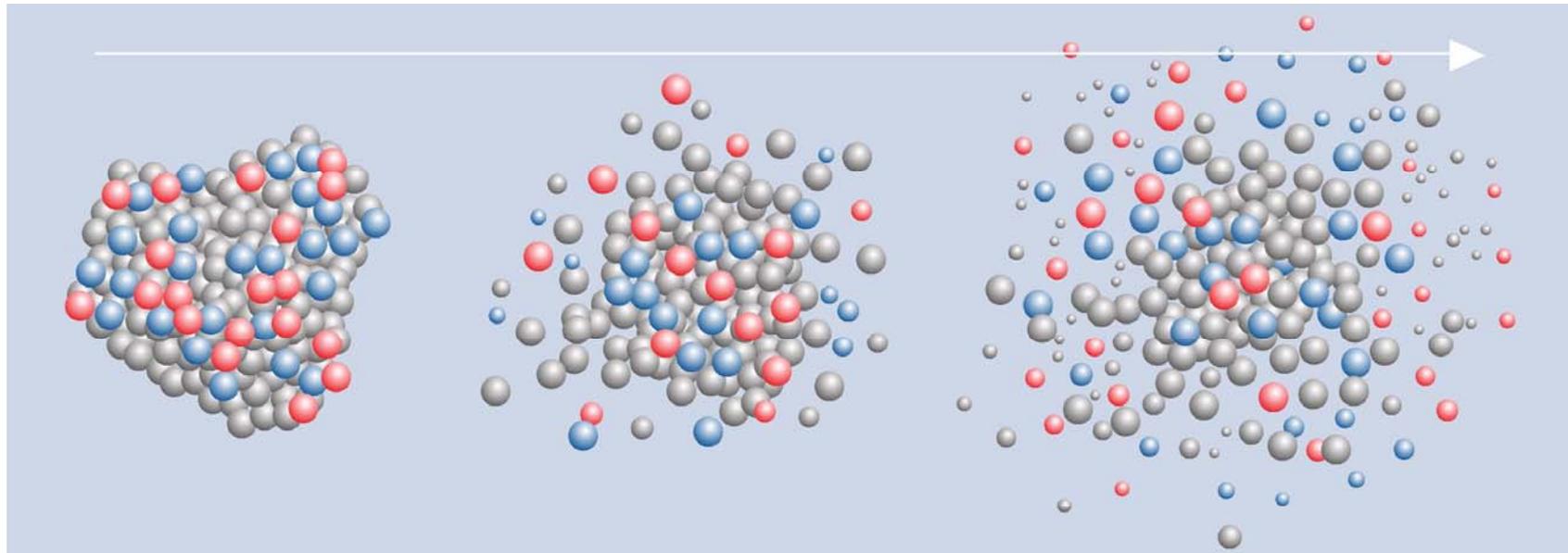


3,2 km Elektronenbeschleuniger + knapp 1 km Röntgenlaser - Aufbauten

# Femtosekundenblitz mit Röntgen Laser

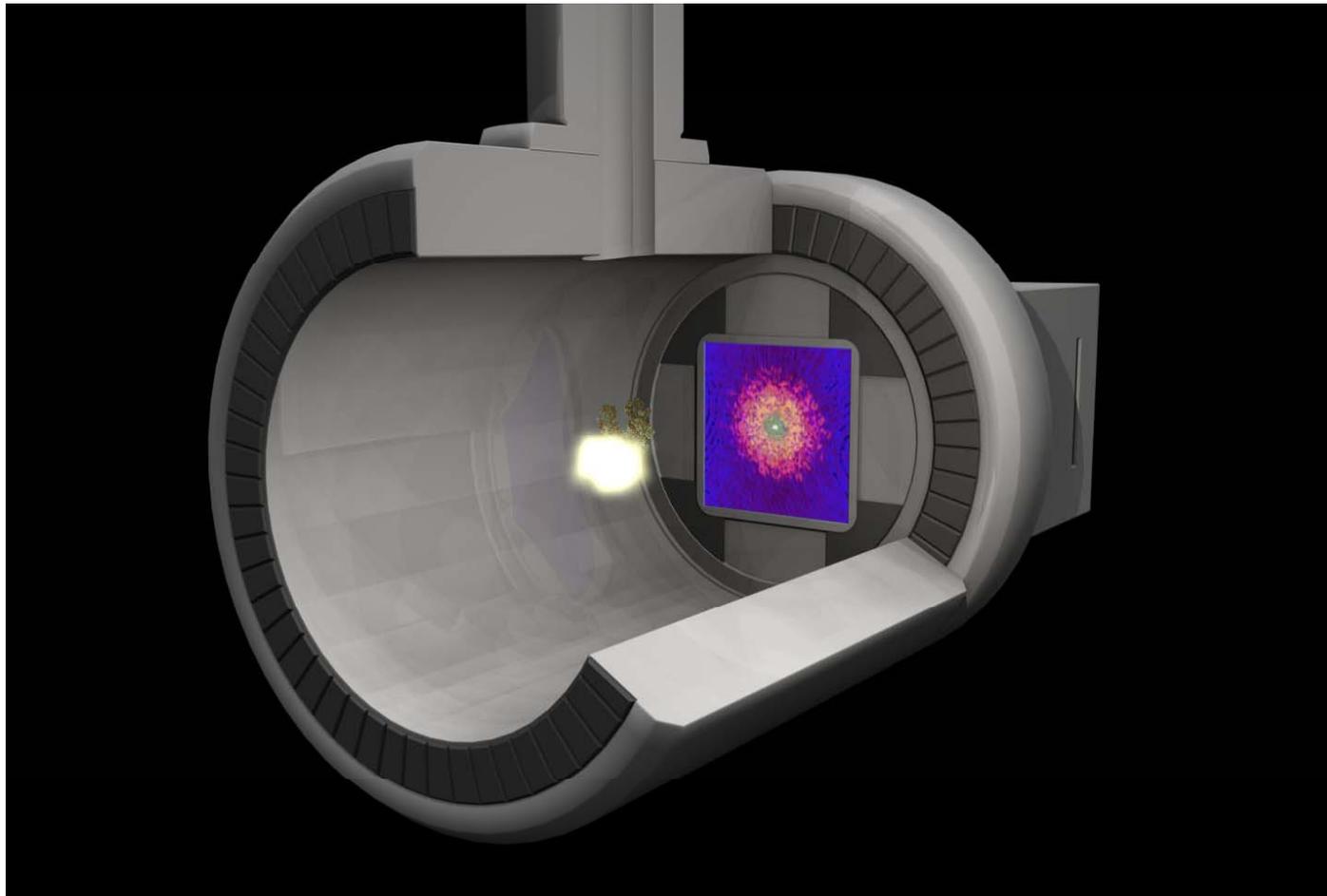
## Strukturbiologie

Biomoleküle werden zwar durch intensive Röntgenstrahlung zerstört, sie "explodieren". Dennoch kann ein einzelnes Biomolekül „photographiert“ werden, wenn die Röntgen-Beugungsstruktur aufgenommen werden kann, bevor die Probe zerstört ist.



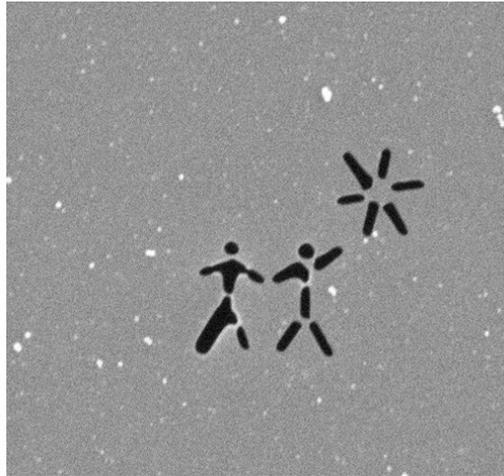
# Strukturaufklärung einzelner Moleküle mit einem Röntgen Laser Blitz

Aufnahme der Röntgen-Beugungsstruktur bevor die Probe zerstört ist

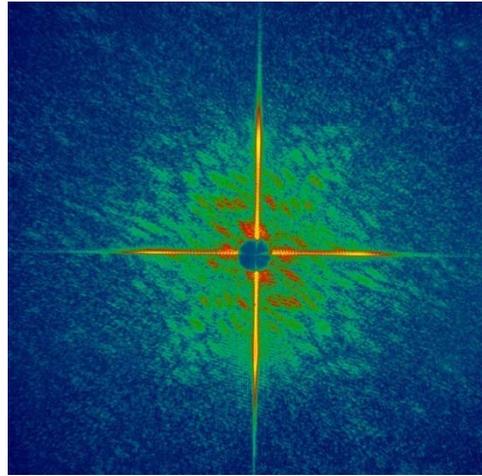


# FEL Röntgenlaser in Hamburg

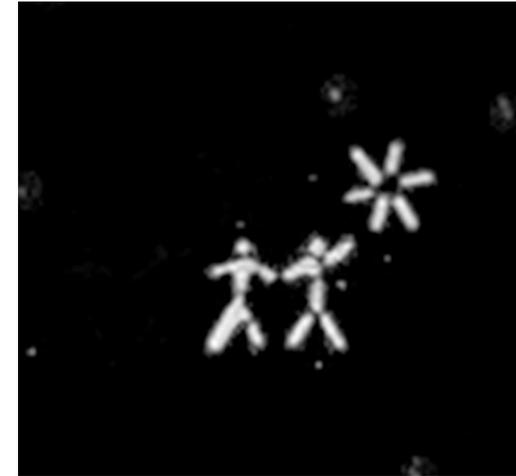
FLASH (Freie-Elektronen Laser Hamburg): Einzelschussaufnahme



Vorlage: 20 nm dick  
20  $\mu\text{m}$  x 20  $\mu\text{m}$  Fläche



Beugungsfigur  
aus einem fs Laserschuss



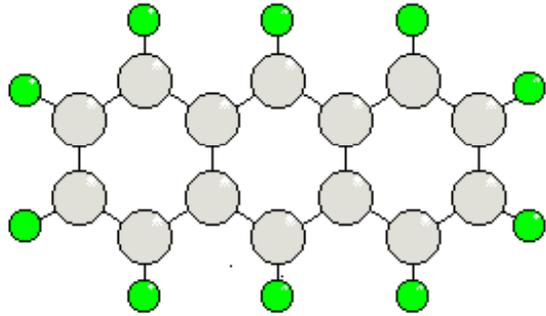
Rekonstruktion der  
Vorlage

Derzeit im Bau:

European XFEL; supraleitende Beschleunigereinheiten  
3,4 km Länge; 17,5 GeV Elektronenenergie,  
0,1 nm minimale Wellenlänge der FEL-Strahlung  
 $5 \cdot 10^{33}$  Photonen/ (s $\cdot$ mm<sup>2</sup> $\cdot$ mrad<sup>2</sup>  $\cdot$  0.1% Bandbreite)

[http://www.xfel.eu/overview/in\\_comparison/](http://www.xfel.eu/overview/in_comparison/)

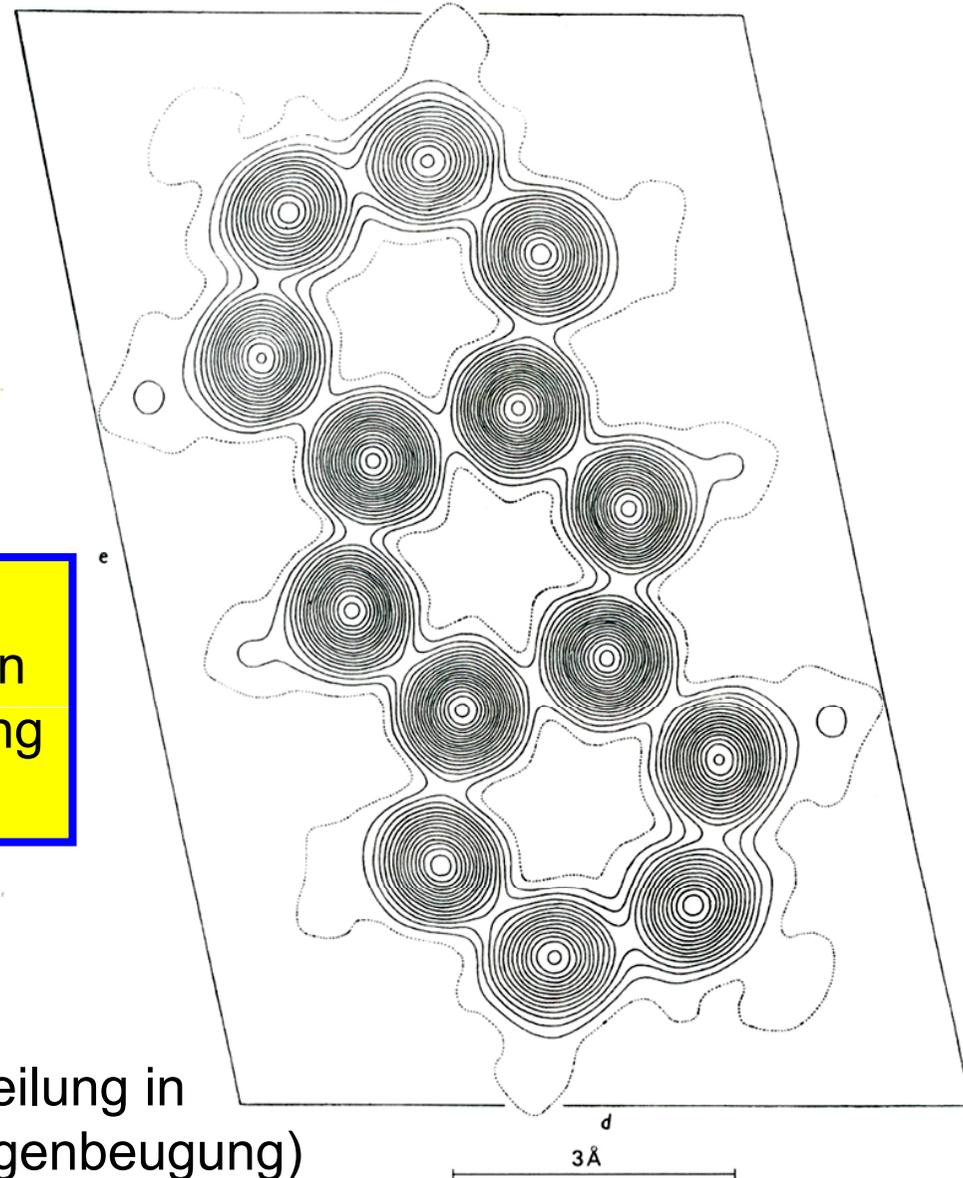
# Wie groß sind Atome? Randschärfeproblematik



Anthracen

Details der Streuung hängen nicht nur von den Kernen sondern von der Elektronendichteverteilung ab!

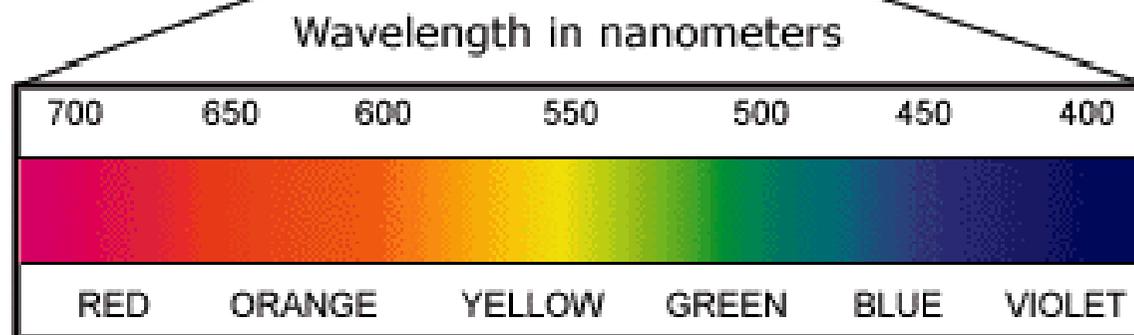
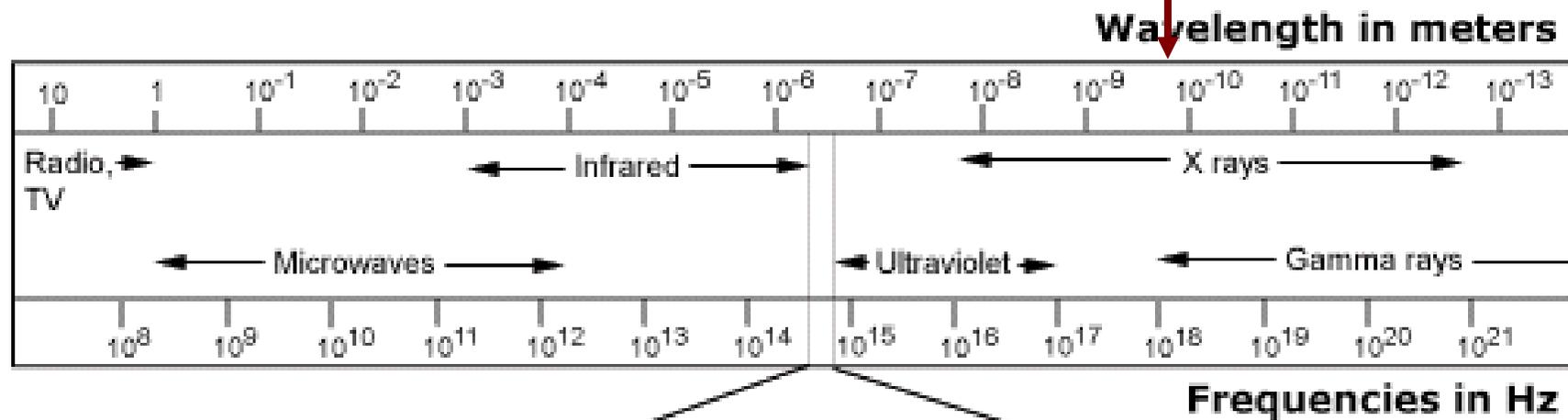
Rückgerechnete Elektronendichteverteilung in Anthracen (aus Röntgenbeugung)



# Kann man einzelne Atome sehen?

mit sichtbarem Licht?

Atom



# Auflösung und Wellenlänge

Auflösungsvermögen eines **Lichtmikroskops**

$$\delta = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \alpha}$$

$\delta$  : kleinster Punktabstand

$\lambda$  : Wellenlänge

$n$  : Brechungsindex des  
Einbettungsmediums

$\alpha$  : numerische Apertur

bestenfalls ca.  $0.5 \mu\text{m}$  mit sichtbarem Licht

Auflösungssteigerung mit kürzeren Wellenlängen: siehe Röntgen

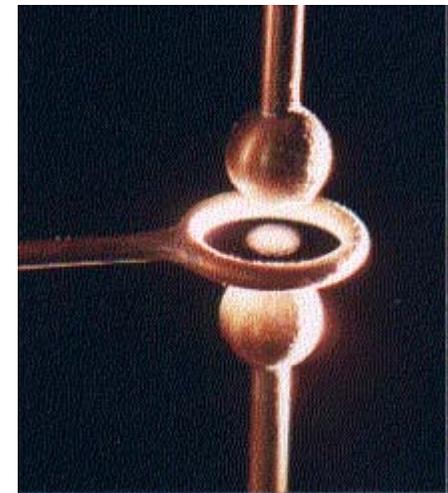
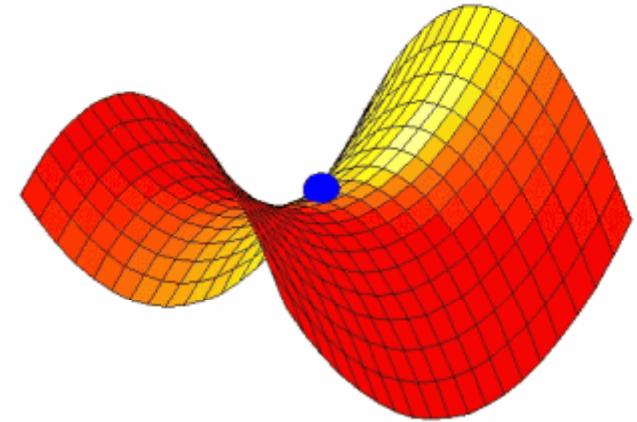
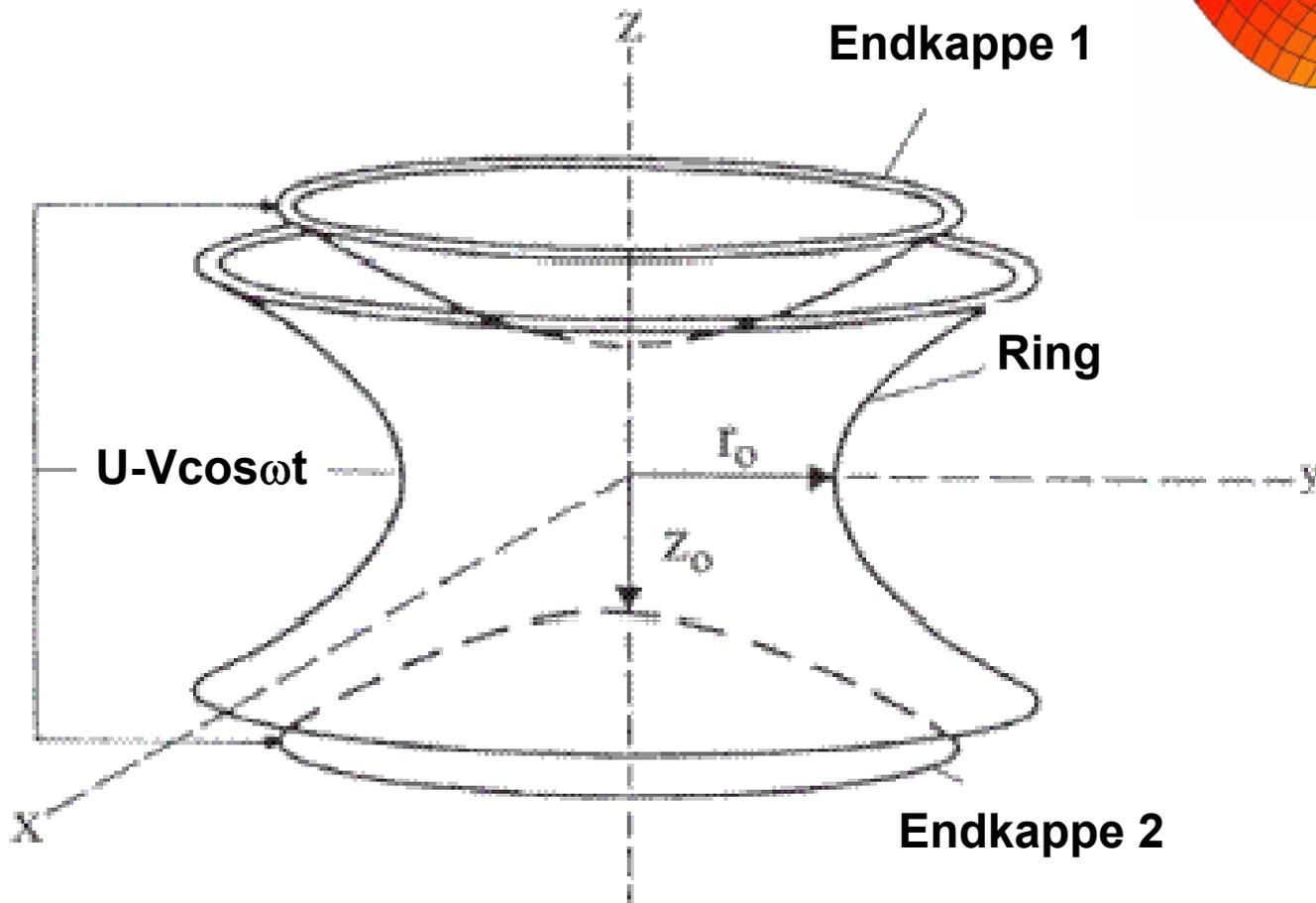
Weitere Steigerung mit  
Materiewellen (deBroglie)

**Kürzere Wellenlängen  
bei höheren Energien E**

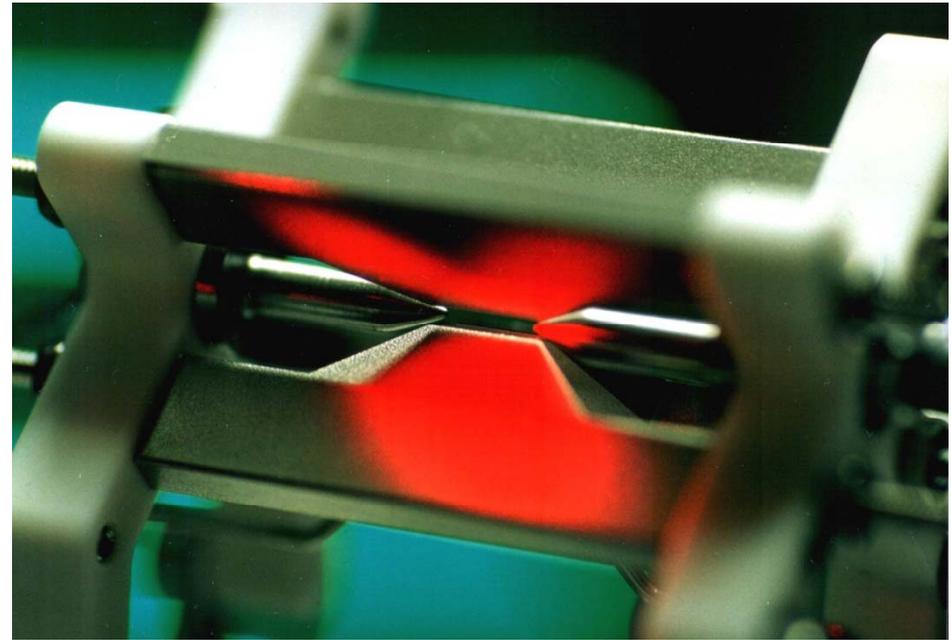
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

# Sichtbarmachen einzelner Atome: Atom- und Ionenfallen

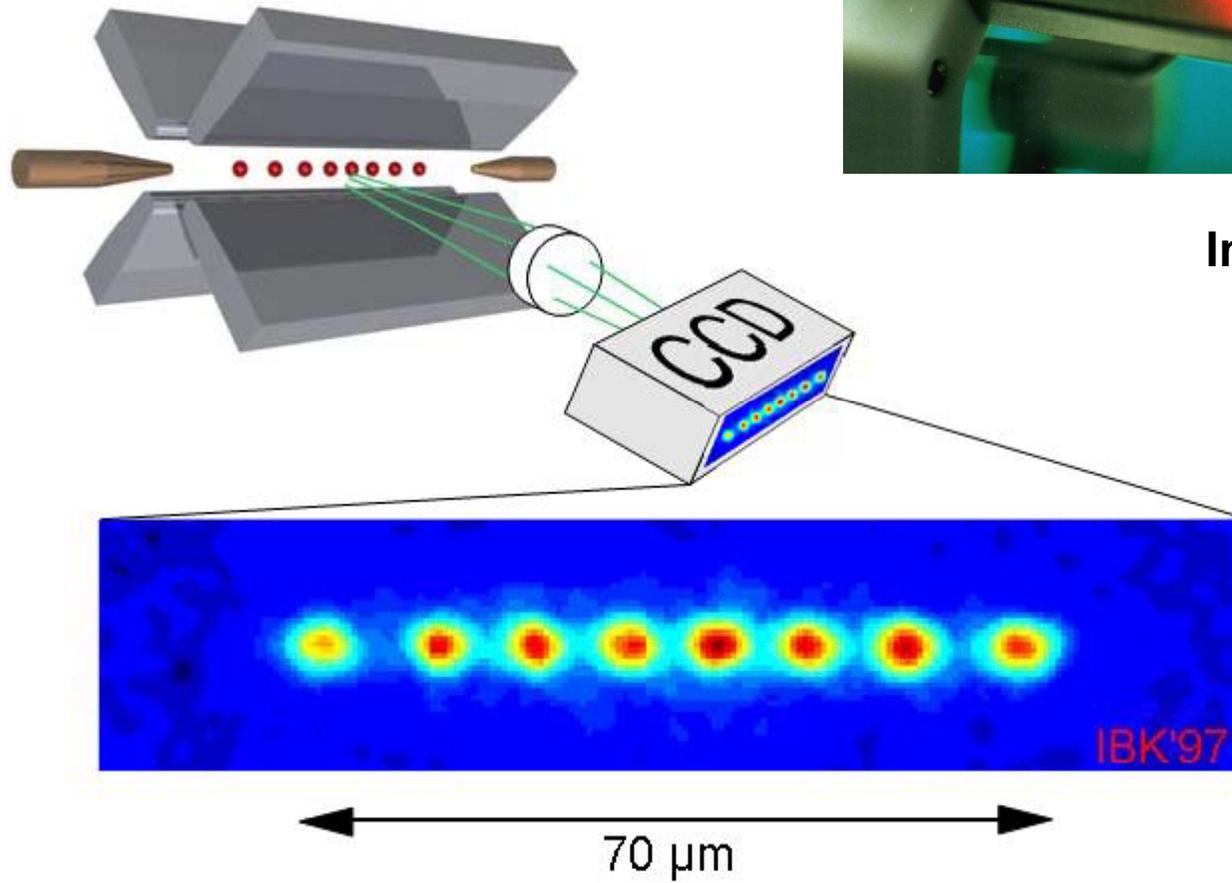
## Paul – Fallen (Hochfrequenz-Ionenfallen)



# Ionen in Fallen



Innsbrucker Paulfalle



70 μm

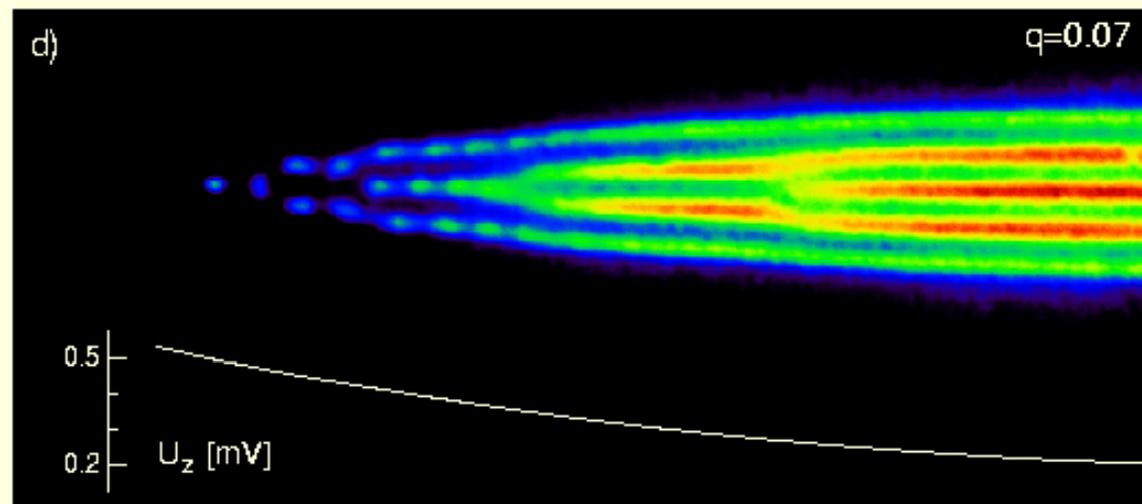
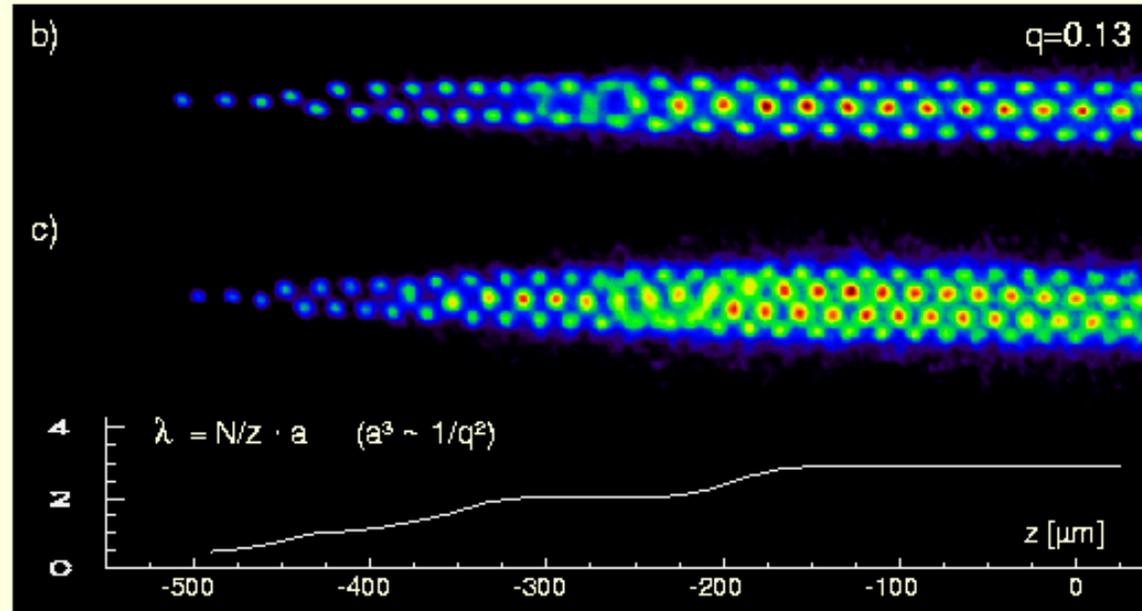
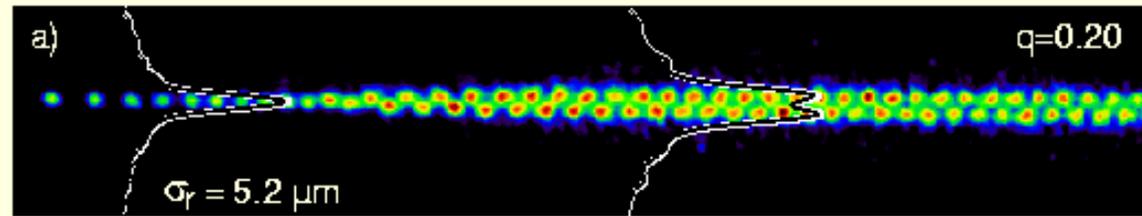
# Ionenkristalle

Ionenkühlung

thermische Energie  
geringer als  
Coulombenergie

Zusammenhalt  
durch die  
Fallenkräfte

Beleuchtung mit  
Laserlicht:  
zahlreiche  
Absorptions und  
Emissionsvorgänge

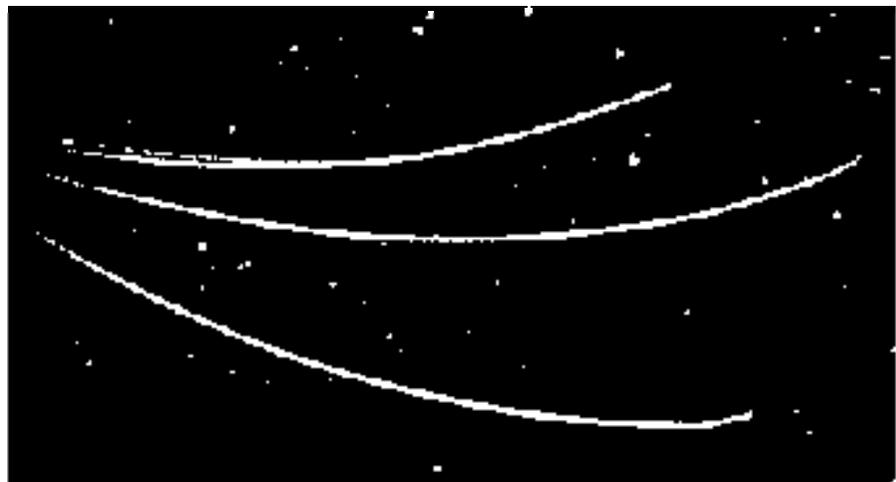


# Nebelkammer: sichtbare Bahnen atomarer Teilchen

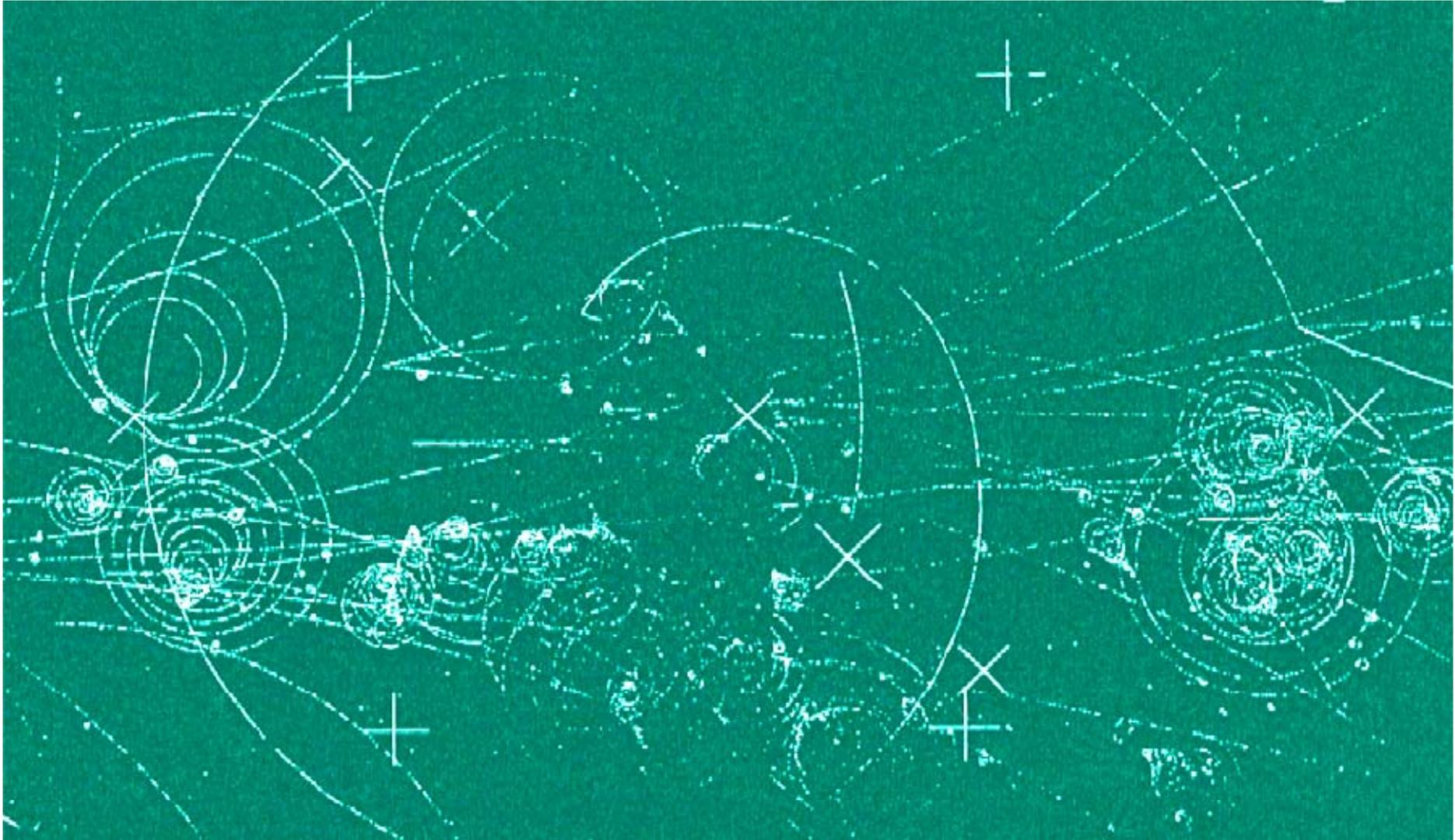


$\alpha$ -Teilchen  
(Heliumkerne)

Mit Magnetfeld

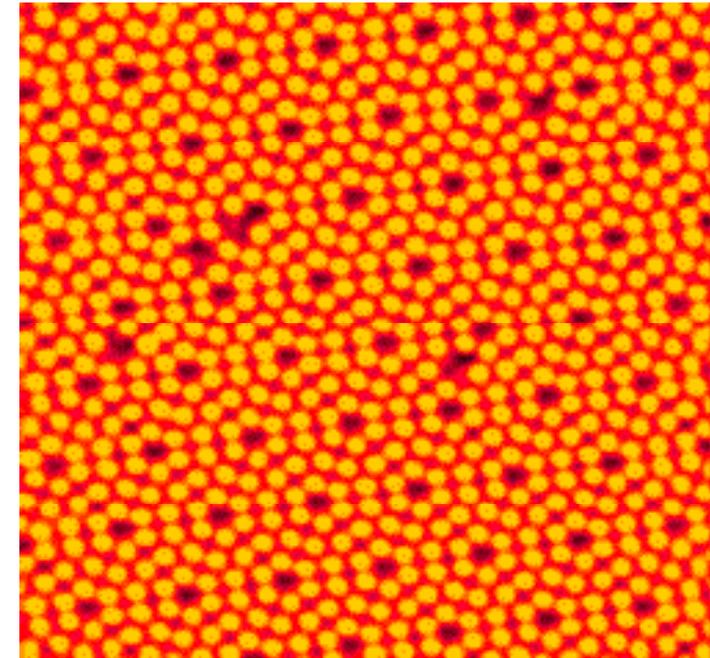
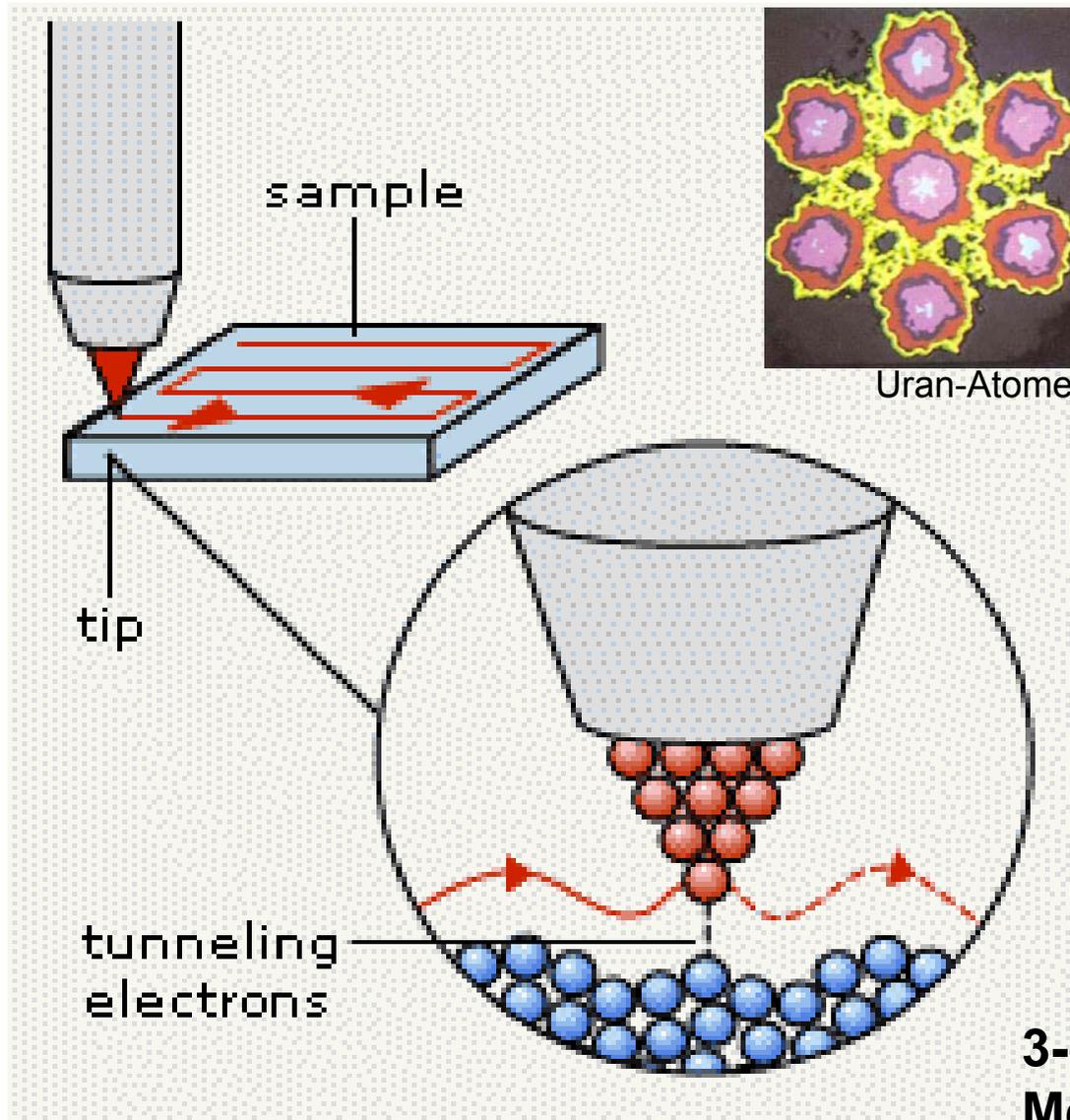


# Blasenkammer: sichtbare Bahnen atomarer Teilchen



Aufnahme an DESY

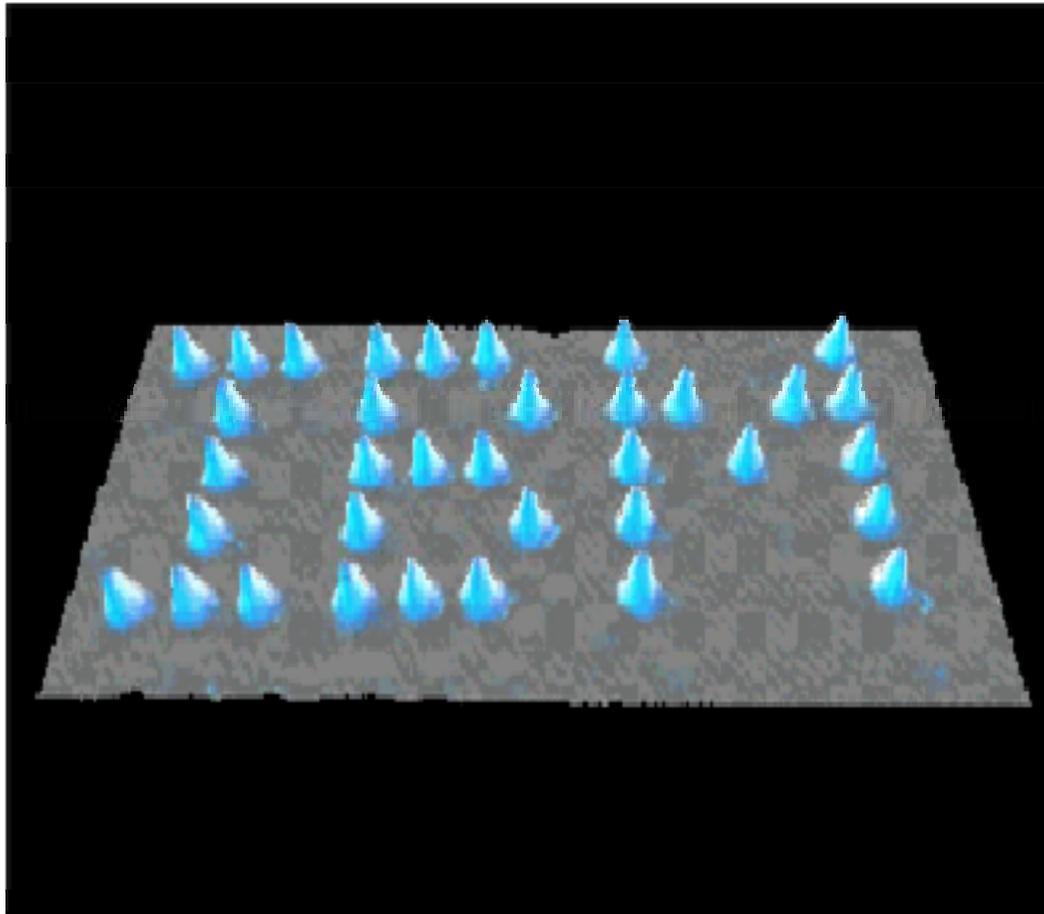
# Sichtbarmachung einzelner Atome: Raster-Tunnel Mikroskopie



**Siliziumoberfläche  
STM Aufnahme**

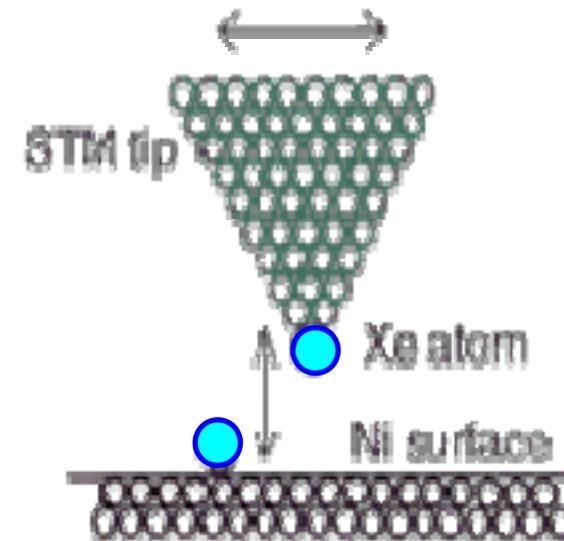
**3-dimensionale Piezo-Kontrolle  
Messung des Tunnelstroms**

# Manipulation einzelner Atome



Einzelne Xenon Atome, bei  $-273\text{C}$  (IBM 1989)

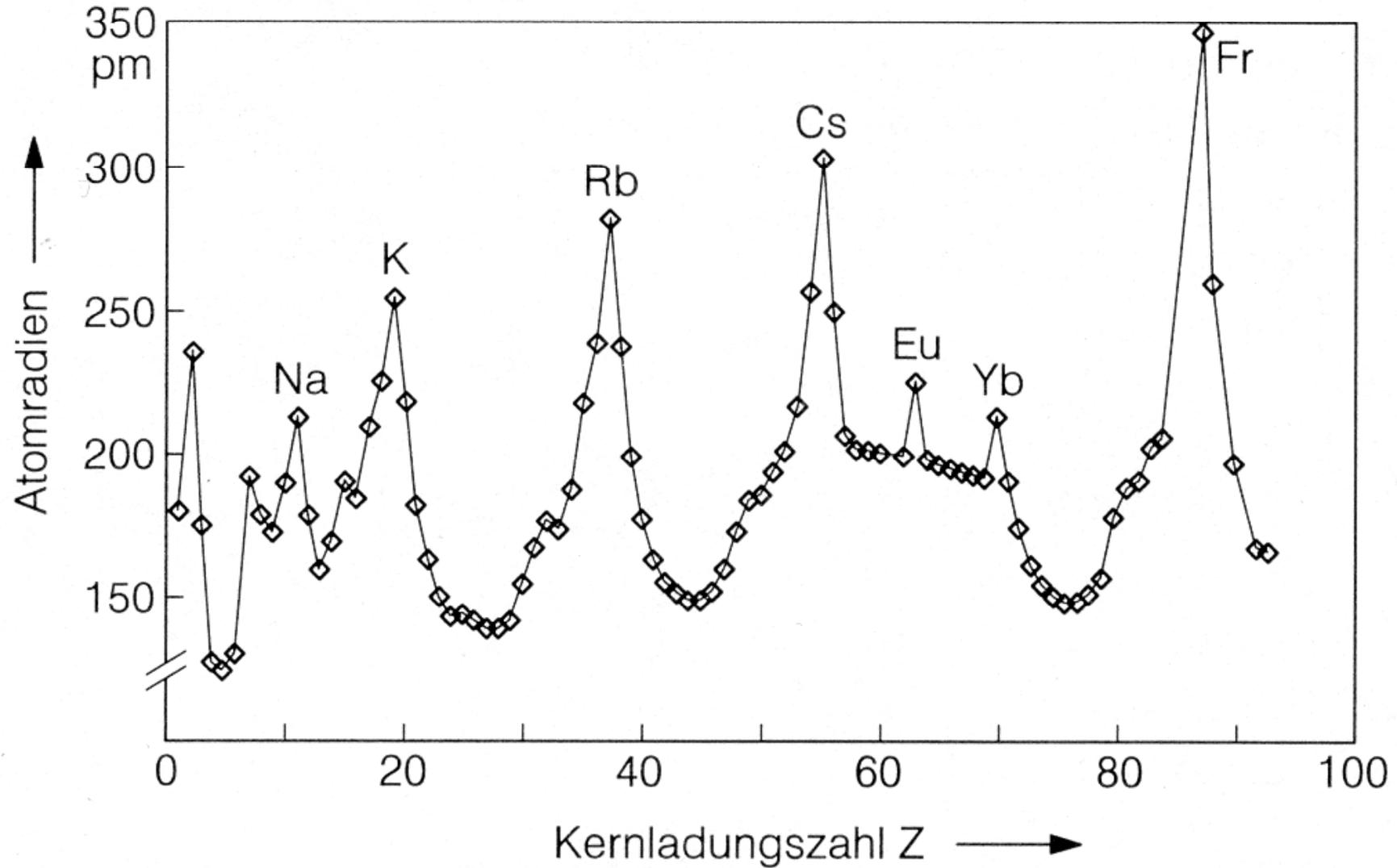
- Xenonatome werden mit der Tunnelspitze verschoben



# Atomradien

Aus Atomvolumina in der festen bzw. flüssigen Phase gemäß:

$$V_{\text{Atom}} = \frac{4}{3} \pi r_{\text{Atom}}^3 = \frac{m_{\text{Mol}}}{\rho_m N_A}$$



**Kap. 3:**

**Die Isotopie:**

**Massenmessung und Isotopentrennung**

# Masse von Atomen

## Massenspektrometer:

### Erzeugung geladener Teilchen:

z.B. Elektronenstoßionisation

### Messung von $q/m$ durch Verwendung von

elektrischen Feldern

magnetischen Feldern

Flugzeitmethoden

zeitabhängigen Feldern

### Lorentzkraft:

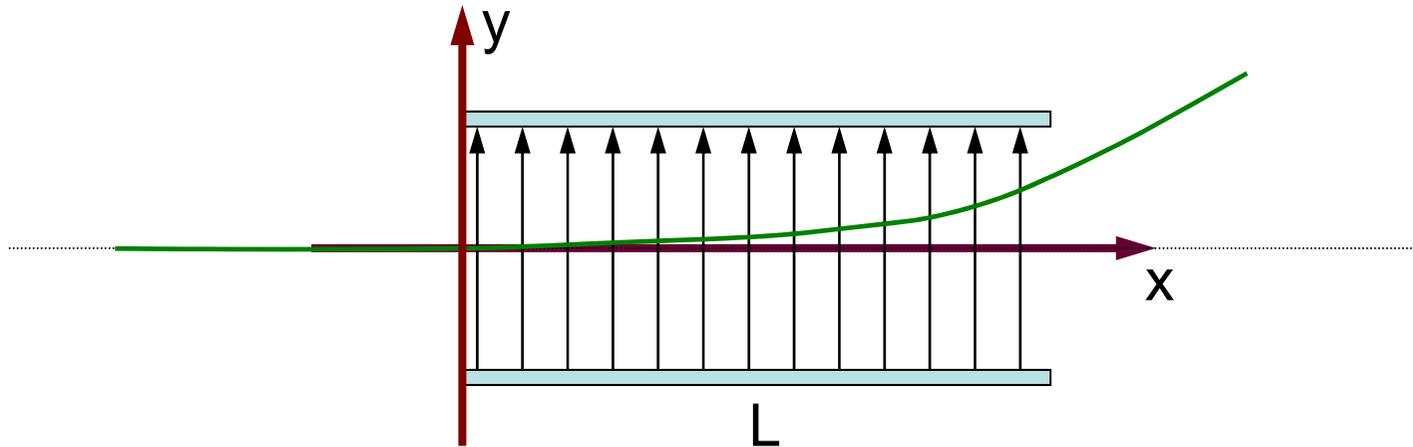
$$\mathbf{F} = q * (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

(geschwindigkeitsabhängig!)

### Kraft im elektrischen Feld:

$$\mathbf{F} = q * \mathbf{E}$$

# Ablenkung im elektrischen Feld



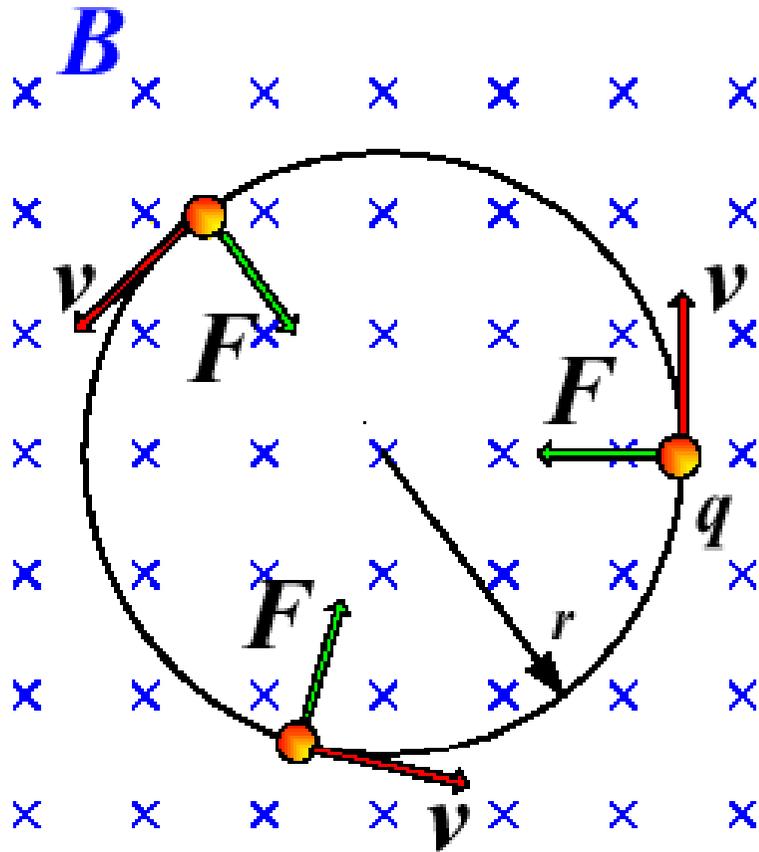
$$m \ddot{y} = eE$$

$$y(t) = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E t^2 ; \quad t = \frac{x}{v}$$

$$y(x=L) = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E \left( \frac{L}{v} \right)^2 = \frac{1}{4} \frac{eEL^2}{E_{\text{kin}}}$$

**Energiefilter!**

# Ablenkung in magnetischen Feldern



**Lorentzkraft:**

$$F = q \cdot (v \times B)$$

**Zentrifugalkraft:**

$$F = m \cdot v^2 / r$$

$$\frac{m \cdot v}{q} = B \cdot r$$

**Magnetfeld:**

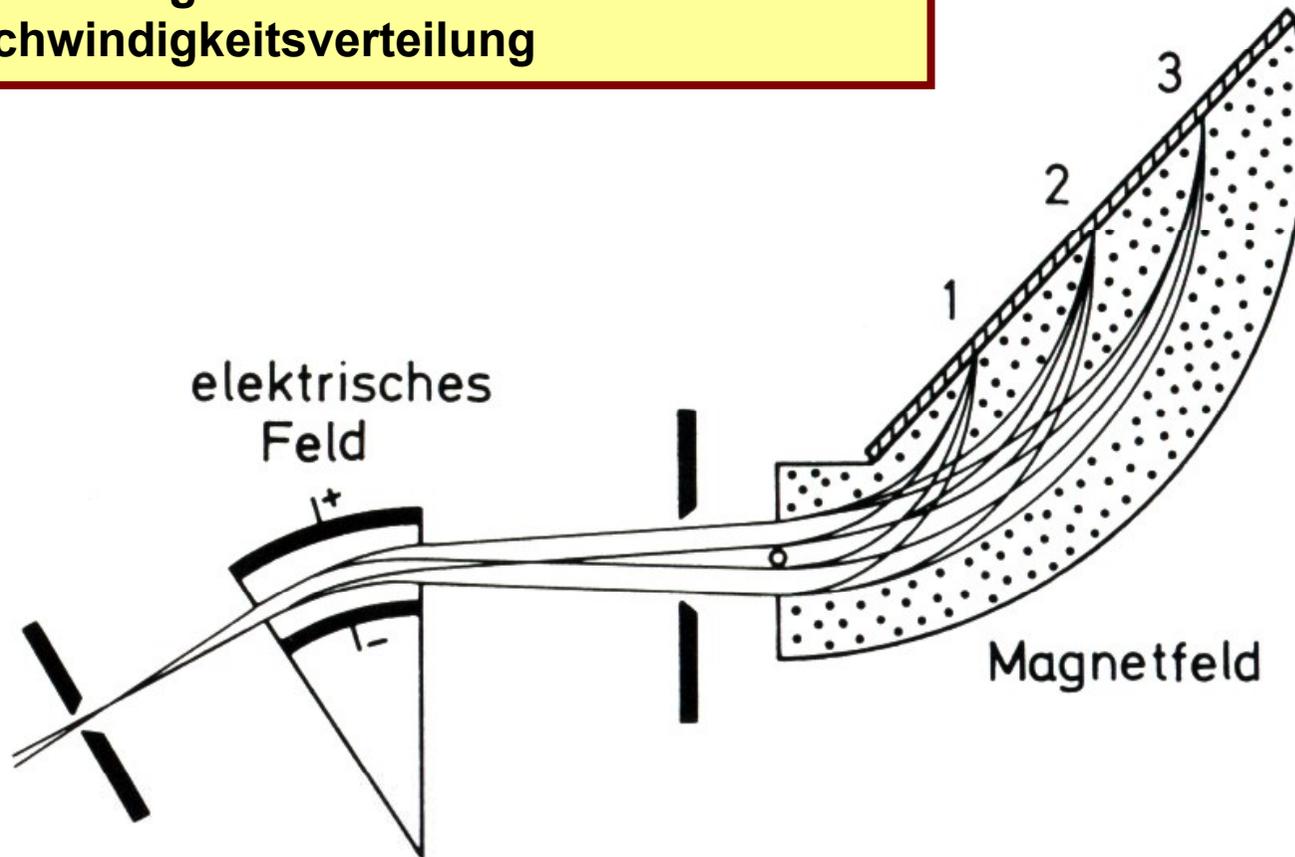
**Impulsfilter**

**Elektrisches Feld:**

**Energiefilter**

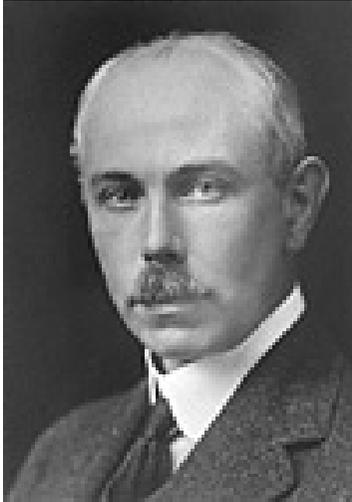
# Massenspektrometer

Problematik in realen Experimentaufbauten:  
Winkeldivergenz im Teilchenstrahl  
Geschwindigkeitsverteilung



**Abb. 3.4.** Fokussierender Massenspektrograph nach Aston. Mit 1, 2 und 3 sind die Auftreffpunkte von drei Teilchensorten mit unterschiedlichem Verhältnis  $e/m$  gekennzeichnet

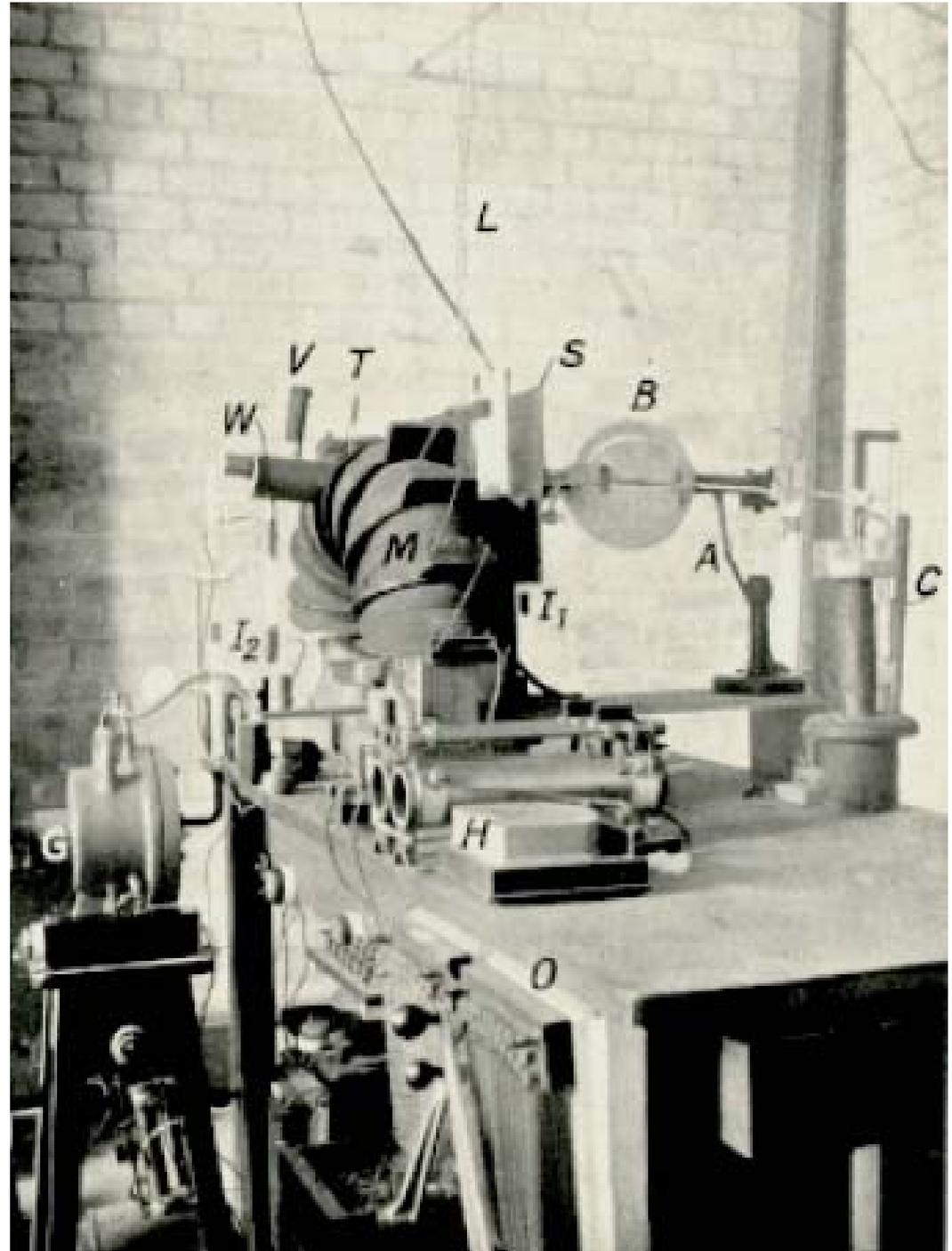
# Massenspektrometrie



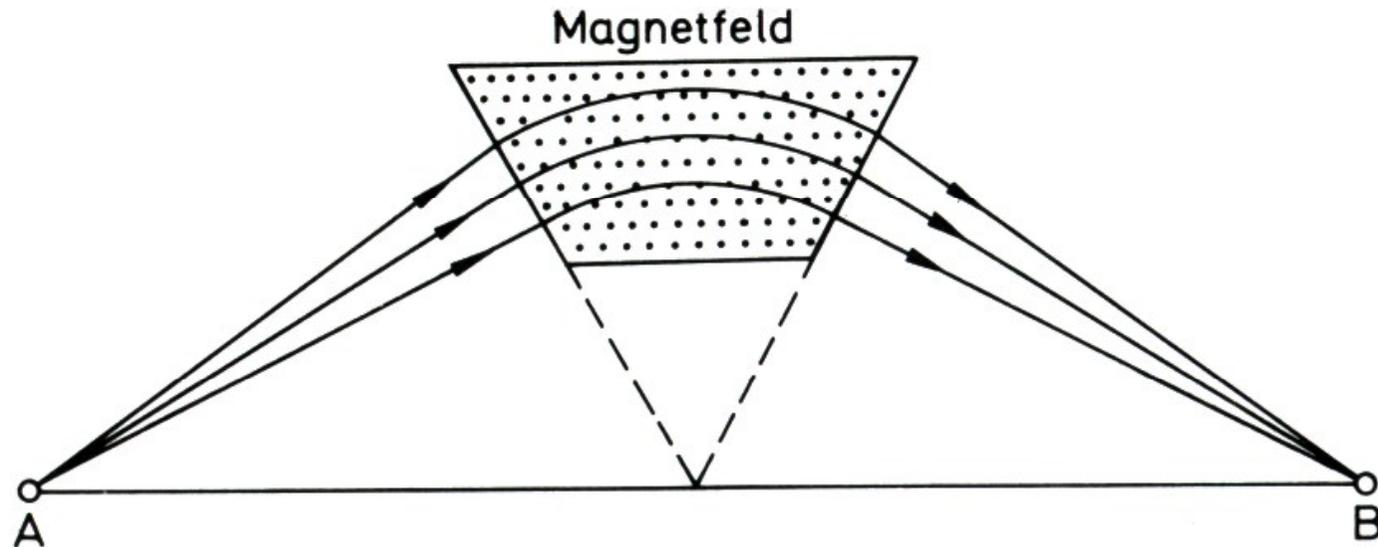
Sir Francis William Aston:  
1877 – 1945  
Nobelpreis Chemie 1922

Entdeckung von 212 der 287  
natürlich vorkommenden Isotope

Entdeckung von Abweichungen  
der Atomgewichte von ganzen  
Zahlen



# Richtungsfokussierung in magnetischen Feldern

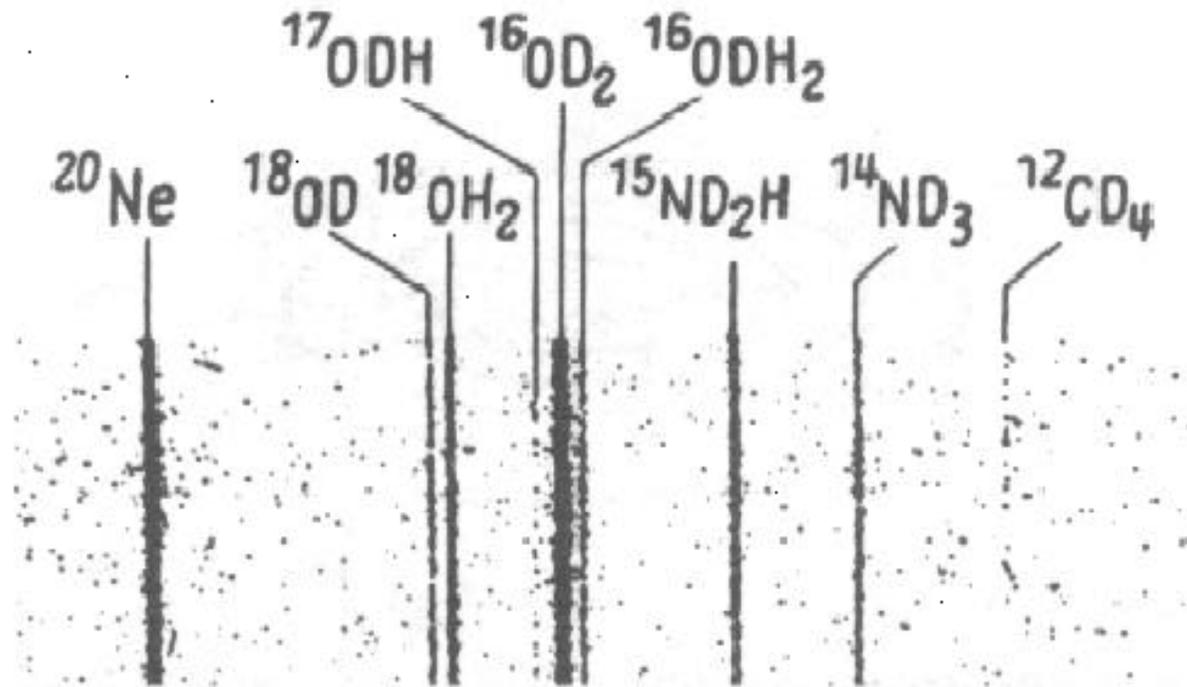


**Abb. 3.5.** Richtungsfokussierung im magnetischen Sektorfeld, schematisch. Teilchen, die einen langen Weg im Bereich des Magnetfeldes zurücklegen, werden stärker abgelenkt

**Magnetsektor wirkt wie eine Linse**

# Massenspektrometrie

Abbildung auf einer Photoplatte:

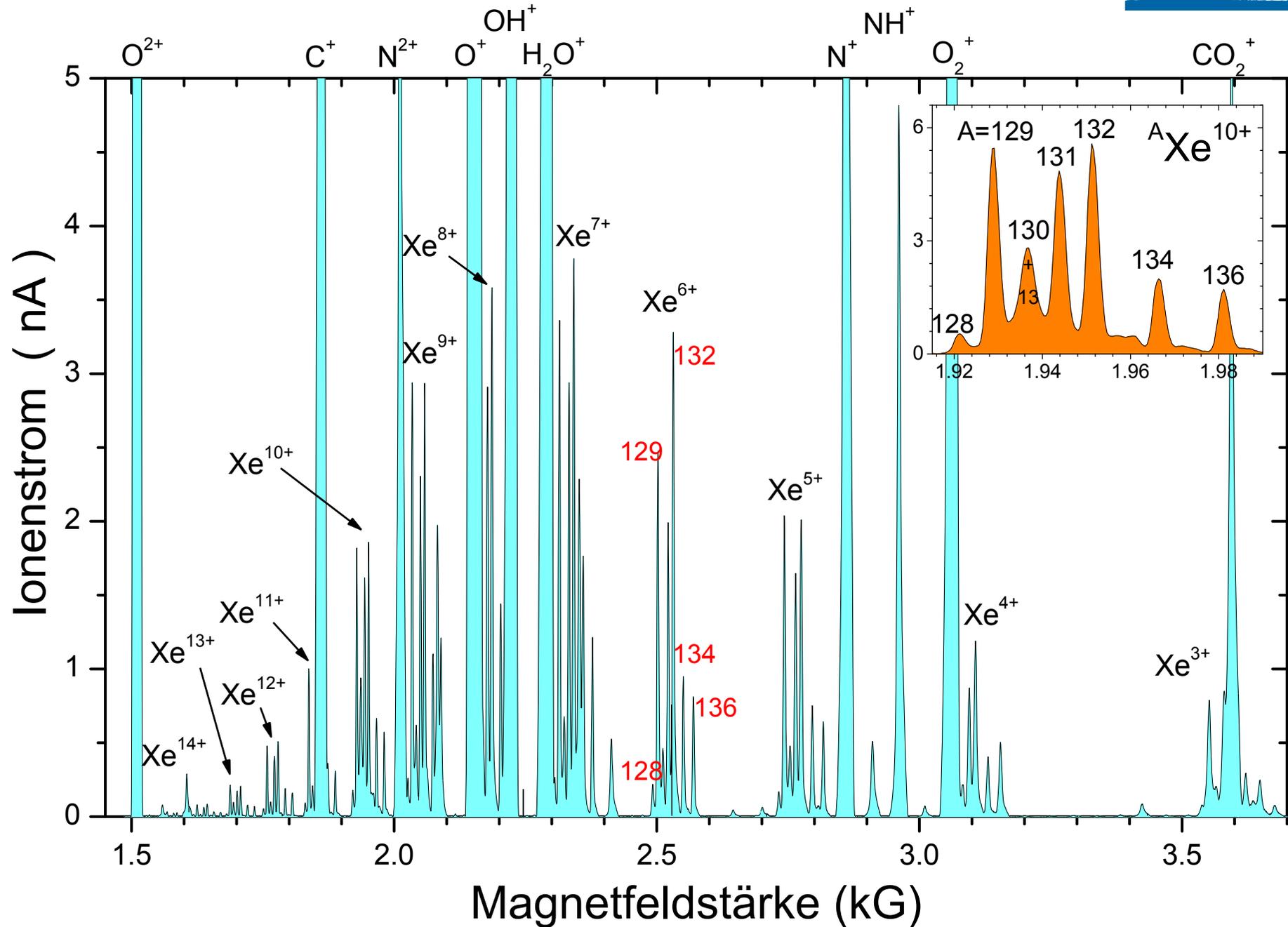


Massenzahl 20!

Isotopie!

19.9876 – 20.0628

# Ladung/Masse - Analyse im Magnetfeld



# Quadrupolmassenspektrometer

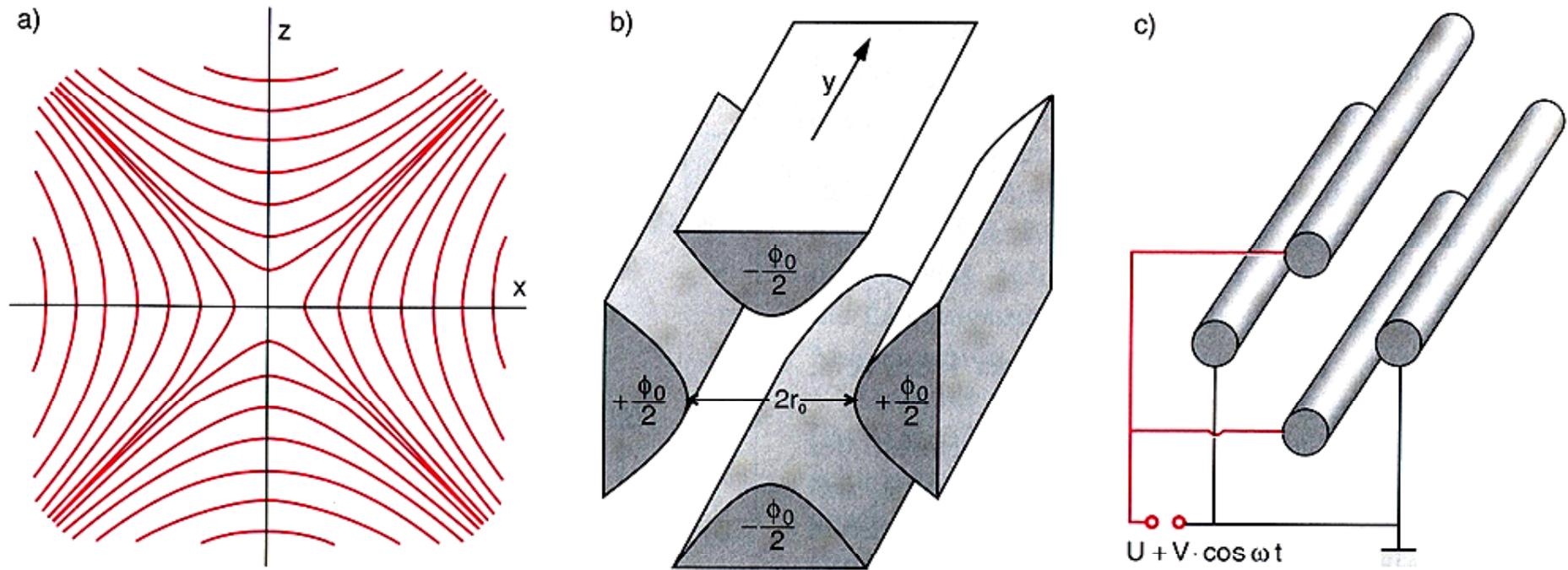
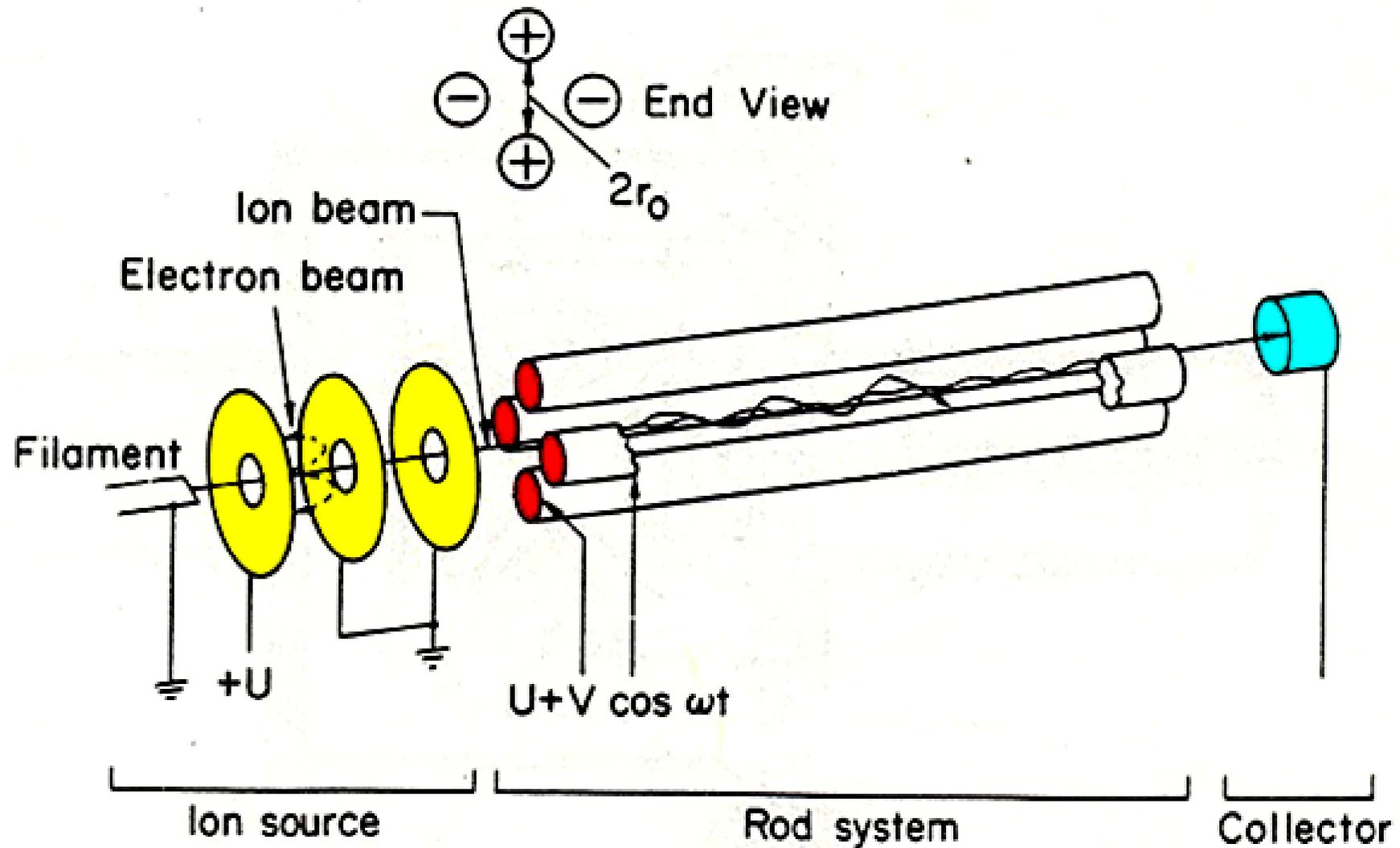


Abb. 2.71a–c. Quadrupolmassenspektrometer. (a) Äquipotentiallinien; (b) hyperbolische Elektroden; (c) in der Praxis verwendete runde Stäbe

Standard-Analyseverfahren in der Vakuumtechnik

# Quadrupolmassenfilter



# Massenmessung mit Ionenfallen

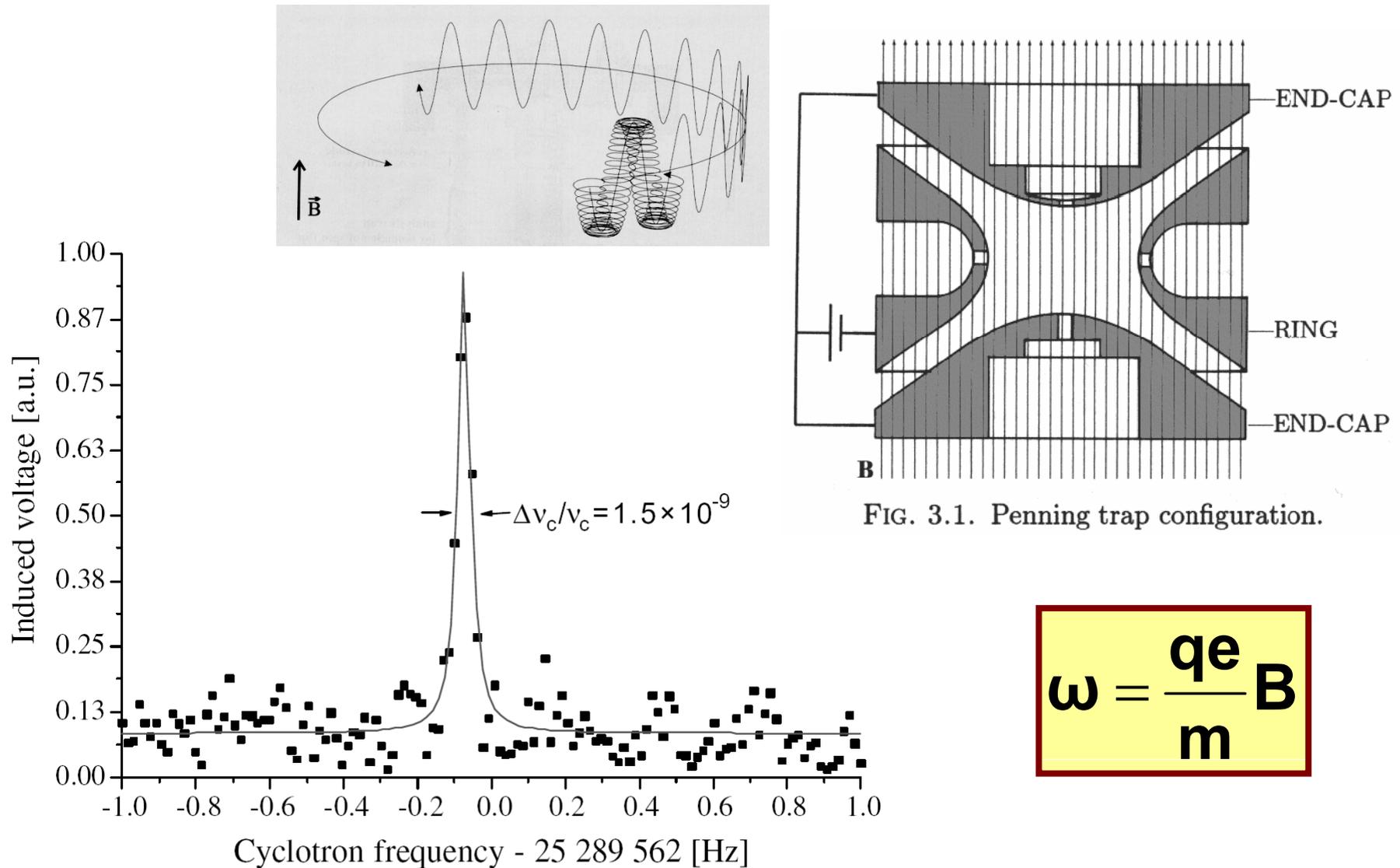
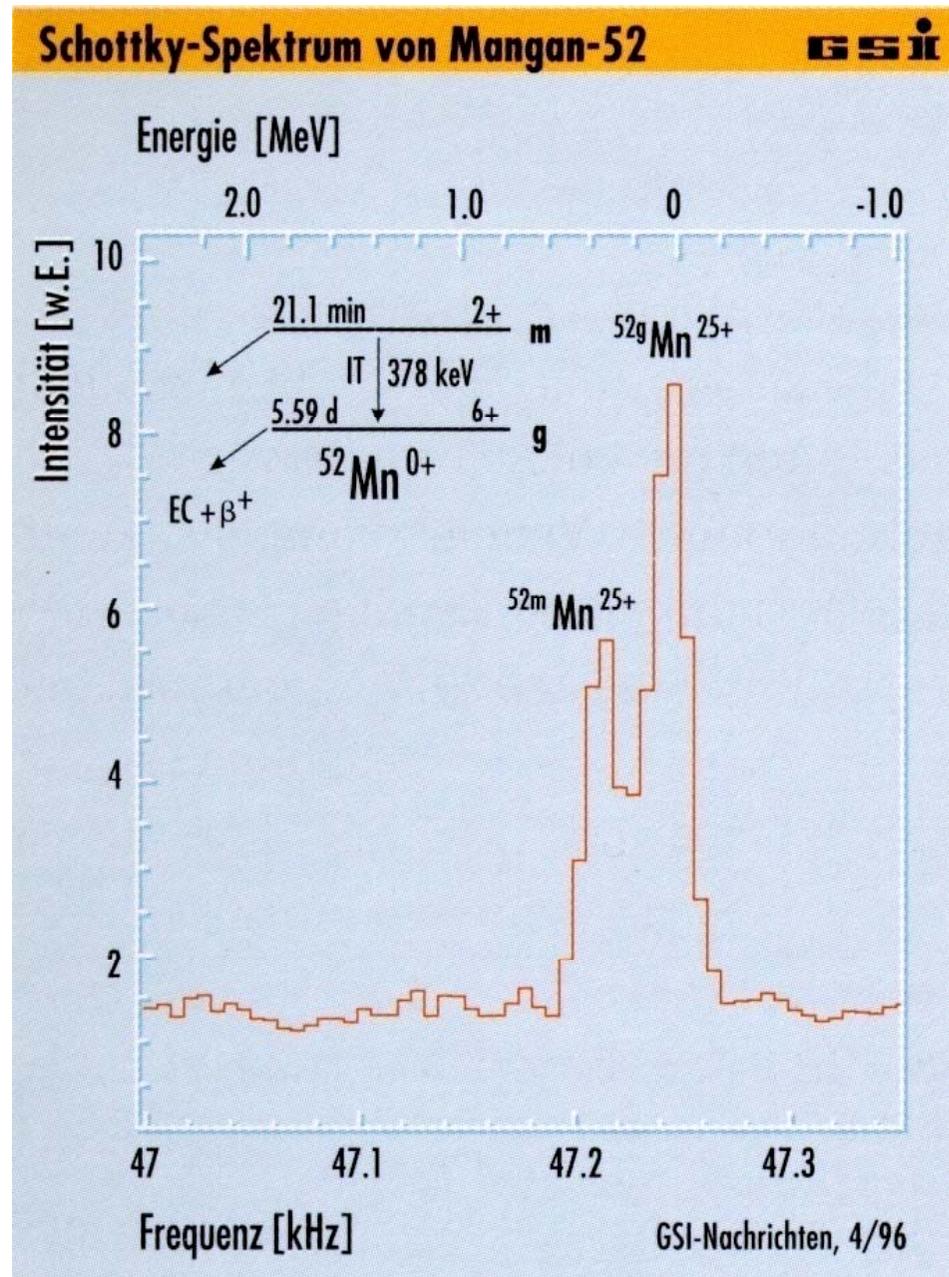
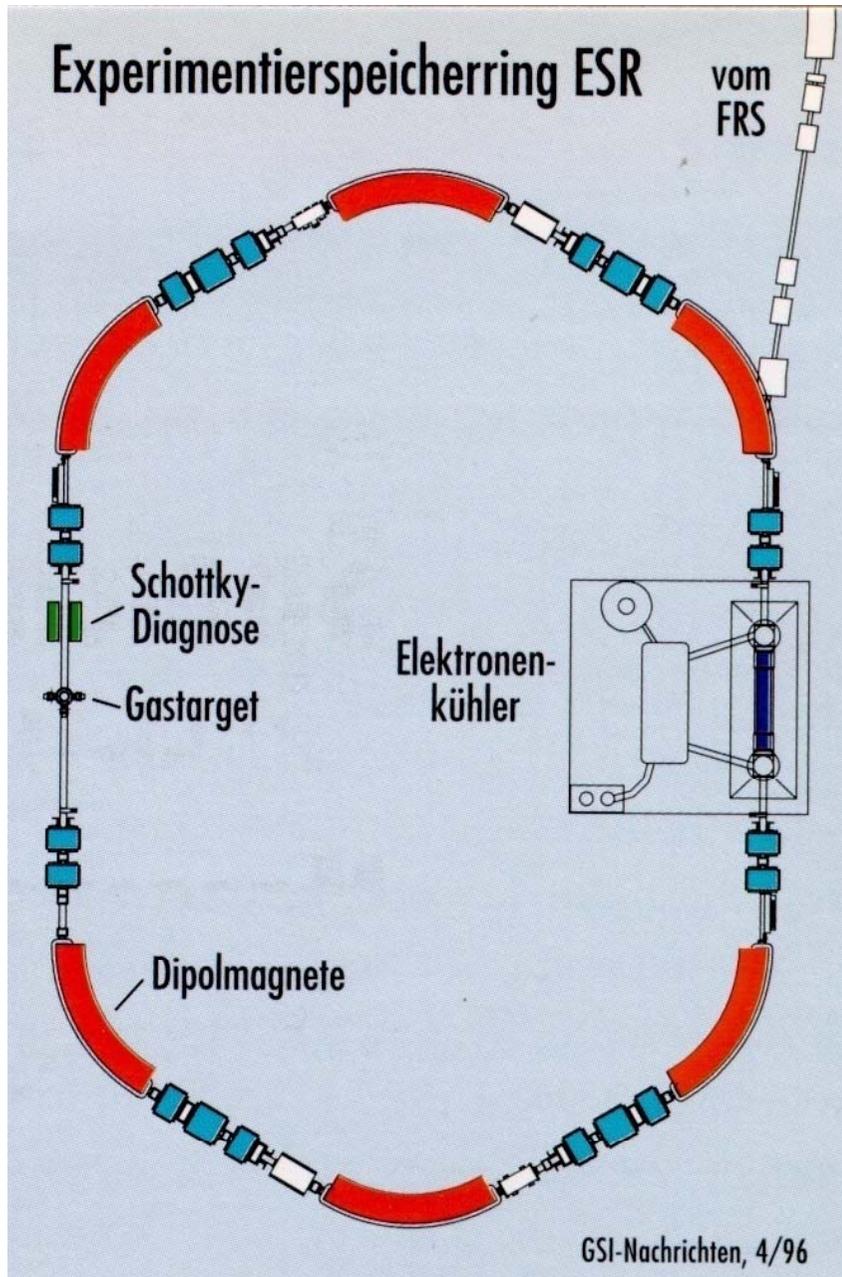


FIG. 3.1. Penning trap configuration.

$$\omega = \frac{qe}{m} B$$

Fig. 4. Fourier transform of the induced voltage from a single  $O^{7+}$  ion in a circuit attached to the split ring electrode.

# Massenmessung an Speicherringen



# Atomare Masseneinheit

1 atomare Masseneinheit =  $1 m_u = 1/12 m(^{12}\text{C})$

$m(^{12}\text{C})$  : Masse des neutralen Kohlenstoffatoms

**CODATA\* 2006**

$$1 m_u = 1.660\,538\,782(83) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m_u / m_u = 5.0 \cdot 10^{-8}$$

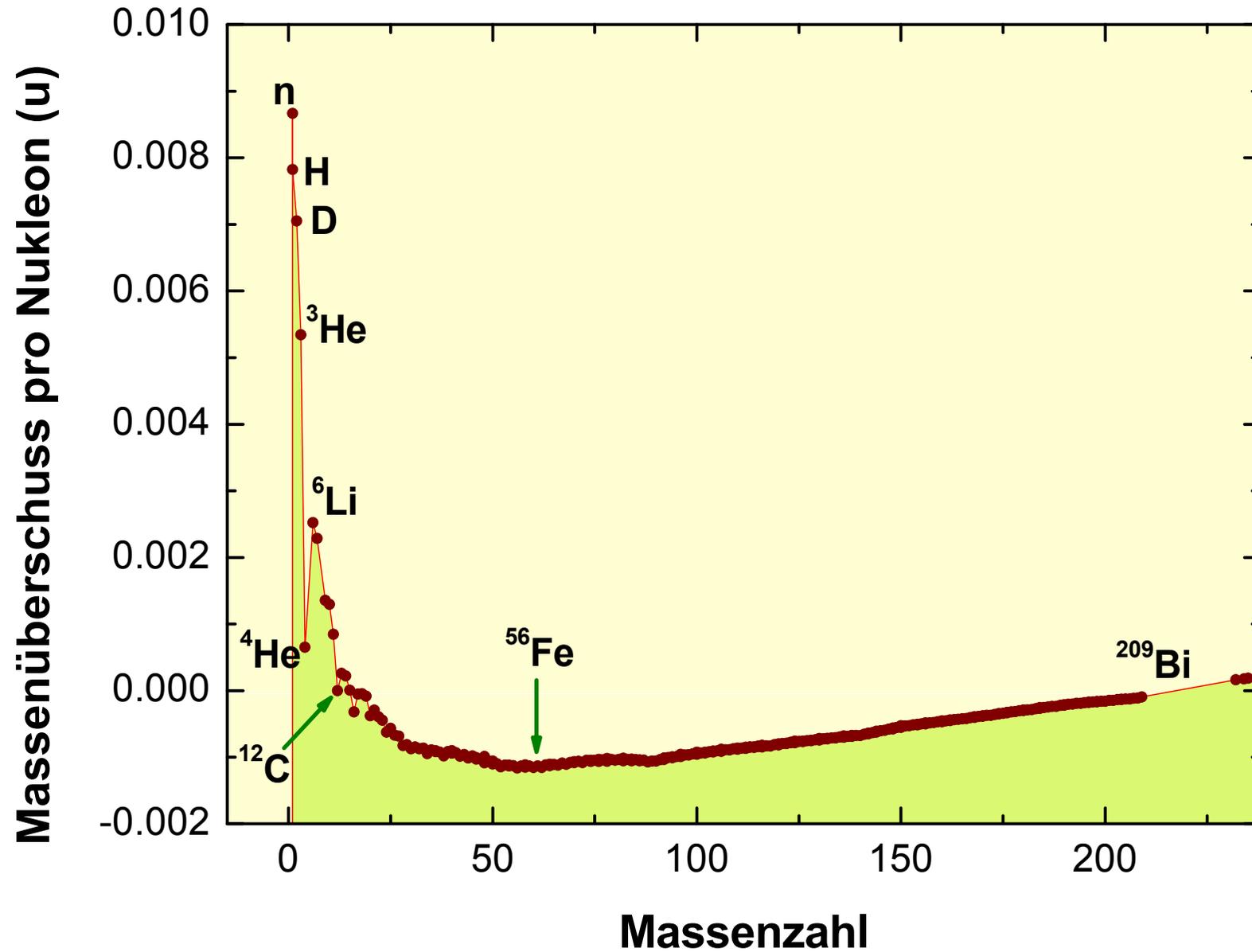
$$1 m_u = 931.494\,028(23) \times 10^6 \text{ eV}/c^2$$

$$\Delta m_u / m_u = 2.5 \cdot 10^{-8}$$

\* CODATA: Committee on Data for Science and Technology

# Massen der stabilen Atome

Atommasse =  $A \cdot (u + \text{Massenüberschuss pro Nukleon})$

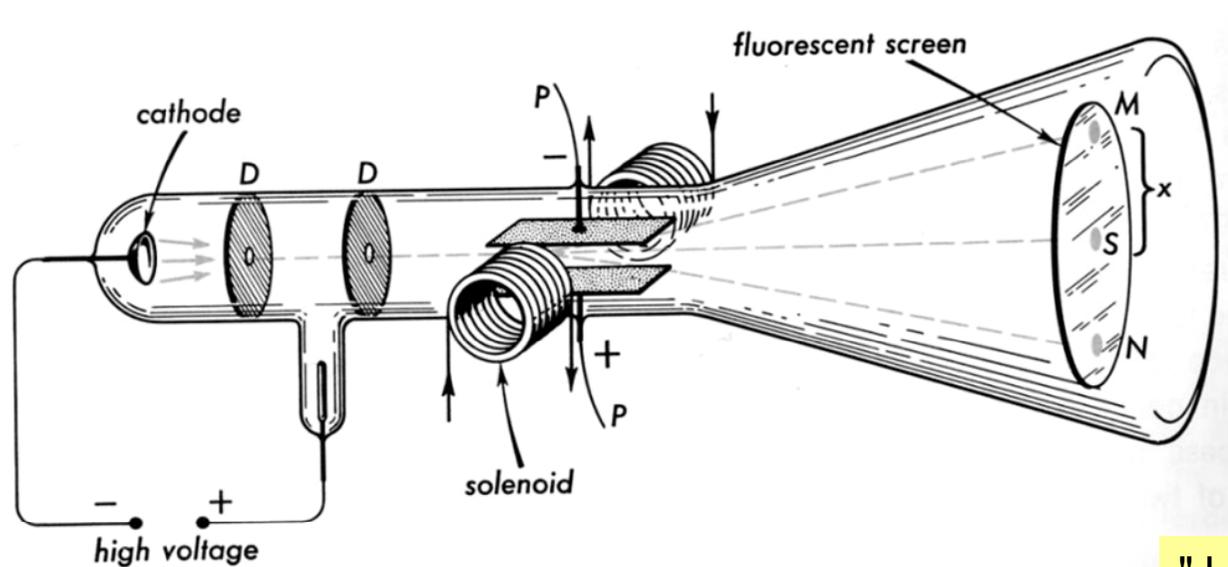


**Kap. 4:**

**Aufbau von Atomen**

# Entdeckung des Elektrons

1. Kathodenstrahlen werden durch Magnetfelder abgelenkt
2. Ebenso von elektrischen Feldern



3. Bestimmung von  $e/m$

Kathodenstrahlen bestehen aus Korpuskeln, d.h. Teilchen mit definierter Masse und Ladung. Sie sind Bestandteile der Atome. (1897)



Joseph John Thomson  
1856-1940  
Nobelpreis 1906

"J.J. was very awkward with his fingers, and I found it very necessary not to encourage him to handle the instruments! But he was very helpful in talking over the ways in which he thought things ought to go." -- H. F. Newall, onetime assistant to the young Professor Thomson.

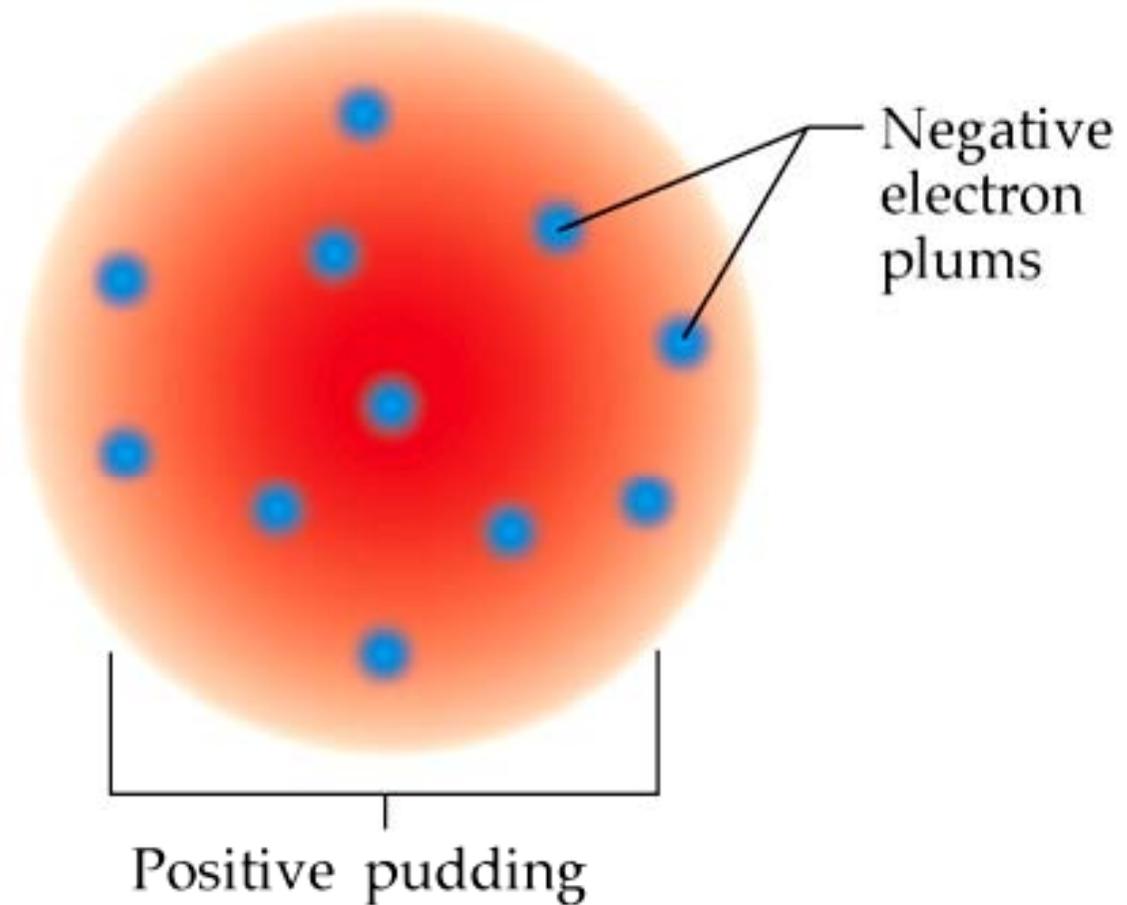
# Atomaufbau: Thomsonmodell

## J. J. Thomsons Plumpudding Modell

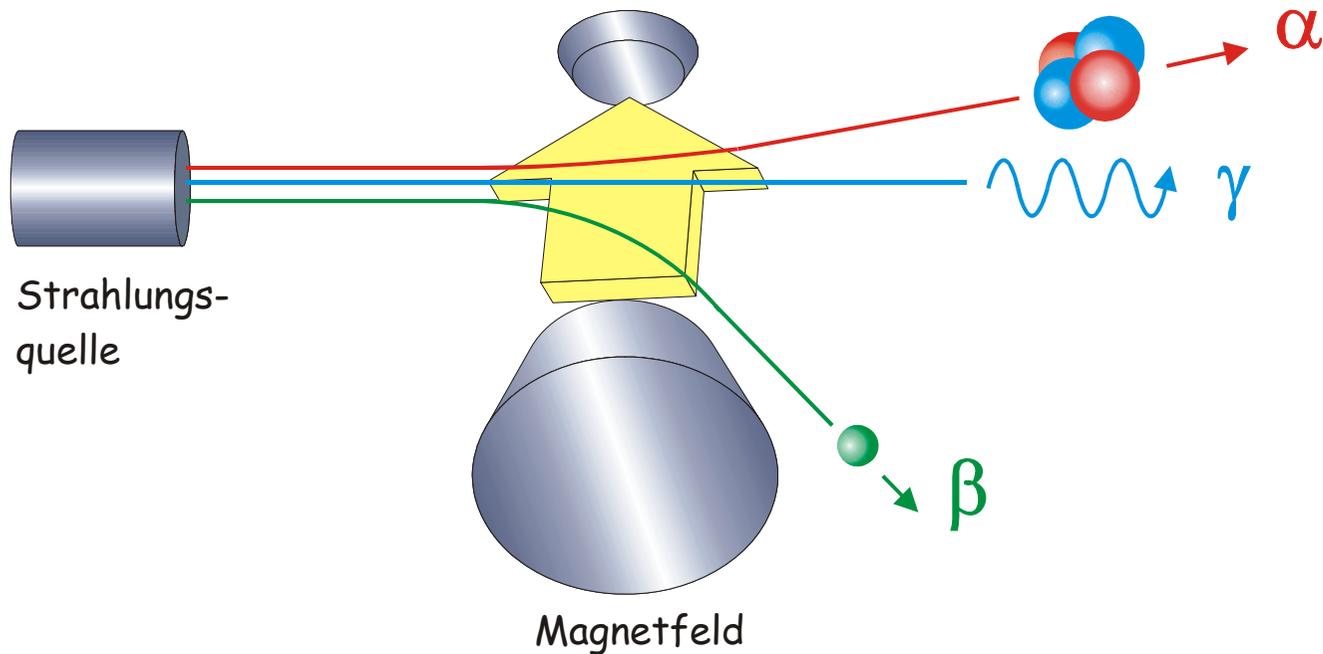
**Vorstellung:**

**Gleichmäßige  
Verteilung der  
positiven Ladung  
im Atom**

**neutralisiert durch  
Elektronen**



# Elementumwandlungen, Alphateilchen



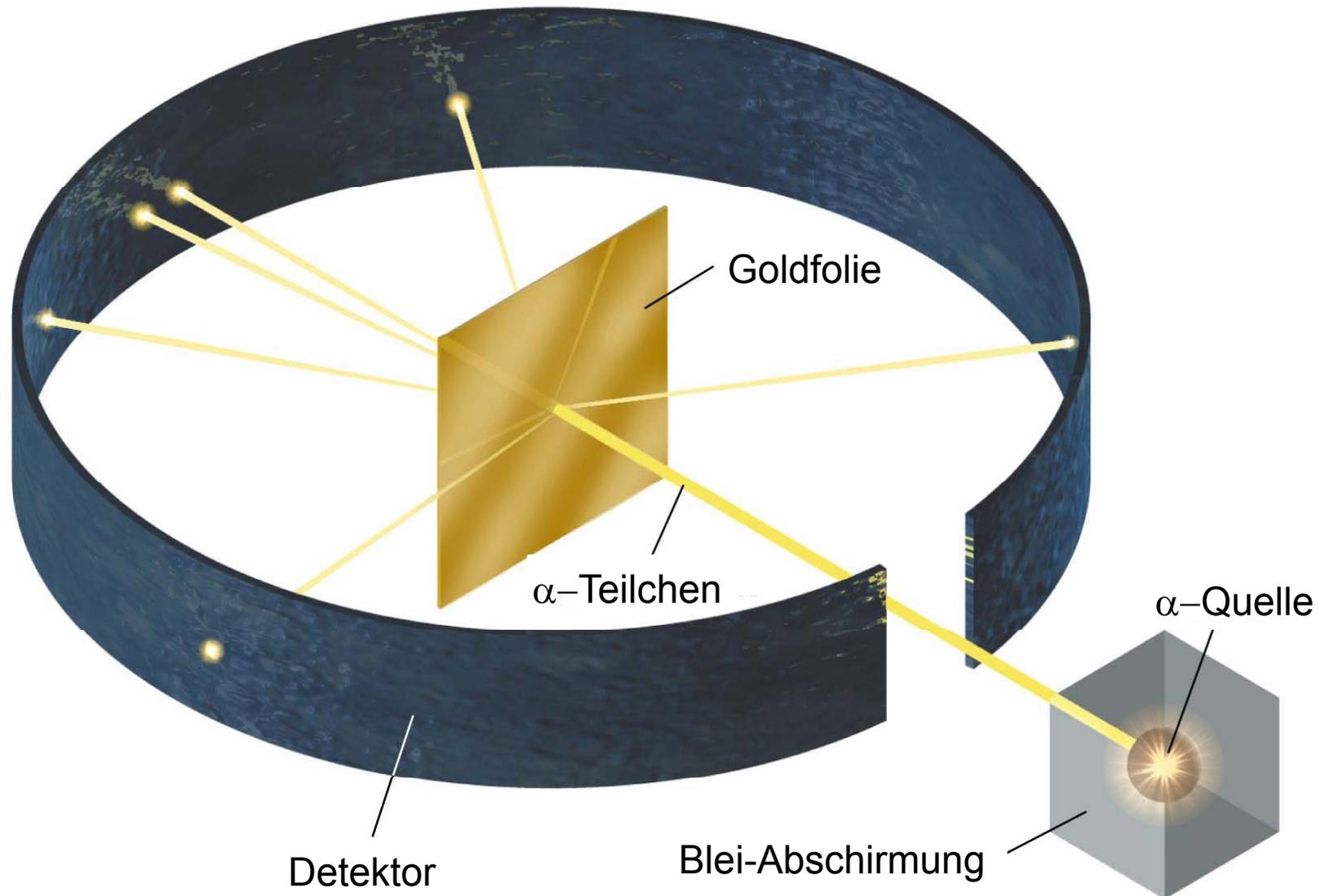
Ernest Rutherford  
1871-1931  
Nobelpreis  
Chemie 1908

Erklärung der radioaktiven Strahlung als Folge spontaner Umwandlungen radioaktiver Elemente (1902)

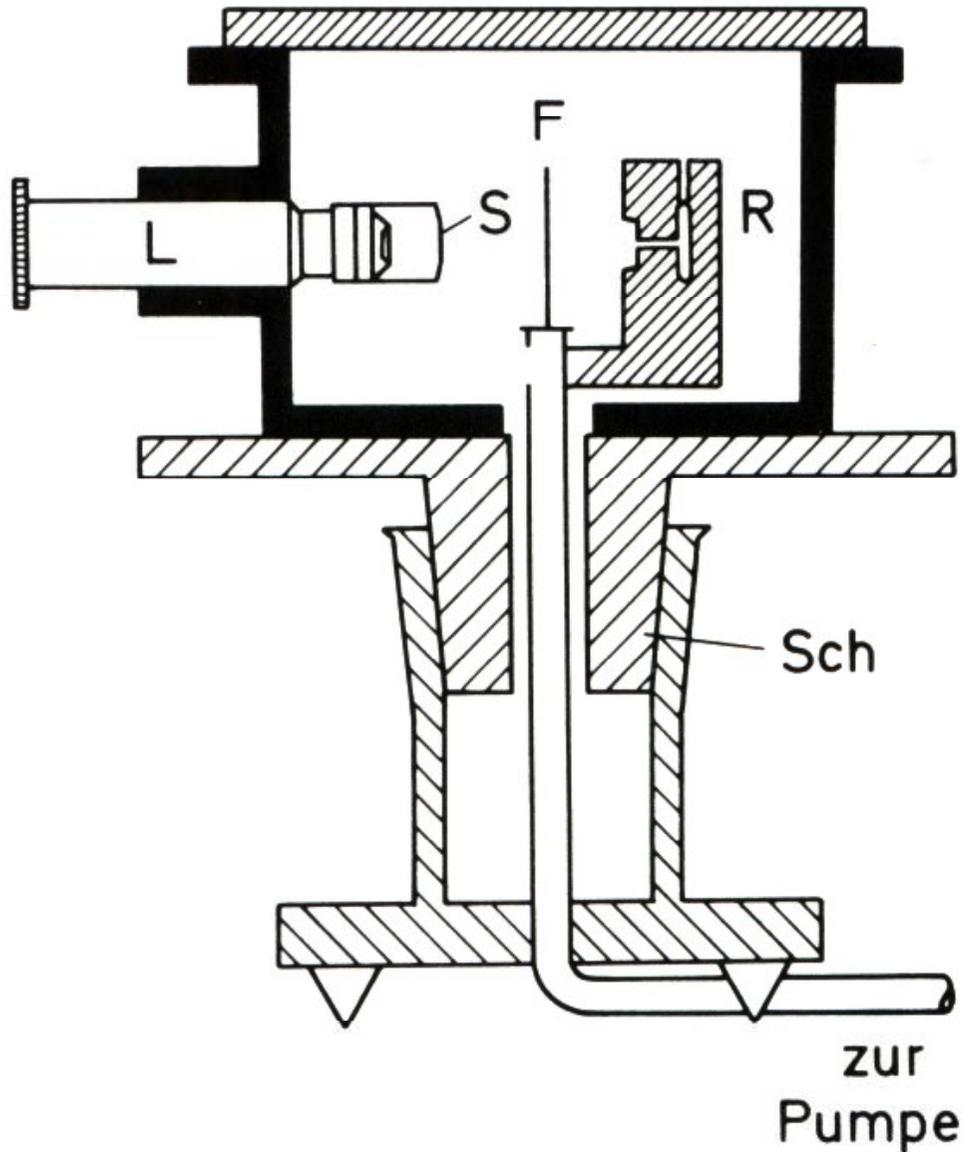
Nachweis, dass  $\alpha$ -Teilchen energiereiche positiv geladene Heliumatome sind

# Atomaufbau: Test durch Streuexperimente

Rutherford: Messung der Winkelverteilung gestreuter  $\alpha$ -Teilchen



# Rutherford/Geiger/Marsden Experiment



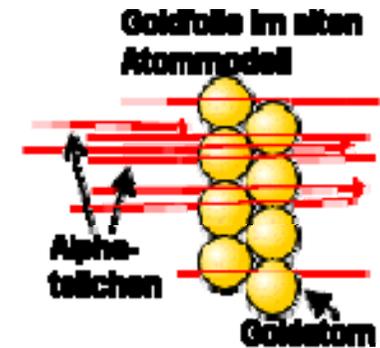
- R: Radon  $\alpha$ -Emitter
- F: Goldfolie
- S: Szintillatorschirm
- L: Beobachtungslupe

**Blendenkanal:**  
gerichteter Strahl  
von  $\alpha$ -Teilchen

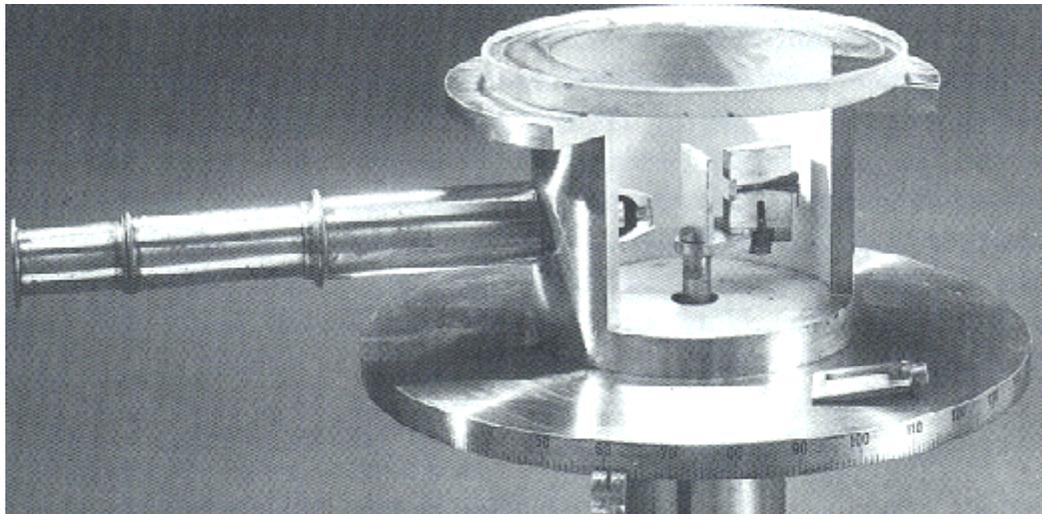
**Vakuum:**  
Streuung an Gold  
und nicht an Luft

# Verblüffende Ergebnisse

**Erwartung:** beim Durchlaufen der Goldfolie sollten die  $\alpha$ -Teilchen zwar langsamer werden, ihre Richtung aber fast ungestört beibehalten, ähnlich wie Geschosse, die auf einen Plumpudding mit Rosinen geschossen werden



**Beobachtung:** mit nicht-verschwindender Wahrscheinlichkeit wurde **Großwinkelstreuung** beobachtet



Rutherford später:

**...as if one had fired a large naval shell at a piece of tissue paper and it had bounced back...**

Es war fast so unglaublich, als wenn einer eine 15-Zoll-Granate auf ein Stück Seidenpapier abgefeuert hätte und diese zurückgekommen wäre und ihn getroffen hätte

# Behandlung von Streuproblemen

## Behandlung im Schwerpunktsystem:

Rückführung des Zwei-Körperproblems auf die Bewegung eines fiktiven Teilchens mit der reduzierten Masse  $m$

Streuzentrum wird räumlich fixiert angenommen

reduzierte Masse

$$m = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$$

Projektilmasse:  $m_1$

Targetmasse:  $m_2$

Anschließend Umrechnung auf das Laborsystem

## Beachtung der Erhaltungssätze:

**Energiesatz**

$$E_{\text{vor}} = E_{\text{nach}}$$

**Impulserhaltung**

$$\vec{p}_{\text{vor}} = \vec{p}_{\text{nach}}$$

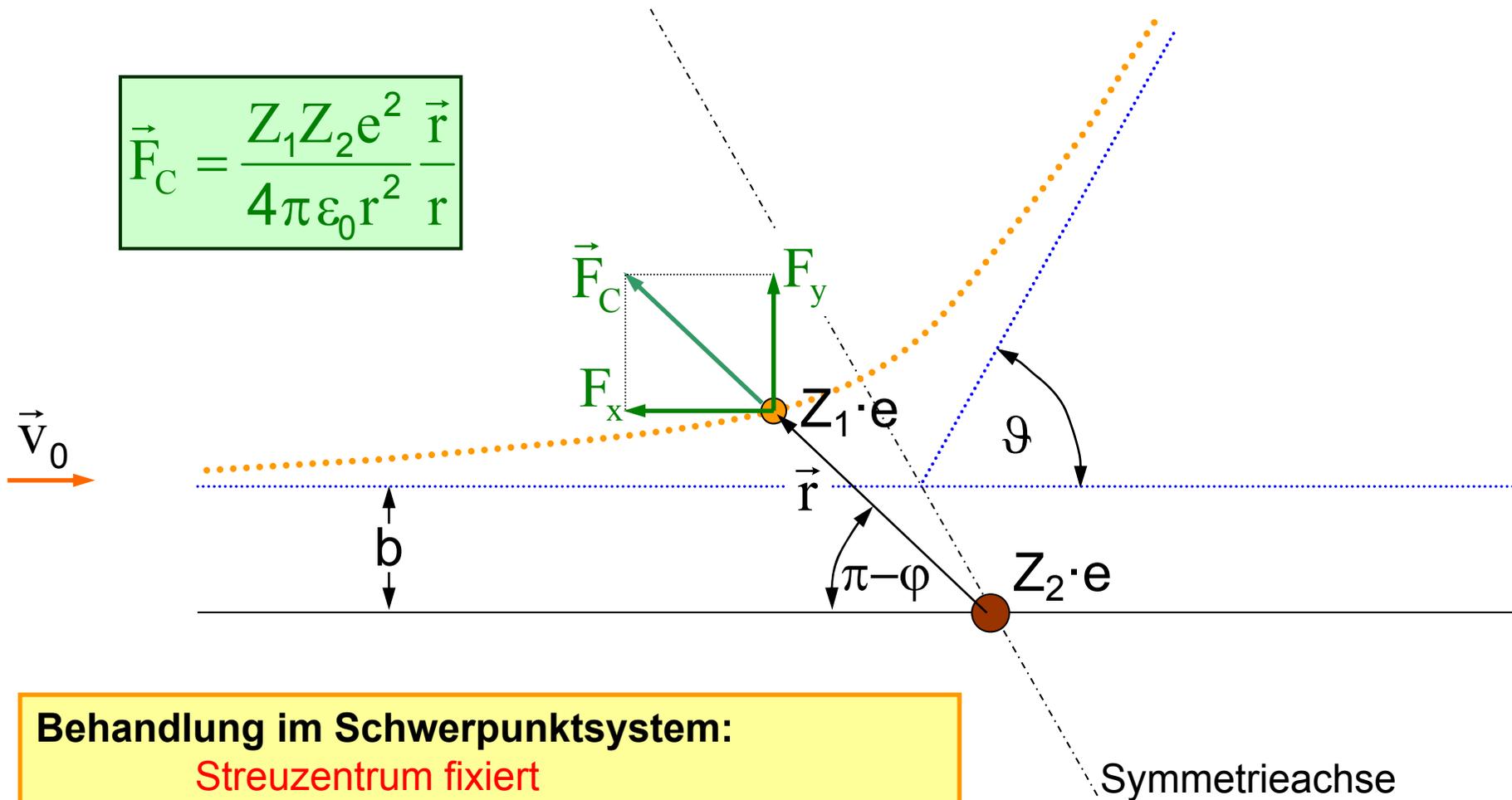
**Drehimpulserhaltung**

$$\vec{L}_{\text{vor}} = \vec{L}_{\text{nach}}$$

und andere mehr

# Coulombstreuung punktförmiger Teilchen

$$\vec{F}_C = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$



**Behandlung im Schwerpunktsystem:**

Streuzentrum fixiert

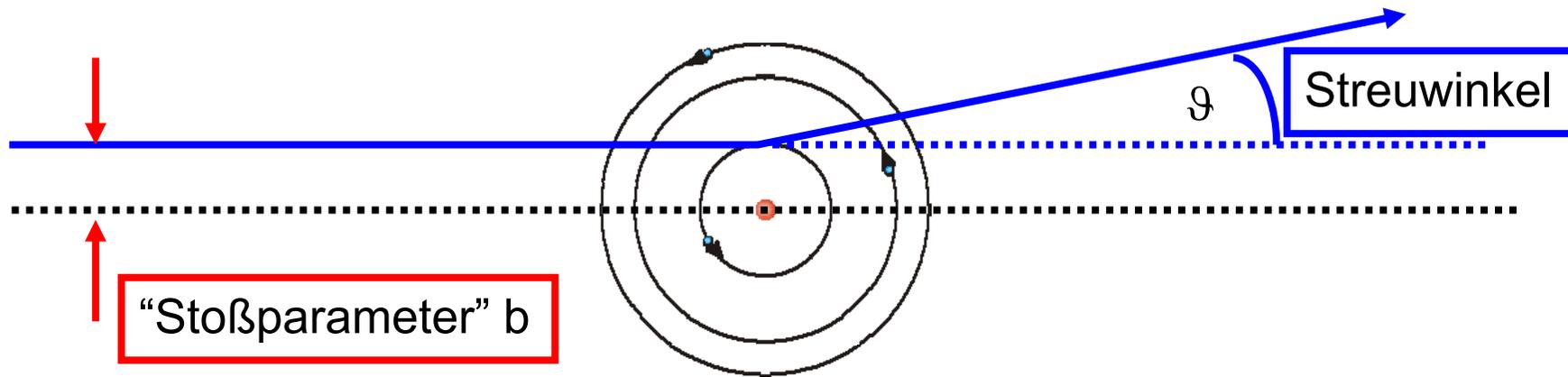
Verwendung der reduzierten Masse

$$m = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$$

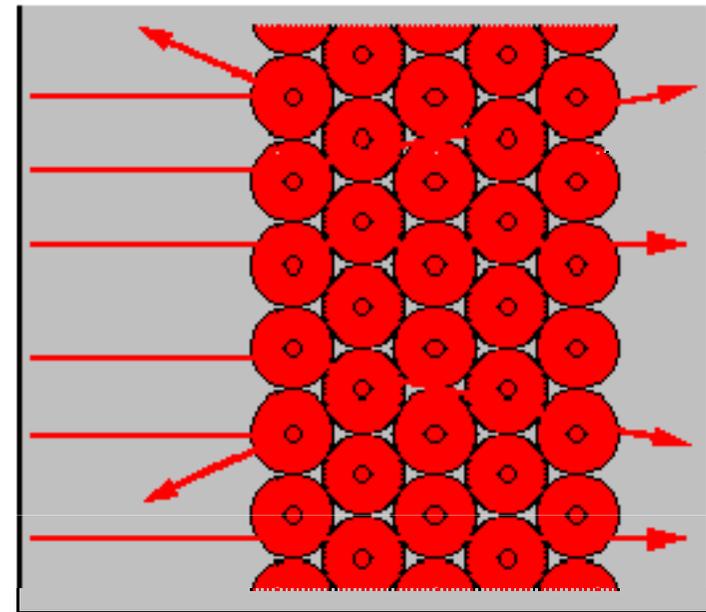
Projektilmasse:  $m_1$

Targetmasse:  $m_2$

# Atomaufbau: Test durch Streuexperimente



Anordnung der Goldatome in einer Goldfolie



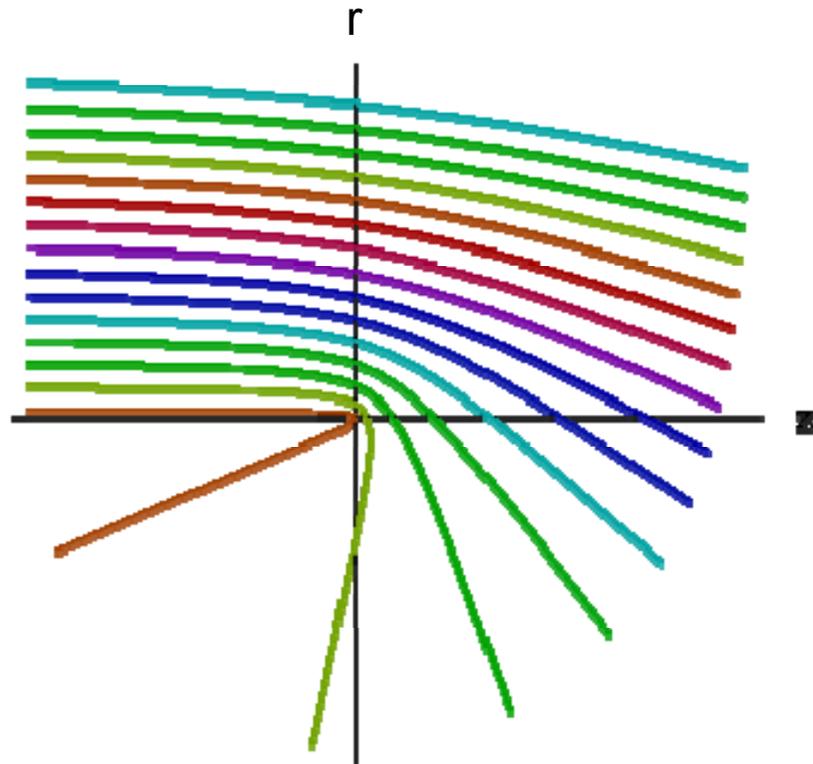
Rutherfords Streuversuch

$$b = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 m v_0^2 \tan(\vartheta/2)}$$

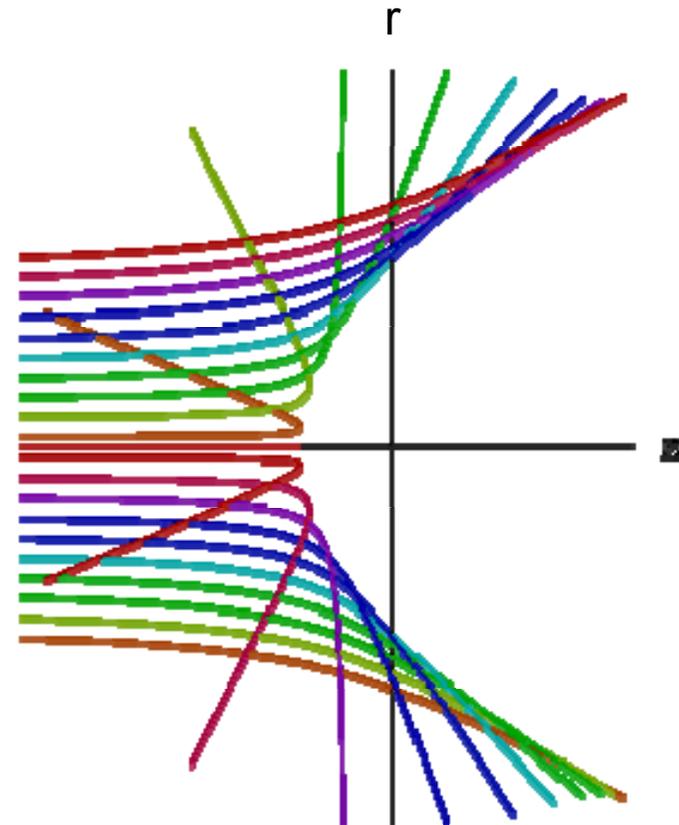
für Coulomb-Wechselwirkung  
zwischen Punktteilchen

# Trajektorien bei der Coulomb-Streuung

Entgegengesetzte Ladungen  
(anziehend)

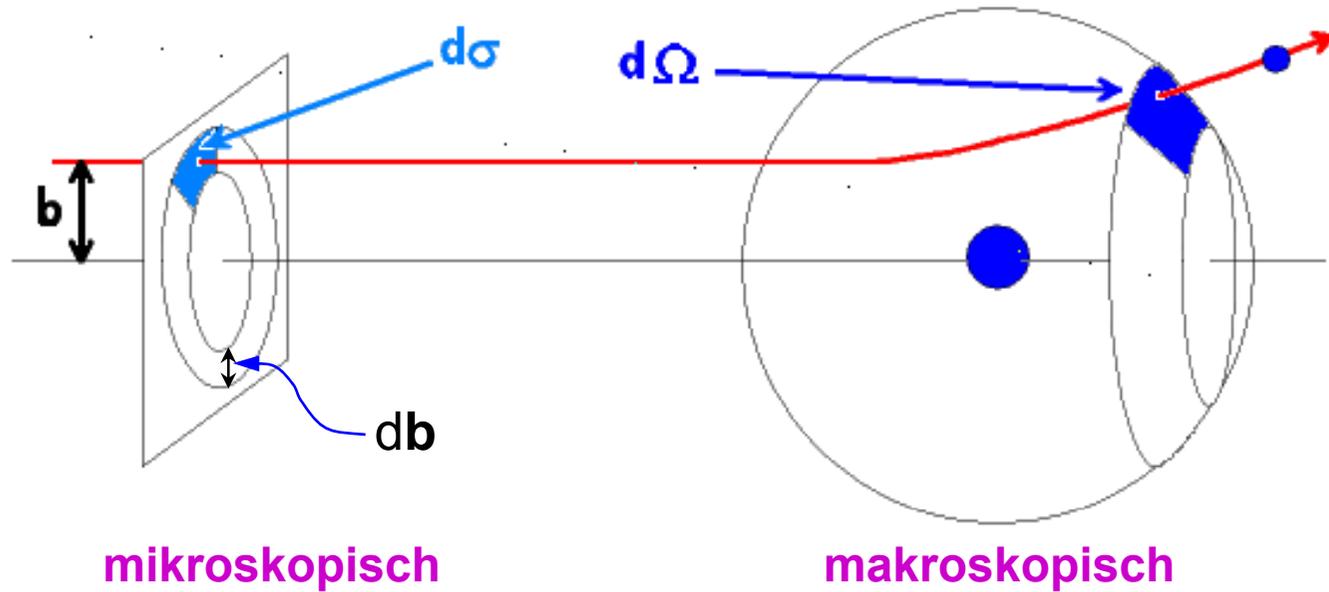


gleichnamige Ladungen  
(abstoßend)



Streuzentrum jeweils im Koordinatenursprung

# Stoßparameter, Streuwinkel, Wirkungsquerschnitt



Erhaltung des Teilchenflusses bei elastischer Streuung:

$$j_0 \cdot 2\pi b db = j_0 \cdot d\sigma = j_0 \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot 2\pi \sin \vartheta \cdot d\vartheta$$

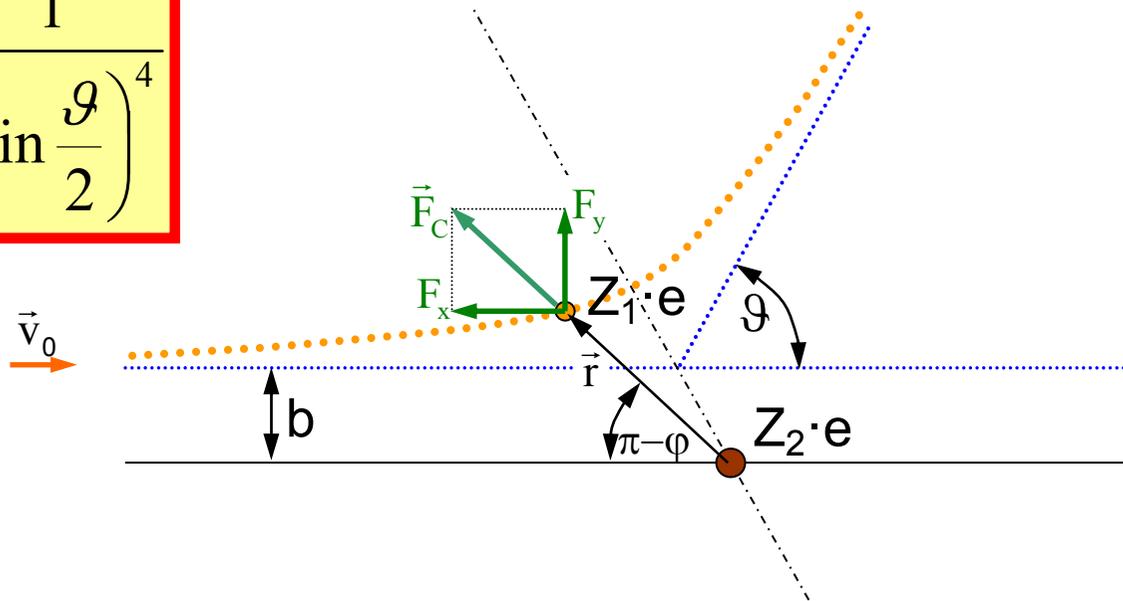
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left| \frac{b db}{\sin \vartheta d\vartheta} \right|$$

# Differentieller Wirkungsquerschnitt (Rutherford)

Coulomb-Streuung punktförmiger geladener Teilchen

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{16} \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 E_{kin}} \right)^2 \frac{1}{\left( \sin \frac{\vartheta}{2} \right)^4}$$

$$E_{kin} = \frac{mv_0^2}{2}$$



Formel gilt für das Schwerpunktsystem, d. h.

$$E_{kin} = \frac{m}{2} v_0^2, \quad \frac{d\sigma}{d\Omega}, \quad \vartheta \quad \text{sind Größen im Schwerpunktsystem}$$

# Schwerpunktsystem $\leftrightarrow$ Laborsystem

Targetteilchen sei zunächst in Ruhe; es nimmt im Stoß einen Impuls auf,

Bei elastischer Streuung gilt:

## Schwerpunktsystem:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{cm}}, \quad \mathcal{G}_{cm}, \quad v_0$$

### vor dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{cm}} = \frac{m}{2} v_0^2$$

### nach dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{cm}} = \frac{m}{2} v_0^2$$

## Laborsystem:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{Lab}}}, \quad \mathcal{G}_{\text{Lab}}, \quad v_0, \quad v_1, \quad v_2$$

### vor dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{Lab}} = \frac{m_1}{2} v_0^2$$

### nach dem Stoß

$$E_{\text{kin}}^{\text{Lab}} = \frac{m_1}{2} v_1^2 + \frac{m_2}{2} v_2^2$$

## Umrechnungen cm $\leftrightarrow$ Lab (nicht-relativistisch)

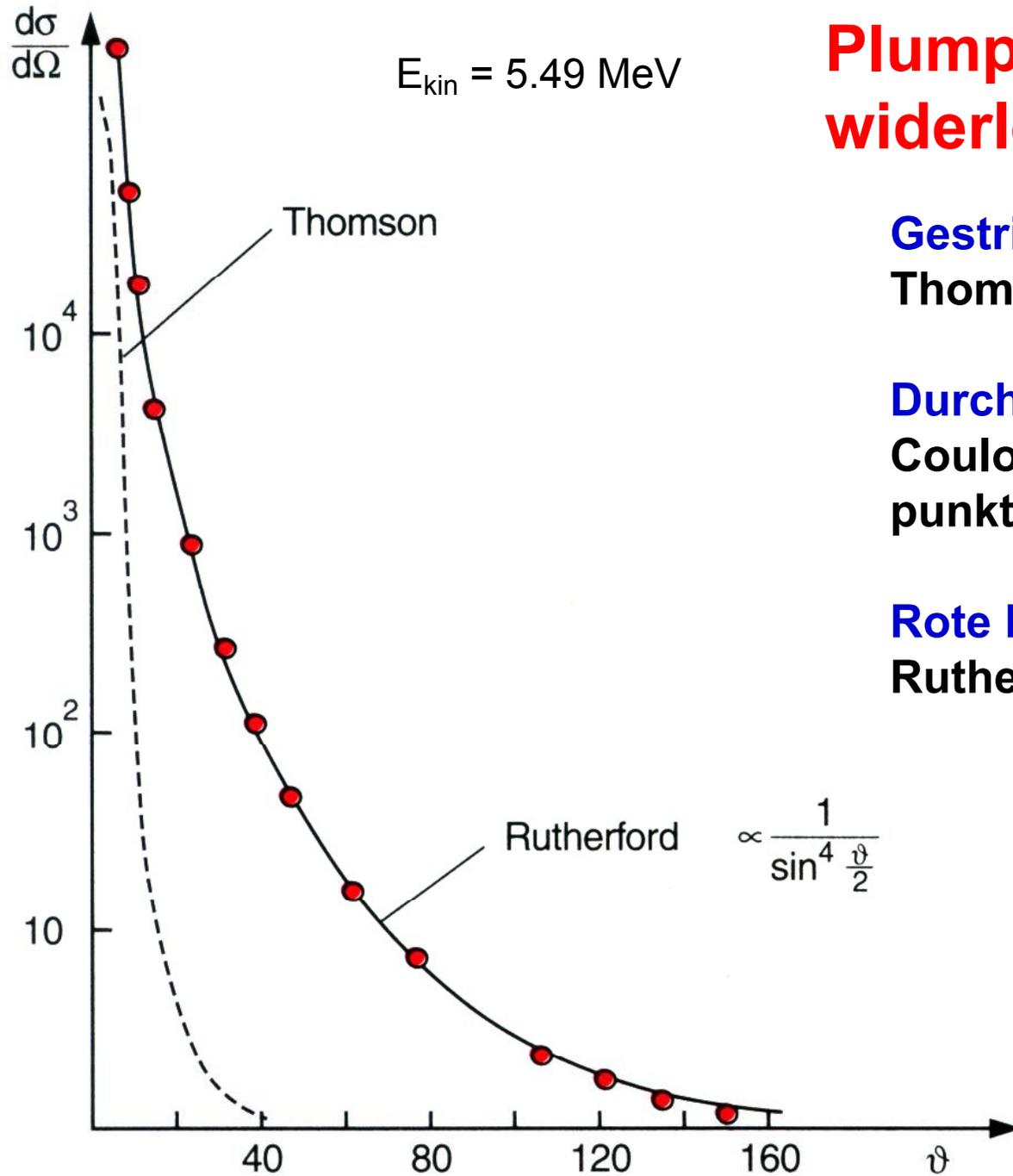
$$\frac{d\sigma(\vartheta_{\text{Lab}})}{d\Omega_{\text{Lab}}} = \frac{d\sigma(\vartheta_{\text{cm}})}{d\Omega_{\text{cm}}} \frac{d\Omega_{\text{cm}}}{d\Omega_{\text{Lab}}} = \frac{d\sigma(\vartheta_{\text{cm}}(\vartheta_{\text{Lab}}))}{d\Omega_{\text{cm}}} \frac{\sin \vartheta_{\text{cm}} d\vartheta_{\text{cm}}}{\sin \vartheta_{\text{Lab}} d\vartheta_{\text{Lab}}}$$

### Elastische Streuung:

$$\vartheta_{\text{Lab}} = \arctan\left(\frac{\sin \vartheta_{\text{cm}}}{\cos \vartheta_{\text{cm}} + m_1/m_2}\right)$$

$$\vartheta_{\text{cm}} = \arcsin\left[\frac{m_1}{m_2} \sin \vartheta_{\text{Lab}} \cos \vartheta_{\text{Lab}} \pm \sin \vartheta_{\text{Lab}} \sqrt{1 - \left(\frac{m_1}{m_2} \sin \vartheta_{\text{Lab}}\right)^2}\right]$$

$$v_1 = v_0 \frac{m_1}{m_1 + m_2} \left[ \cos \vartheta_{\text{Lab}} \pm \sqrt{(\cos \vartheta_{\text{Lab}})^2 + \frac{(m_2^2 - m_1^2)}{m_1^2}} \right]$$



## Plumpudding-Modell widerlegt

**Gestrichelte Linie:**  
Thomson-Modell

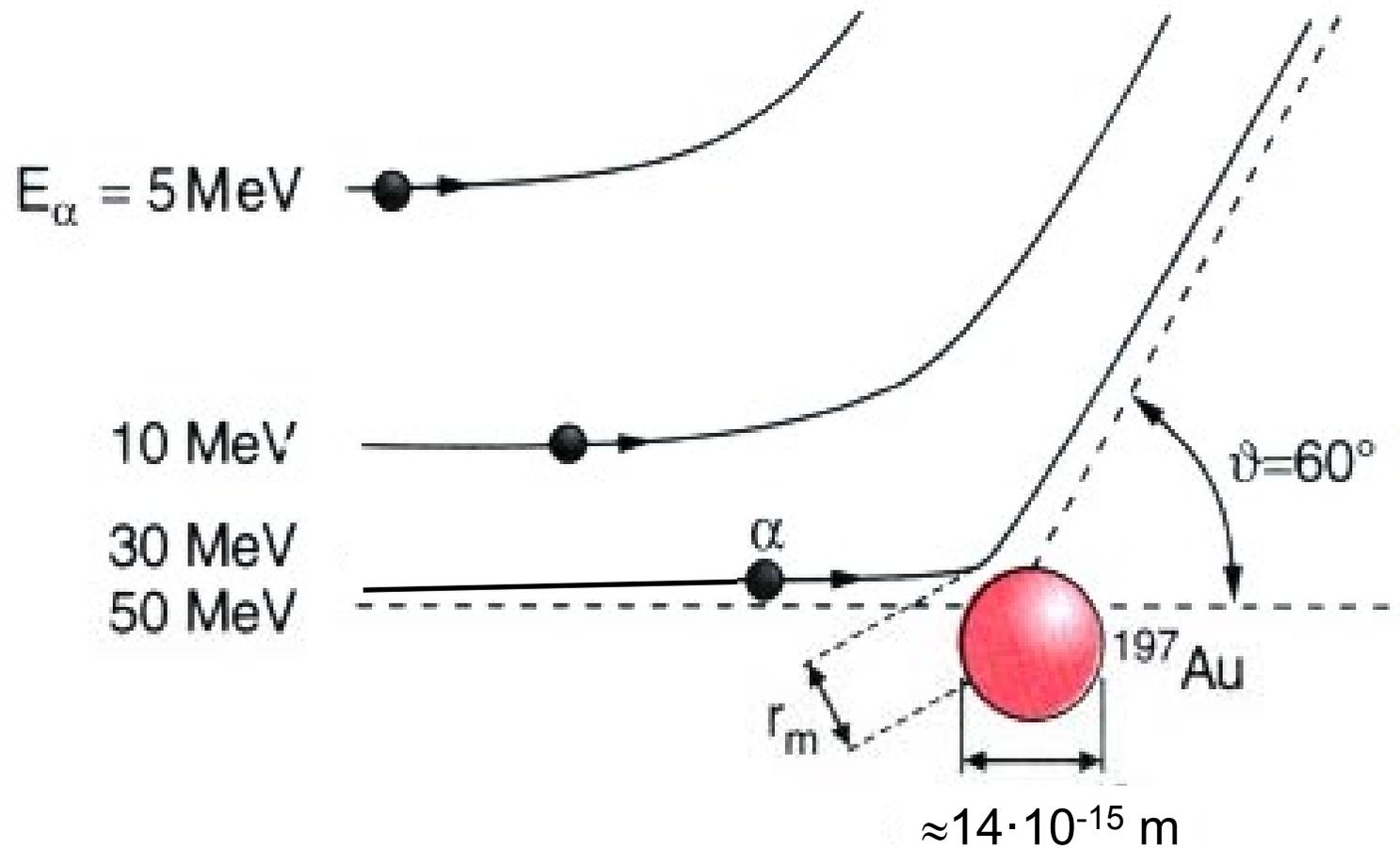
**Durchgezogene Linie:**  
Coulombstreuung  
punktförmiger Teilchen

**Rote Kreise:**  
Rutherfordexperiment

Ladung und Masse  
des Atoms finden  
sich fast vollständig  
in einem  
näherungsweise  
punktförmigen Kern

# Größe des Atomkerns

Winkel fest, Variation der Energie



Abweichung von Rutherfordstreuung bei Kernkontakt

# Größe des Atomkerns

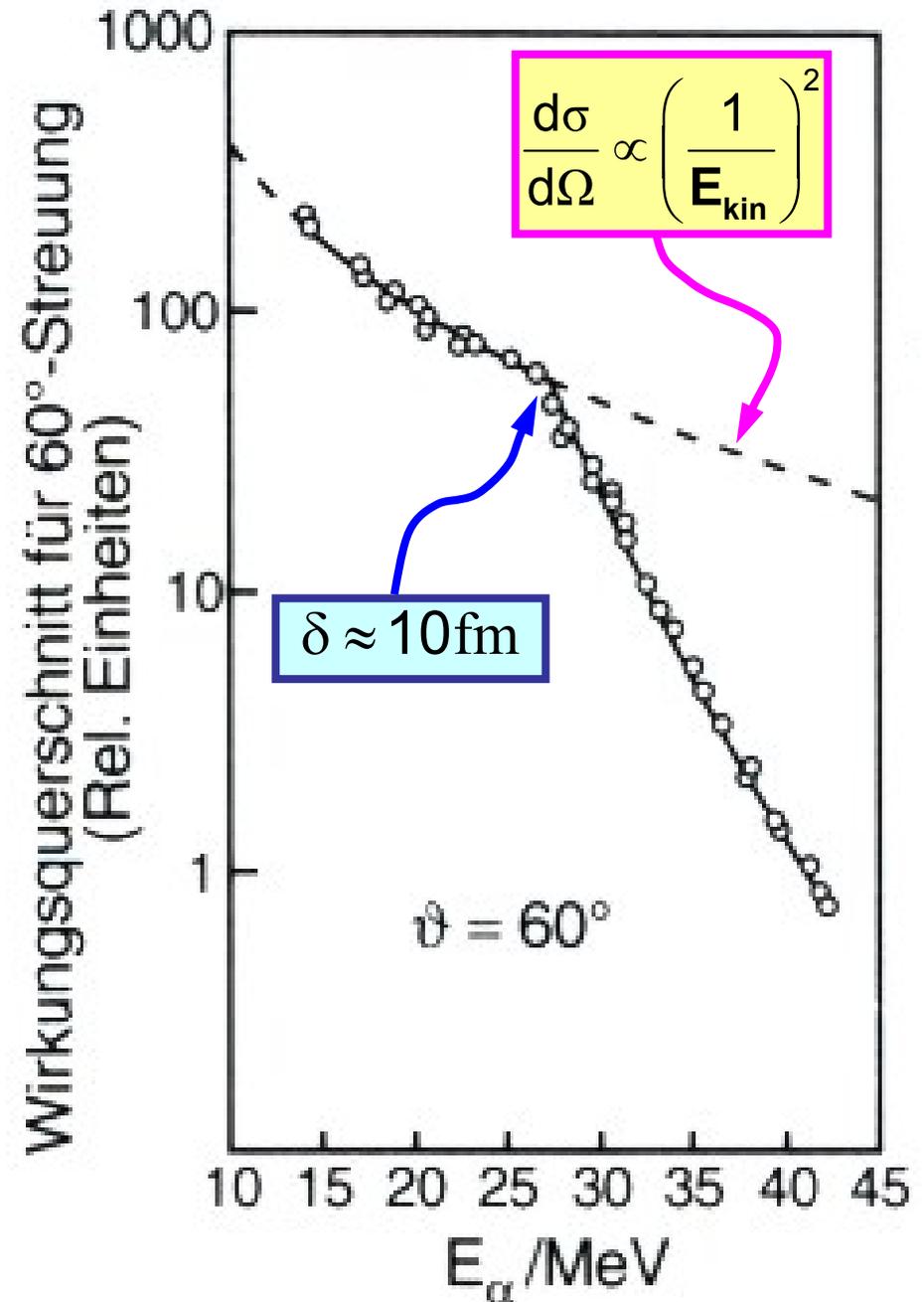
Zu jeder Energie erhält man bei festem Streuwinkel  $\vartheta$  einen Abstand größter Annäherung

$$\delta = \frac{\delta_0}{2} \left( 1 + \frac{1}{\sin \frac{\vartheta}{2}} \right)$$
$$\delta_0 = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 E_{\text{kin}}}$$

Kernradien (aus  $\alpha$ -Streuung):

$$R = 1.4 \cdot 10^{-15} \text{ m} \cdot A^{1/3}$$

A: Massenzahl



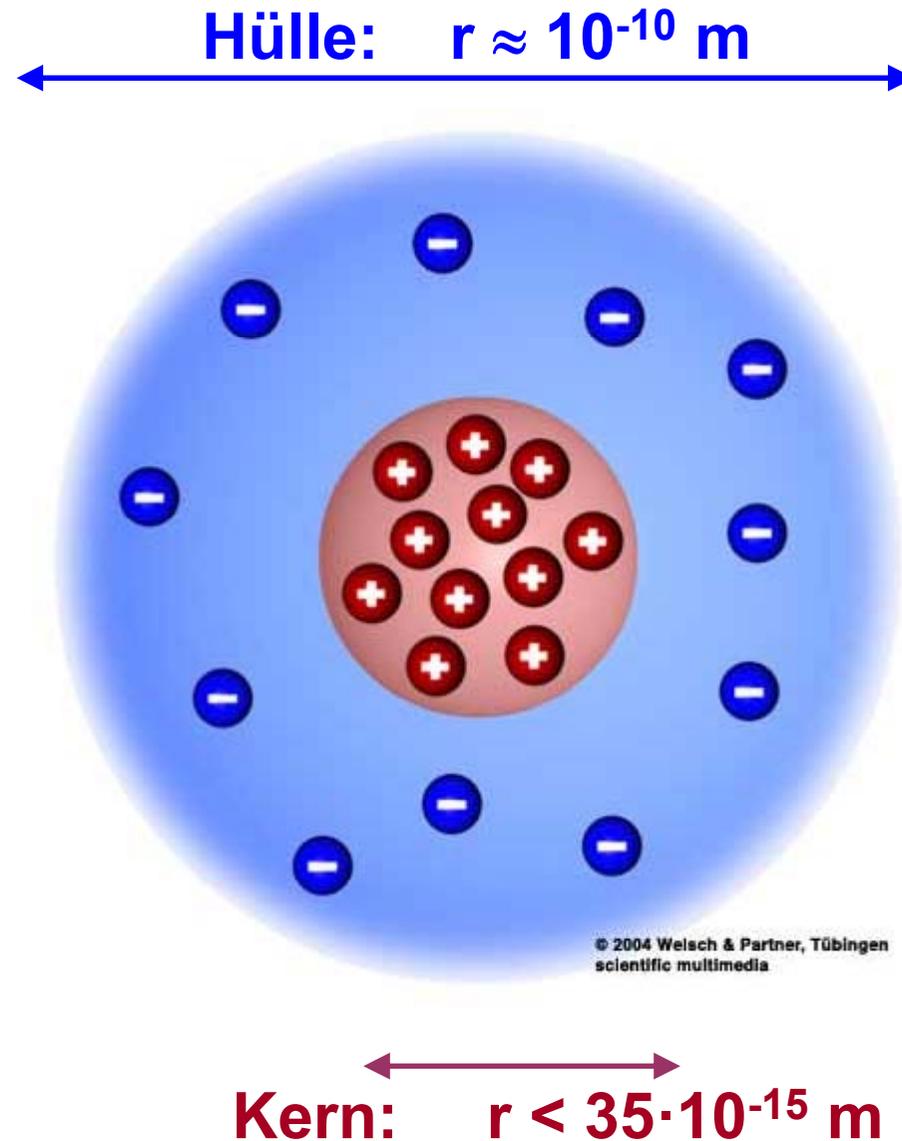
# Atommodell nach Rutherford

Bei 150°-Streuung von 5.5 MeV  $\alpha$ -Teilchen keine Abweichung von der Berechnung unter Annahme eines punktförmigen Kerns

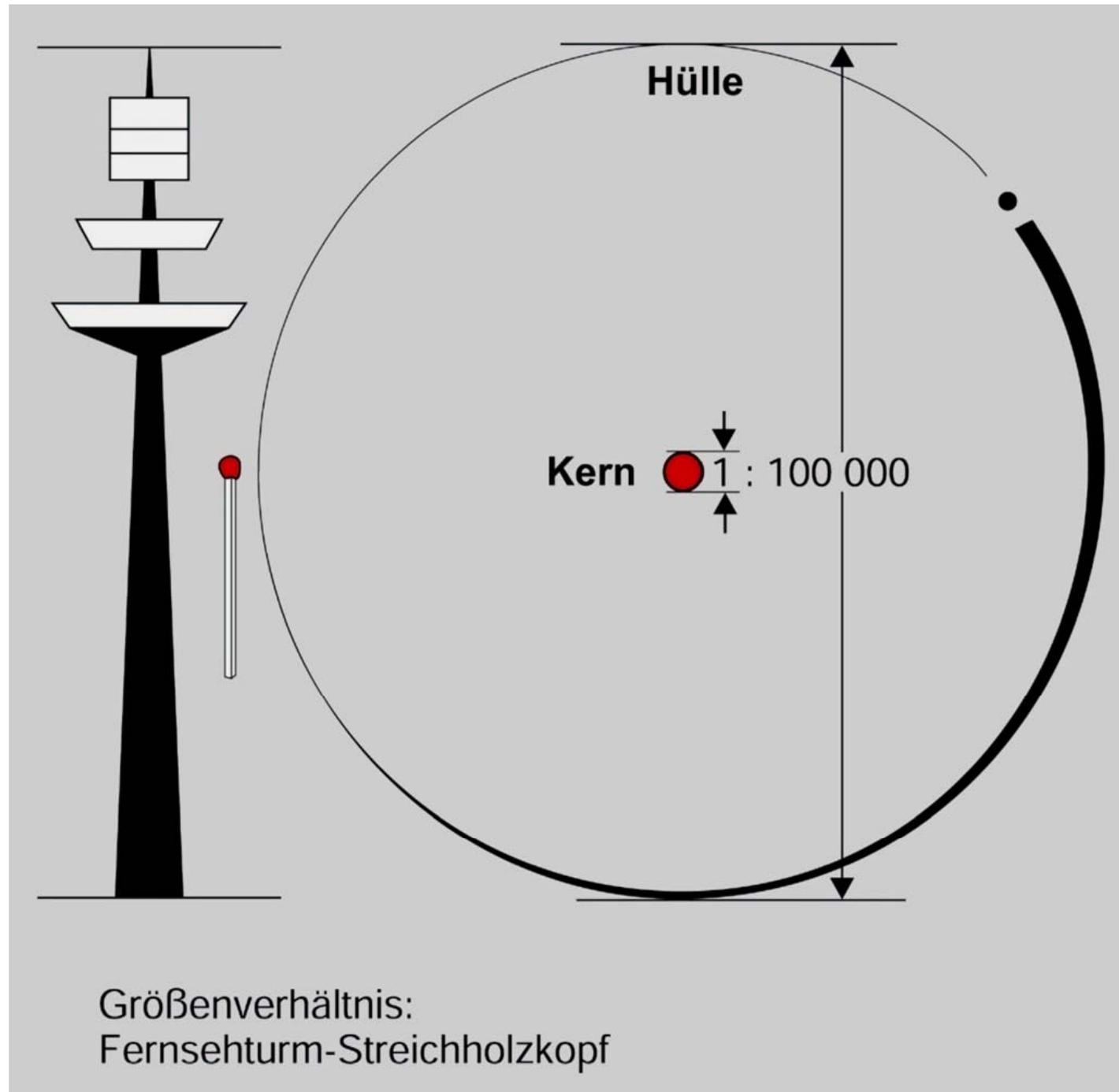


**Obergrenze für den Kernradius: ca. 35 fm**

Bei Atomradius von ca. 100 000 fm



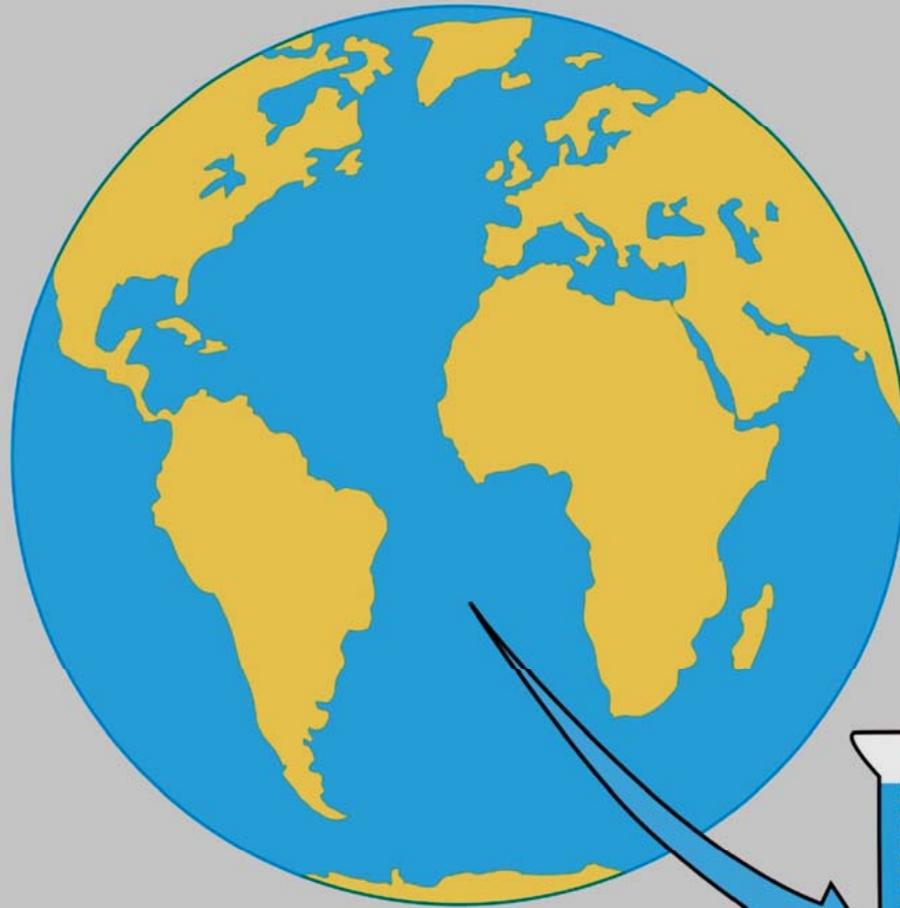
# Größen- vergleich



# Mengen- vergleich



1g Eisen enthält ca.  $10^{22}$  Atome



Verteilt im Wasser der Weltmeere  
(1 370 Mio km<sup>3</sup>)



ca. 7 Atome / l