

Chemie durch Laserlicht im Ionenkäfig

Andreas Wolf
Max-Planck-Institut für Kernphysik

Physik am Samstagmorgen, MPIK Heidelberg, 24.1.2009

1. Geladene Teilchen und Felder
2. Auf der Suche nach dem Ionenkäfig
3. Kalte Chemie
4. Chemie mit Ionen im Käfig bei $< -200^{\circ}\text{C}$

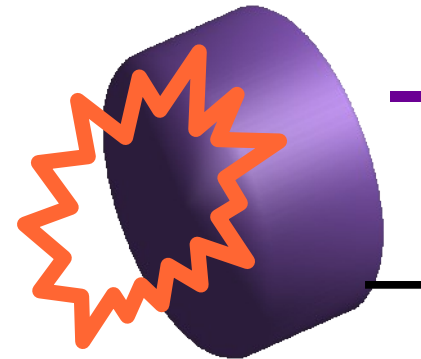
Geladene Teilchen und elektrische Felder

Ionenmasse und -ladung:

$$M = m = 5 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$Q = e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ As}$$

$$\text{Energie } 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Js}$$



-

Vakuum
< 10^{-4} mbar

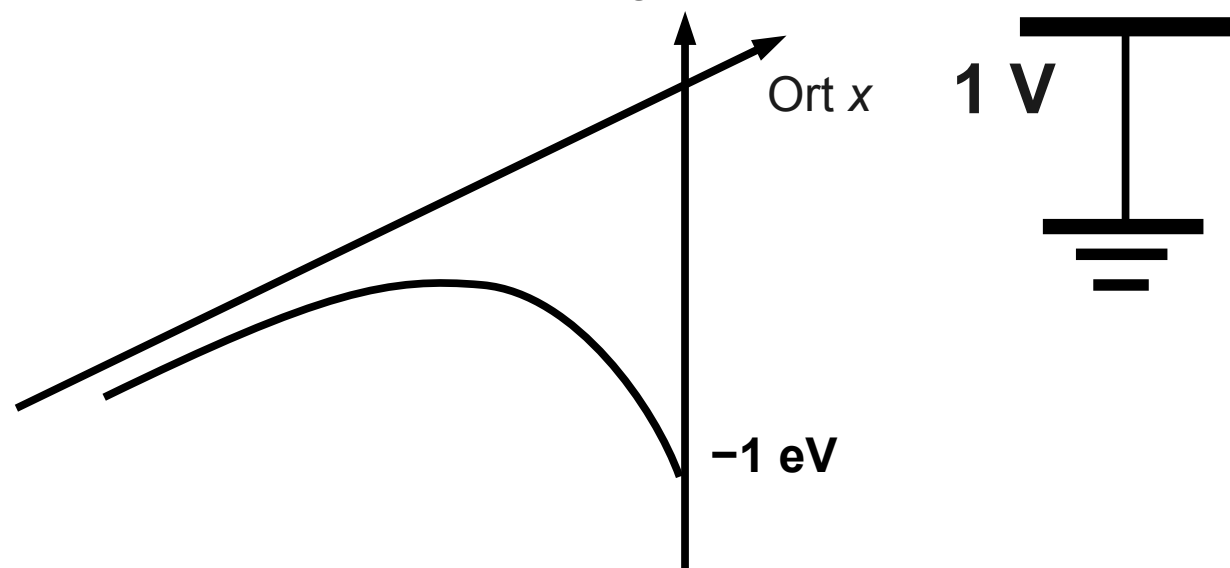
(viel besser in
Fallen mit
langer
Speicherdauer)

Potentielle Energie U

Ort x

1 V

-1 eV



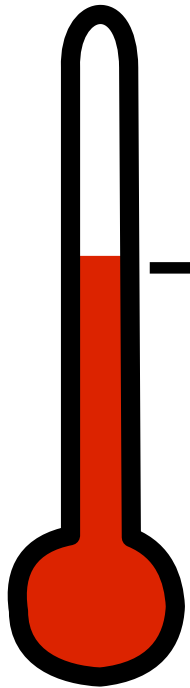
Geladene Teilchen und elektrische Felder

Ionenmasse und -ladung:

$$M = u = 5 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$Q = e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ As}$$

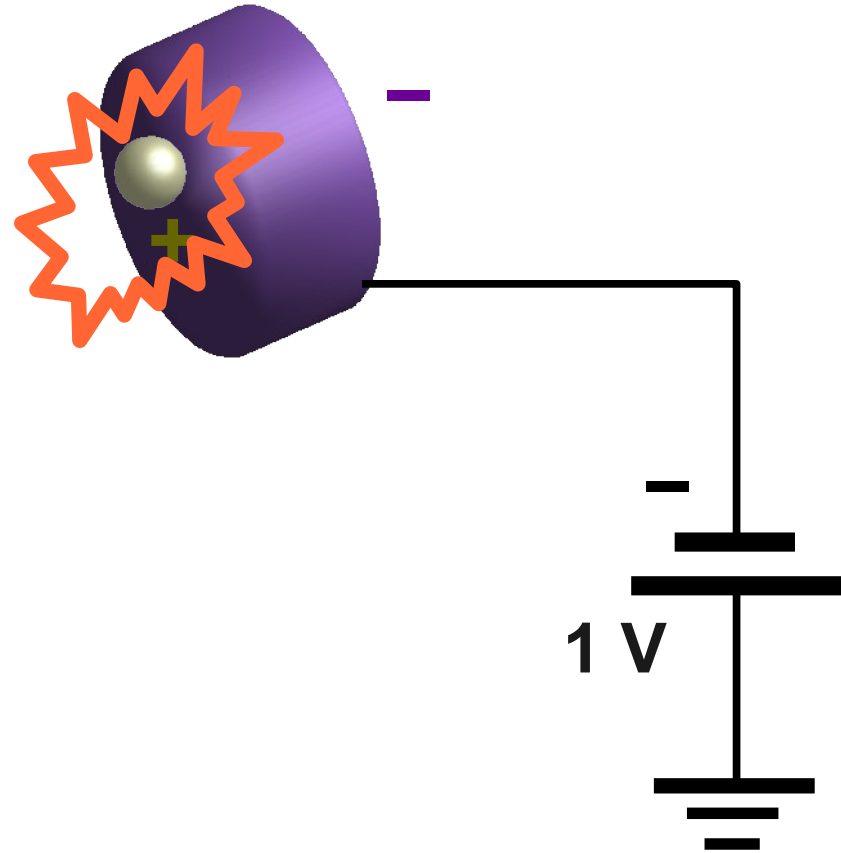
Gasmoleküle hätten die gleiche kinetische Energie bei



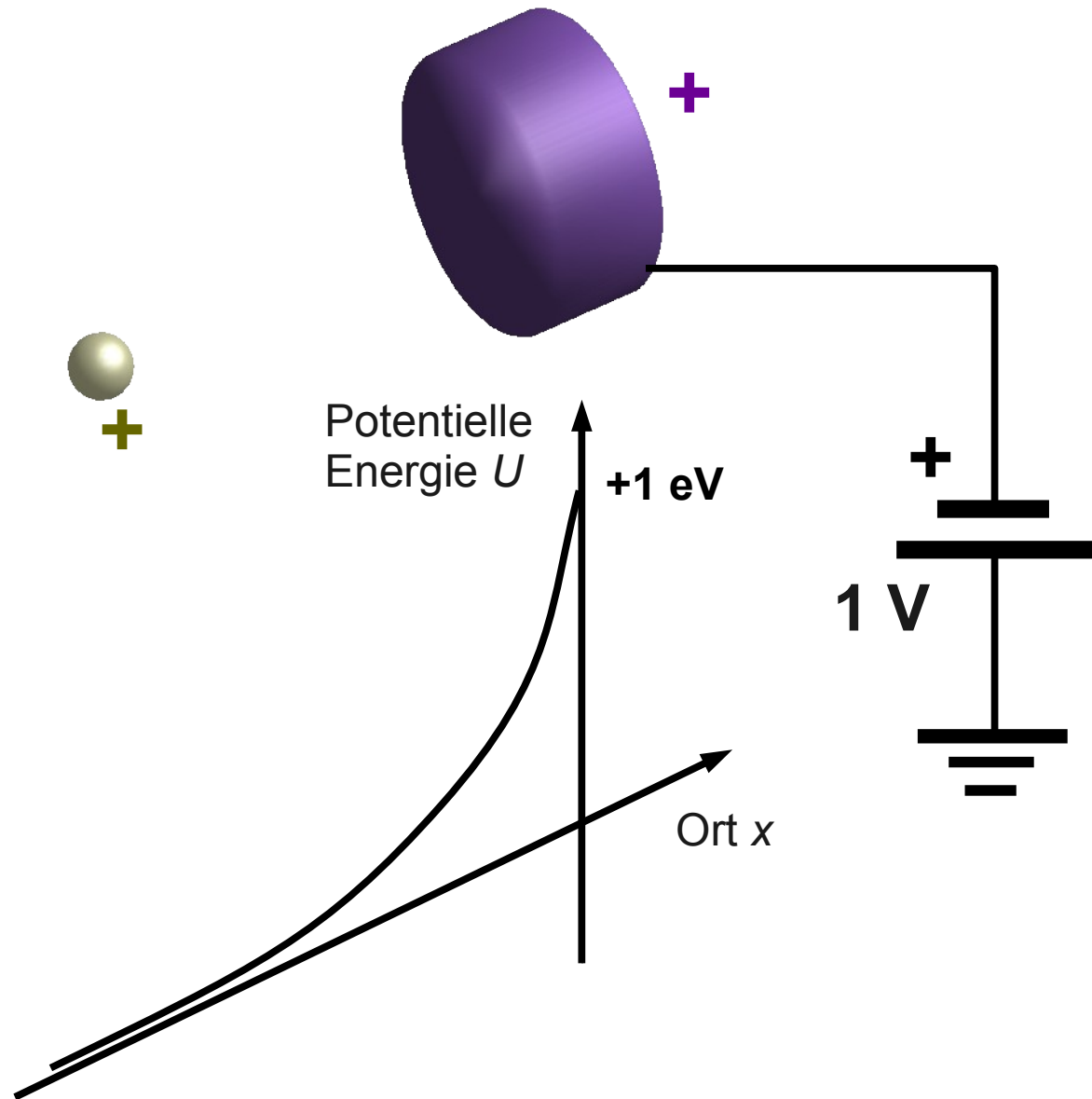
$$T = 11600 \text{ K} \\ = 11330 \text{ °C}$$

$$20 \text{ °C} \sim 300 \text{ K} \sim 0.025 \text{ eV}$$

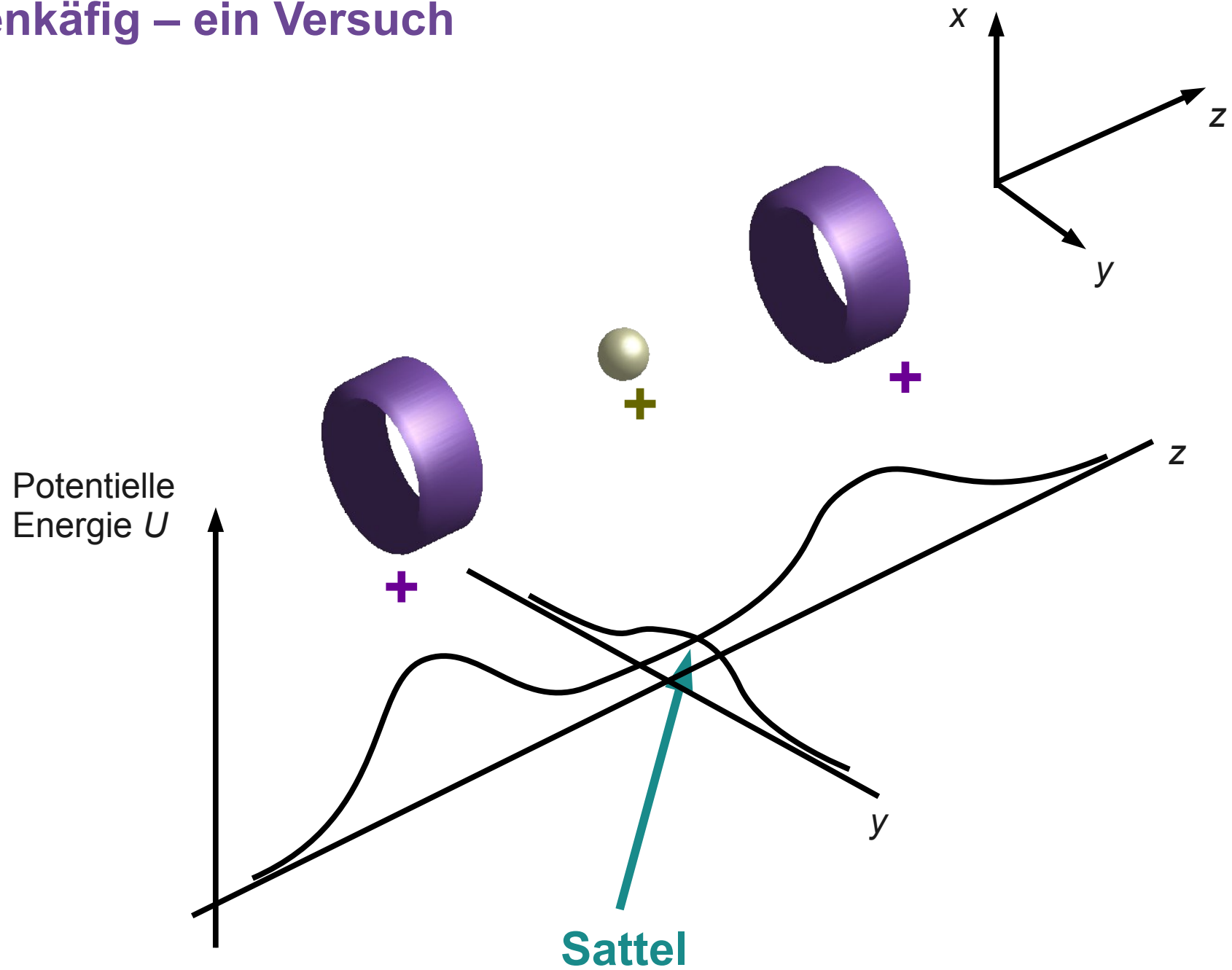
$$\text{Energie } 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Ws}$$



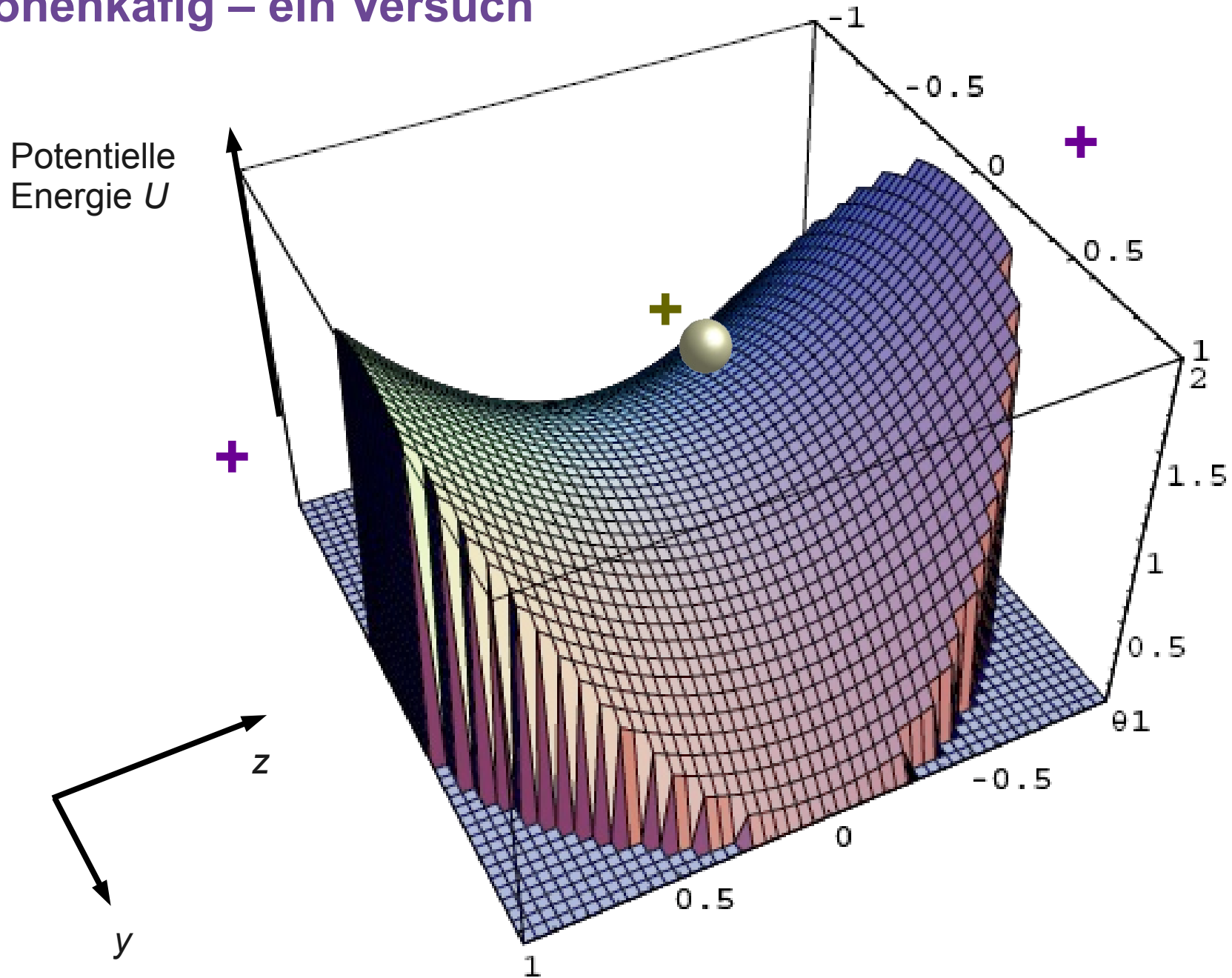
Geladene Teilchen und elektrische Felder



Ionenkäfig – ein Versuch

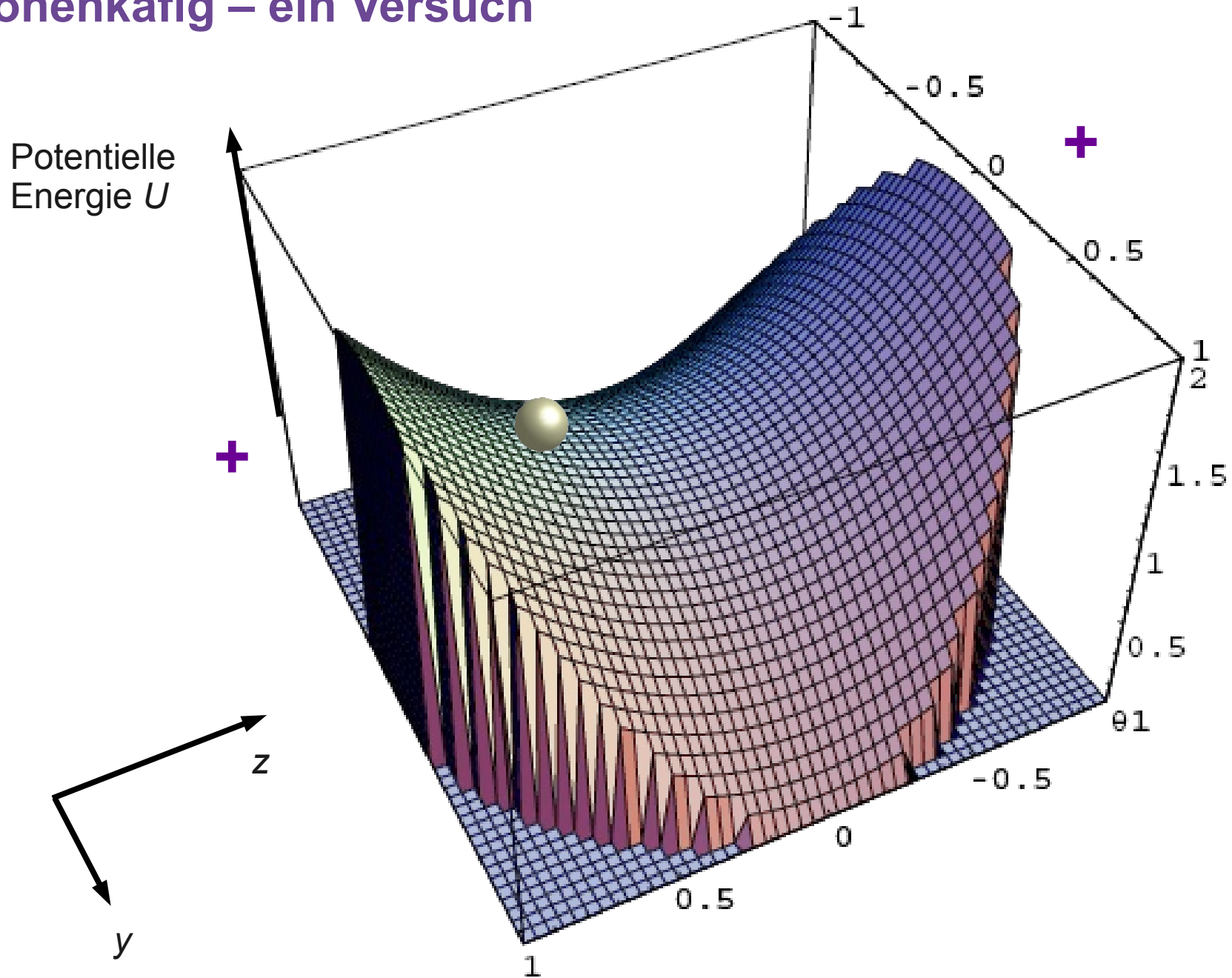


Ionenkäfig – ein Versuch



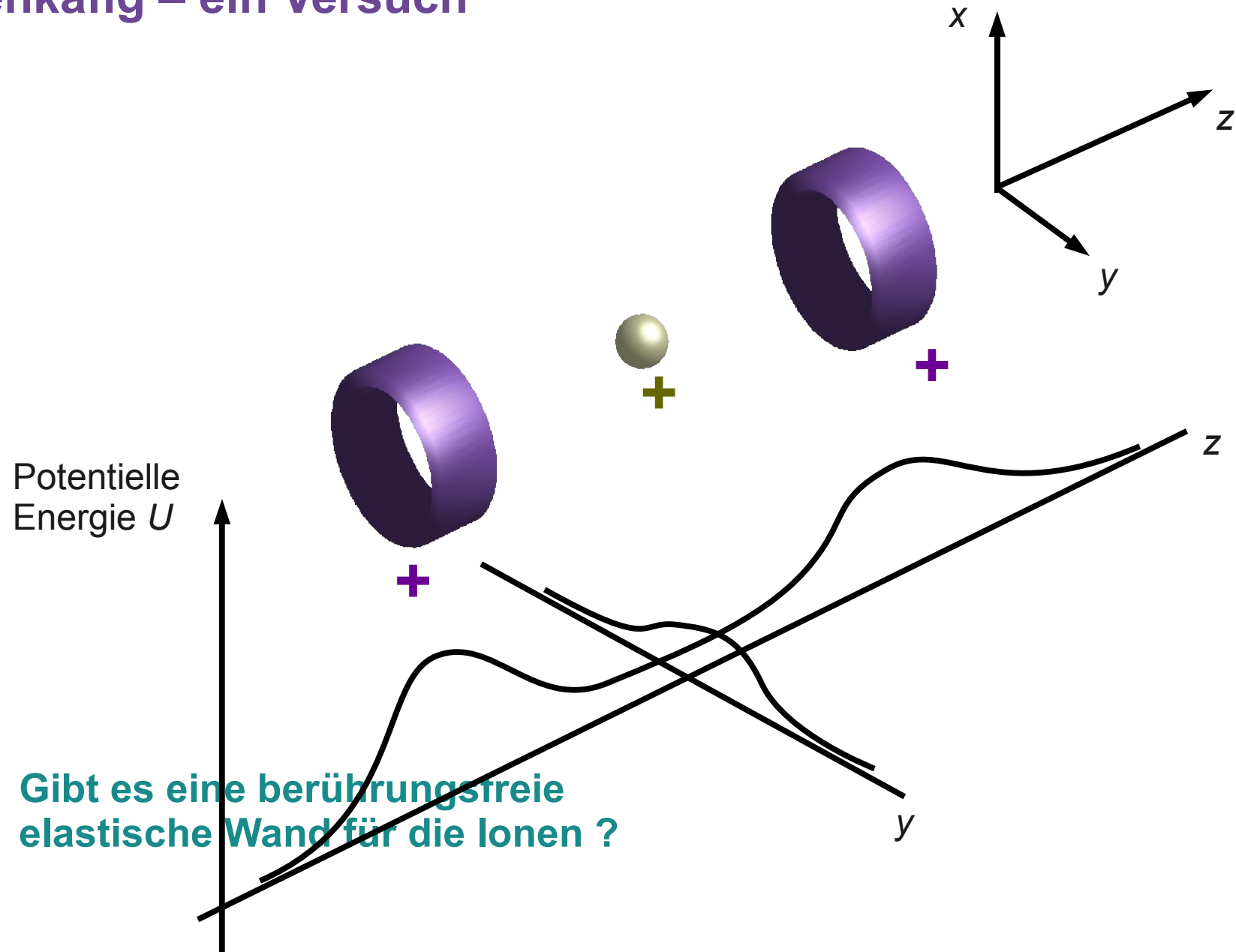
Teilchen auf dem Sattel

Ionenkäfig – ein Versuch

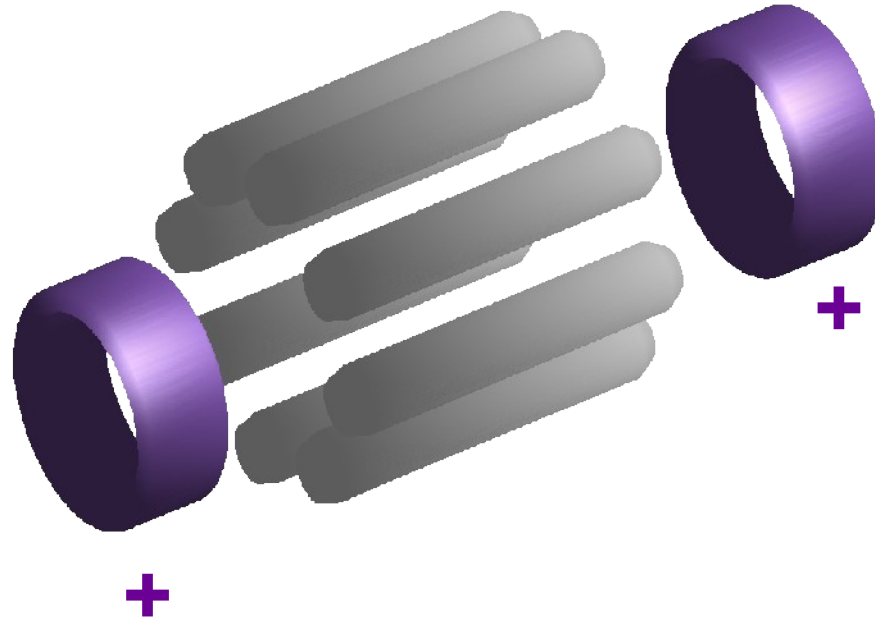


Teilchen auf dem Sattel

Ionenkäfig – ein Versuch

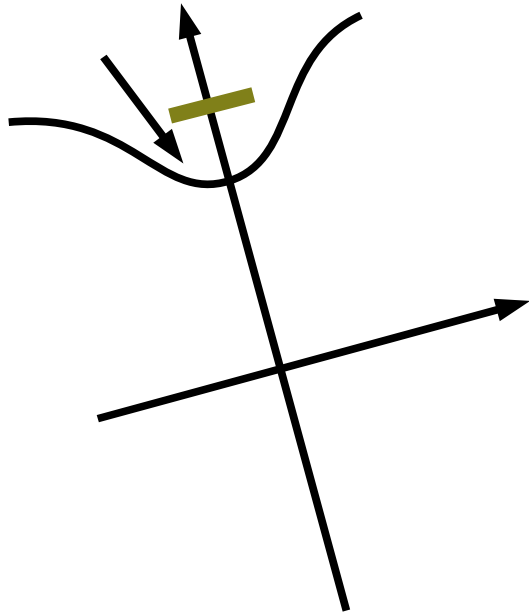


Ionenkäfig – ein Versuch

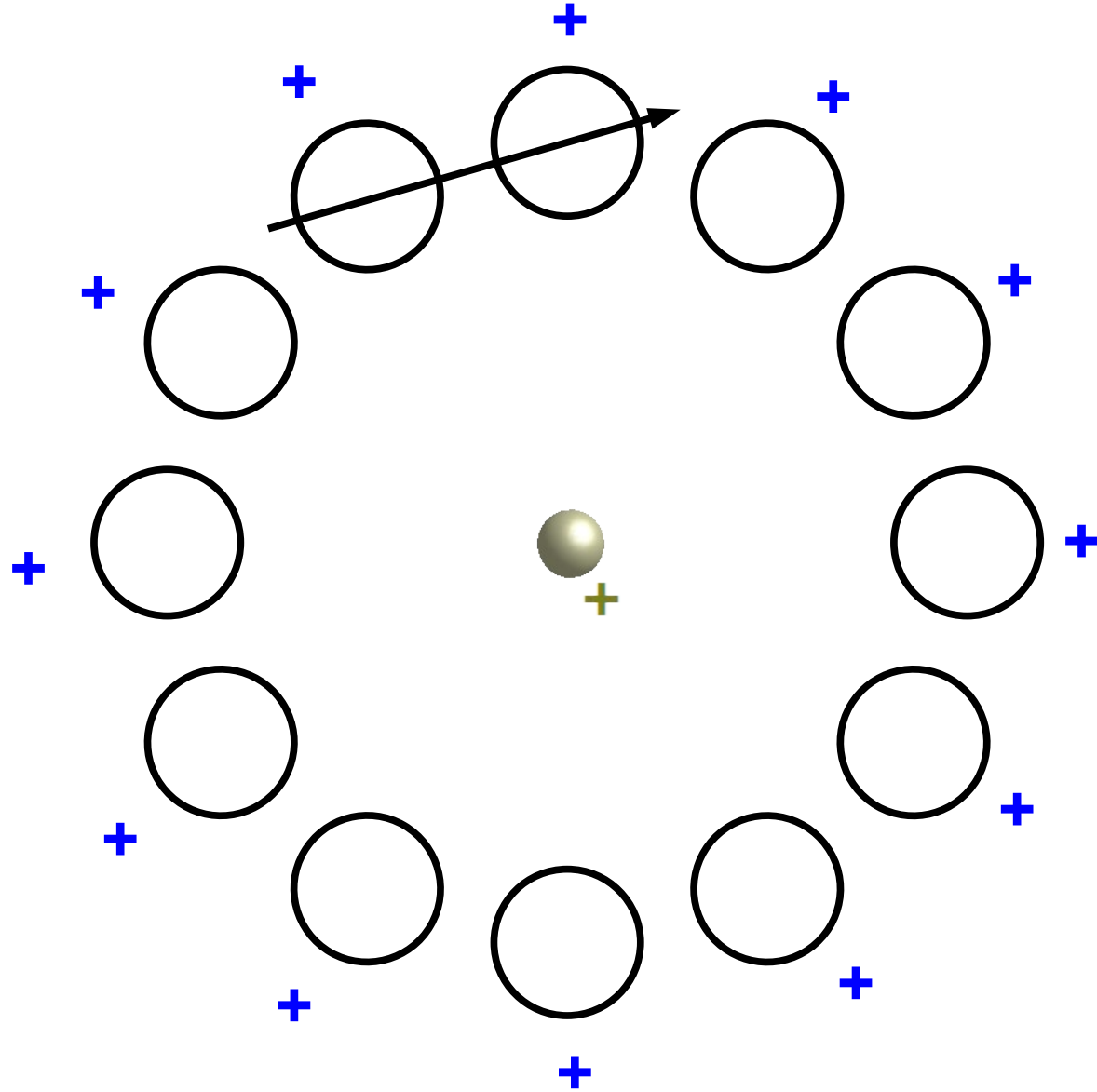


Gibt es eine berührungsfreie
elastische Wand für die Ionen ?

Potentielle
Energie U

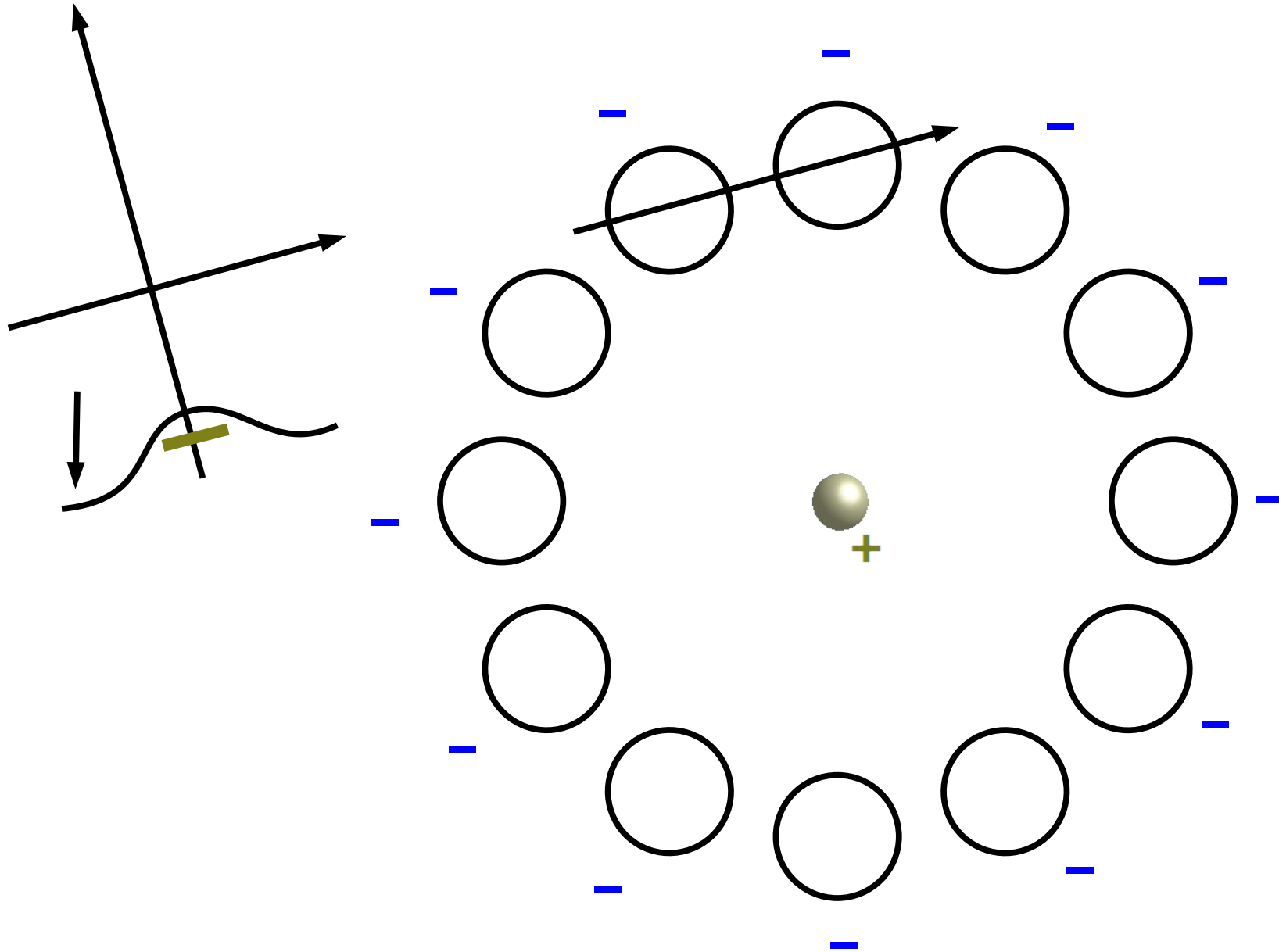


Stangen an
positiver Spannungsquelle

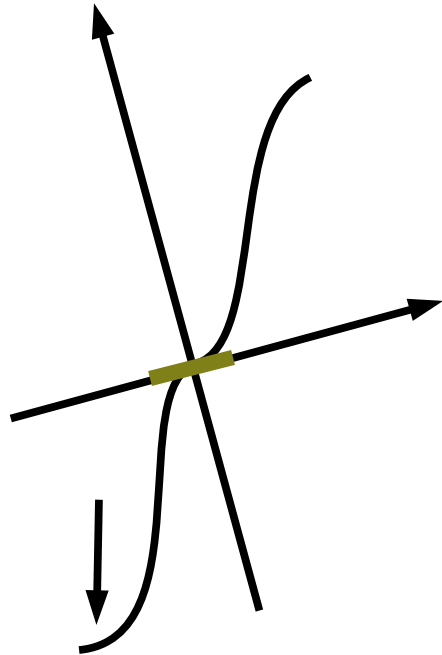


Potentielle
Energie U

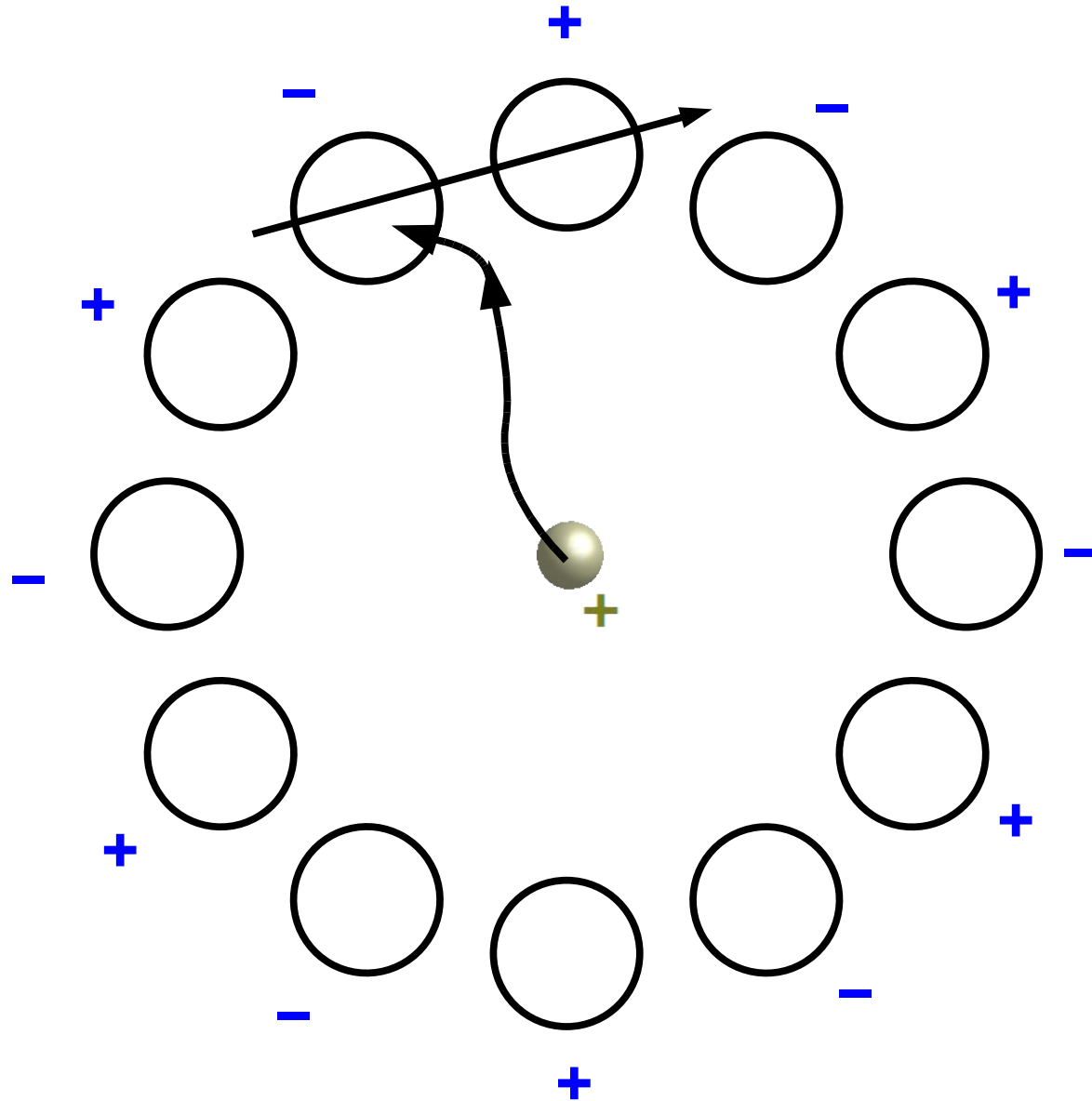
Stangen an
negativer Spannungsquelle



Potentielle
Energie U

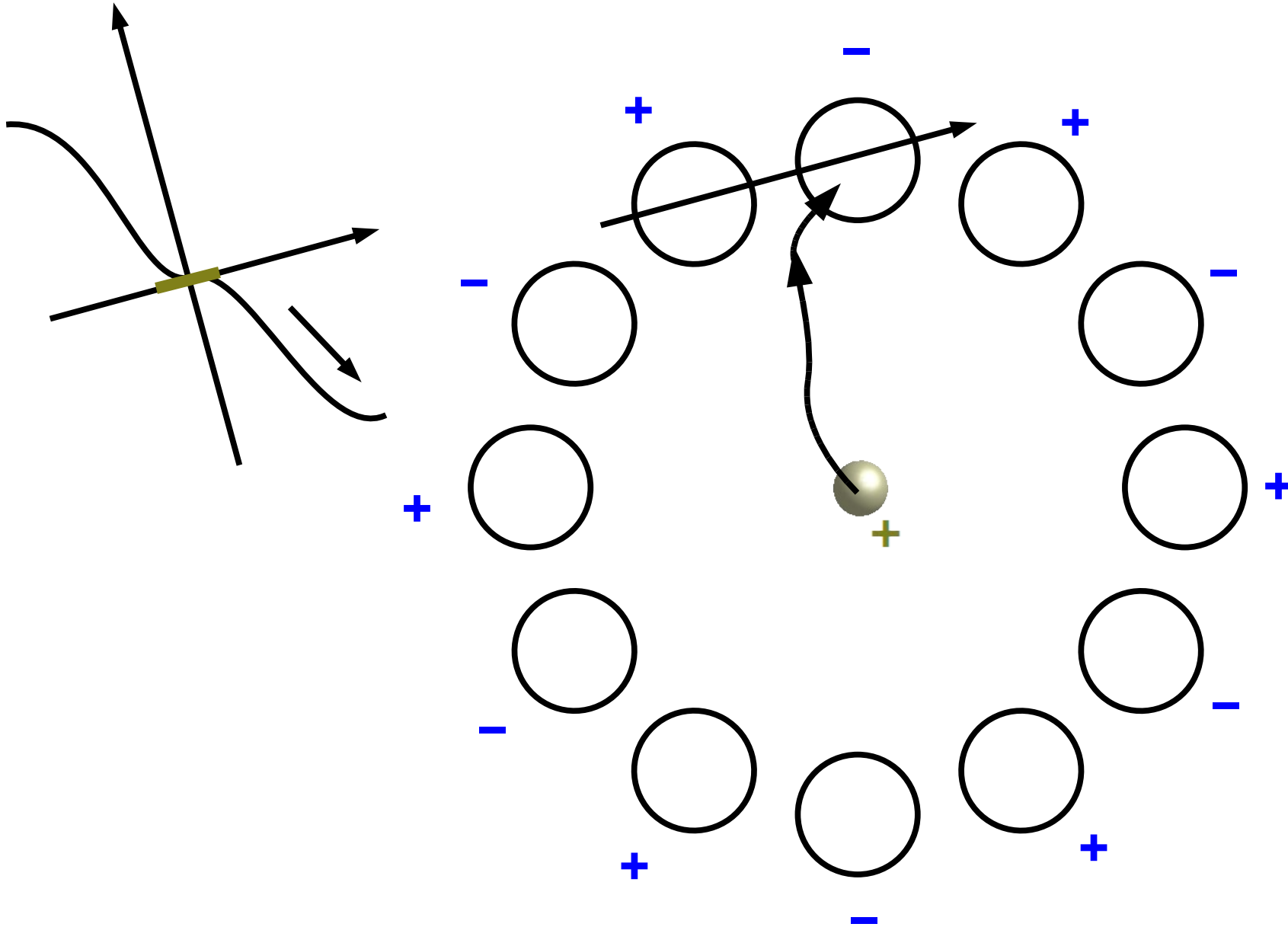


Stangen
abwechselnd gepolt

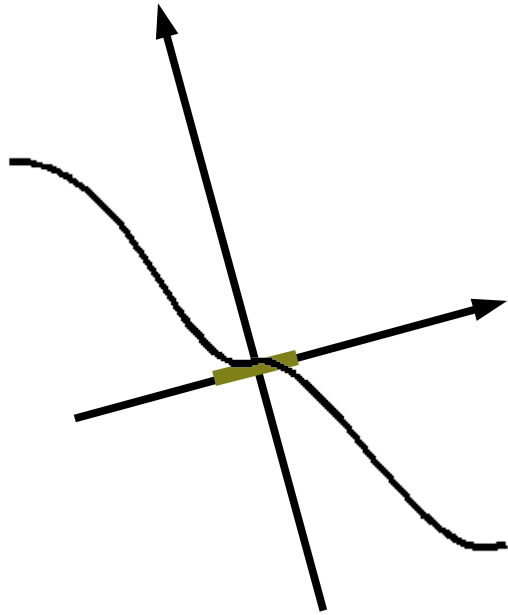


Potentielle
Energie U

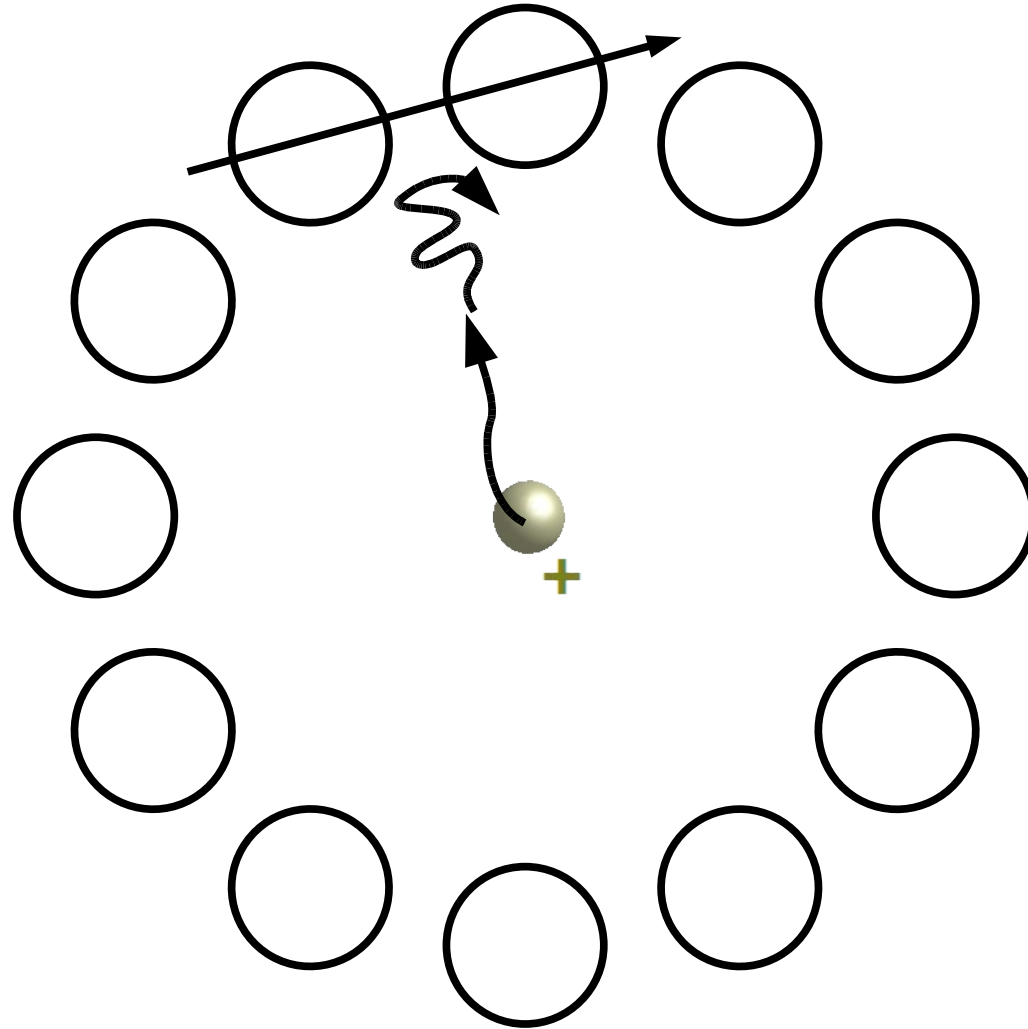
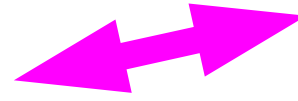
Stangen
abwechselnd gepolt



Potentielle
Energie U



Schnelle zeitliche Änderung
= Hochfrequente
Wechselspannung



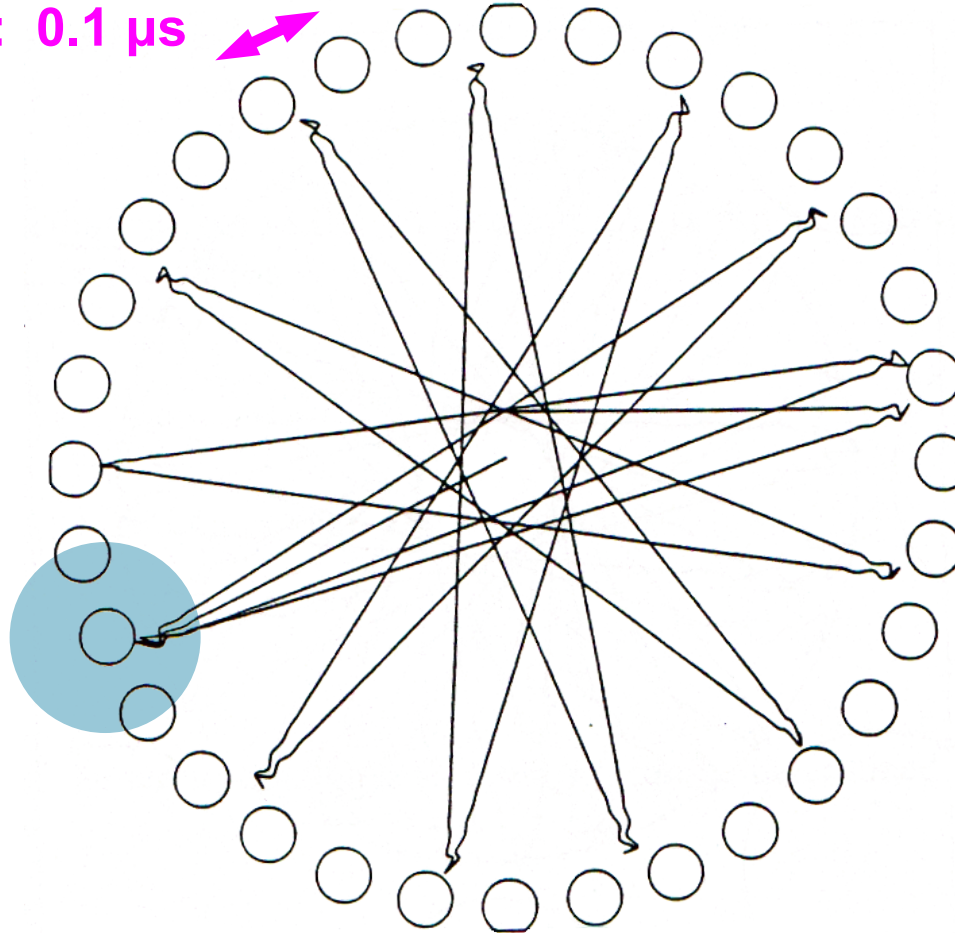
Hochfrequenz-Ionenkäfig mit „reflektierenden“ Wänden

Wechselspannung

~ 10 Mhz

Periode: 0.1 μ s

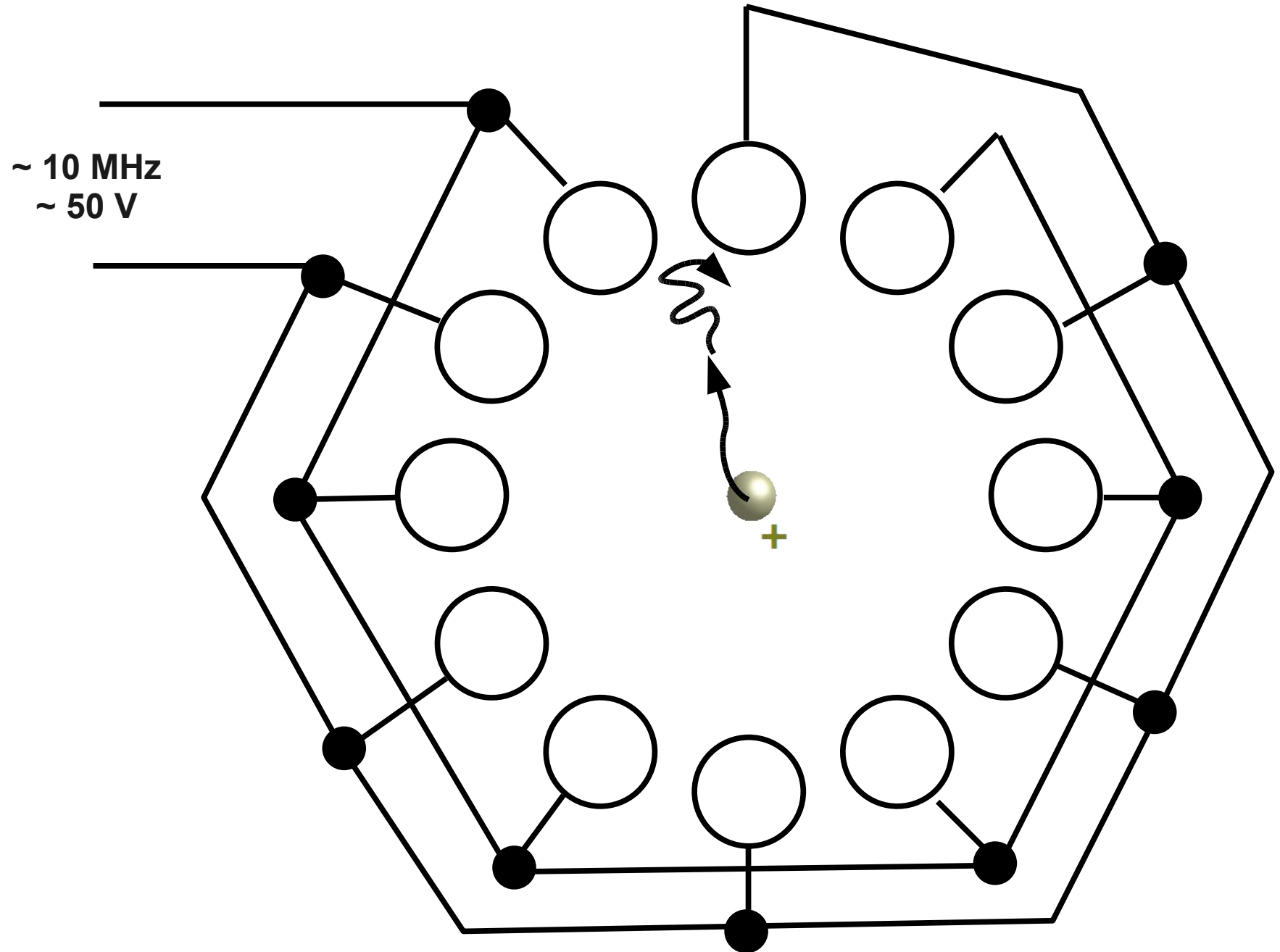
Zeit zum Durchqueren
der Falle für die Ionen:
einige μ s



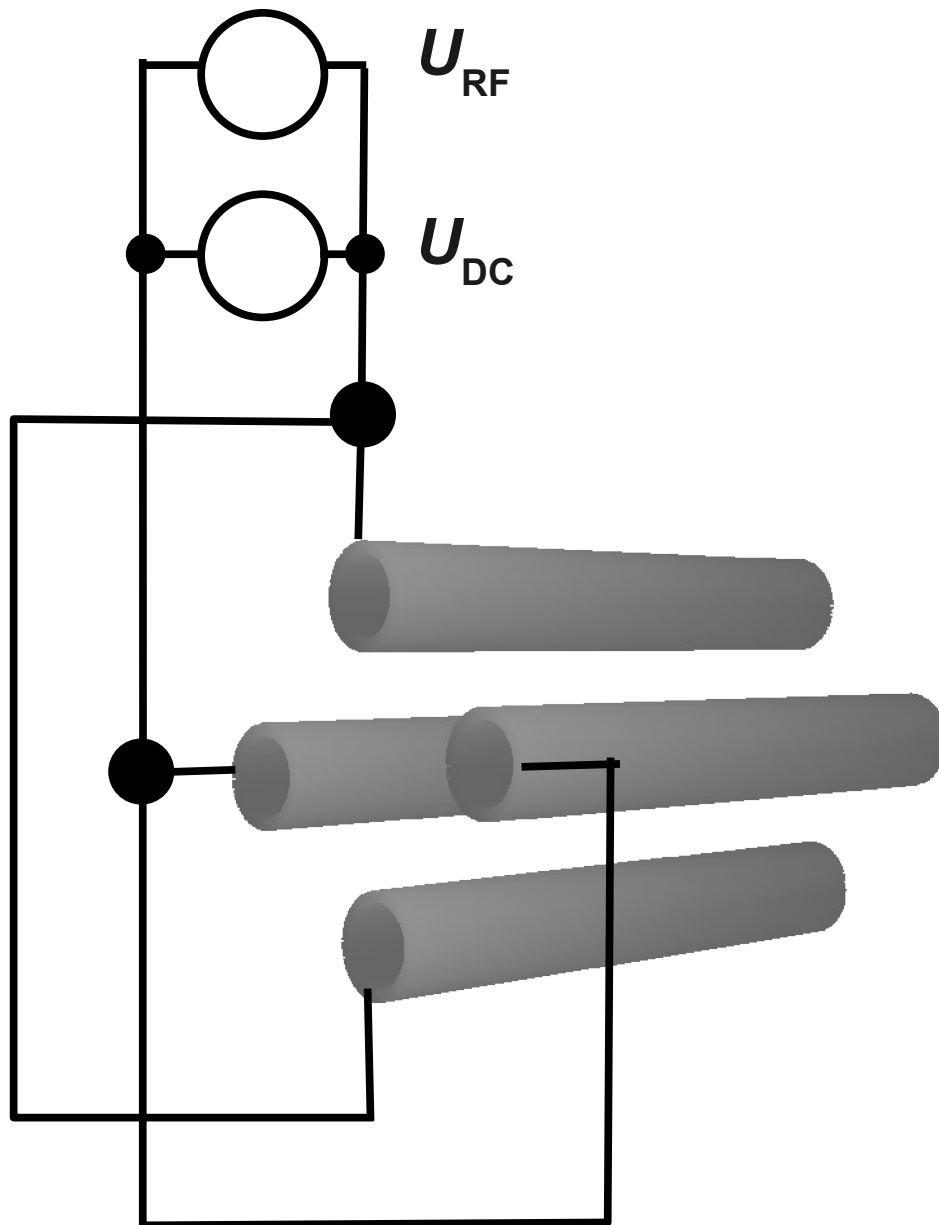
*Ponderomotive Kraft
im schwingenden
elektrischen Feld –
ein universelles Konzept
der modernen Physik*

*z.B. geladene Teilchen in
starken Laserfeldern*

Hochfrequenz-Ionenkäfig mit „reflektierenden“ Wänden



Quadrupol-Ionenkanal



Ionen mit wenigen eV Energie

Ionenführung entlang der Achse
(auch „um die Ecke“)

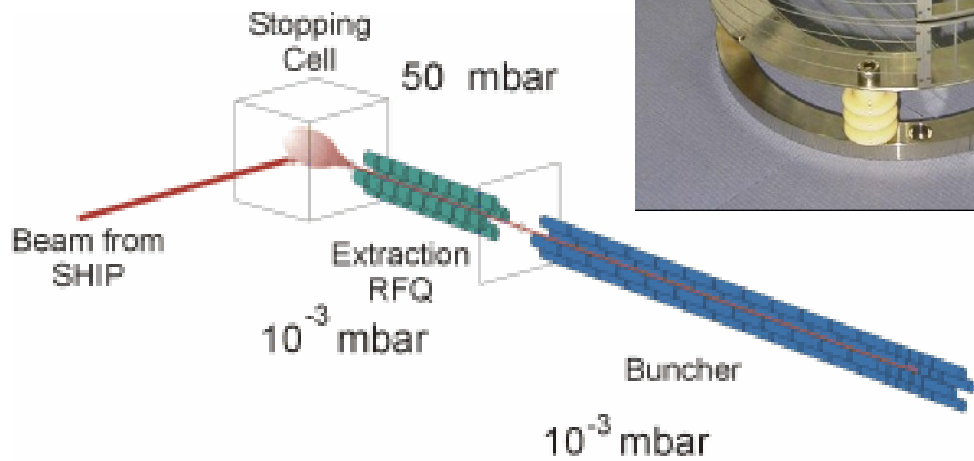
Abstimmbarer Massenfilter
(Spannungsänderung)

$\Delta M/M$ besser als 1000

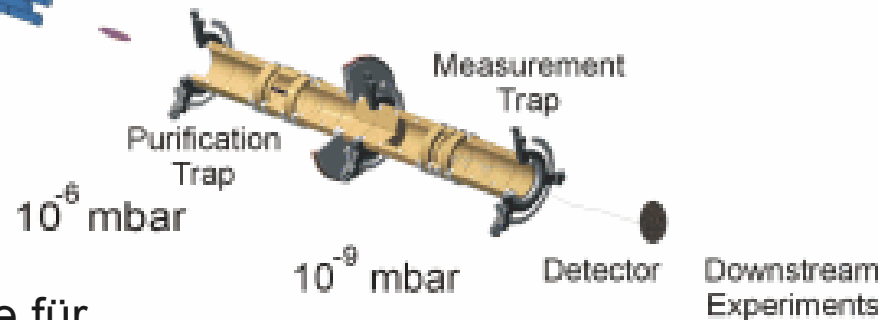
Hochempfindlicher
Nachweis von Spurenstoffen

Ein Ionentrichter

**Puffergaskühlung
und Einfangen
langsamer
radioaktiver Ionen**

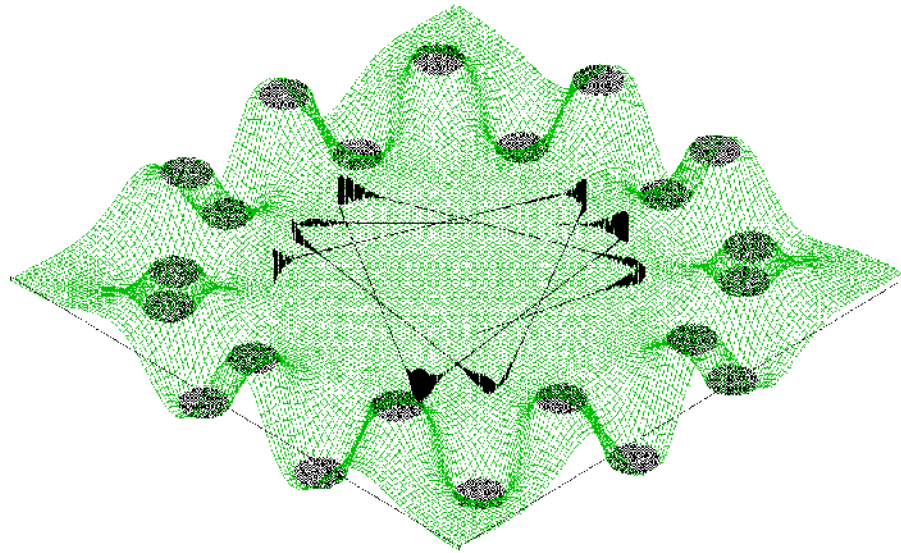


SHIPTRAP
GSI Darmstadt

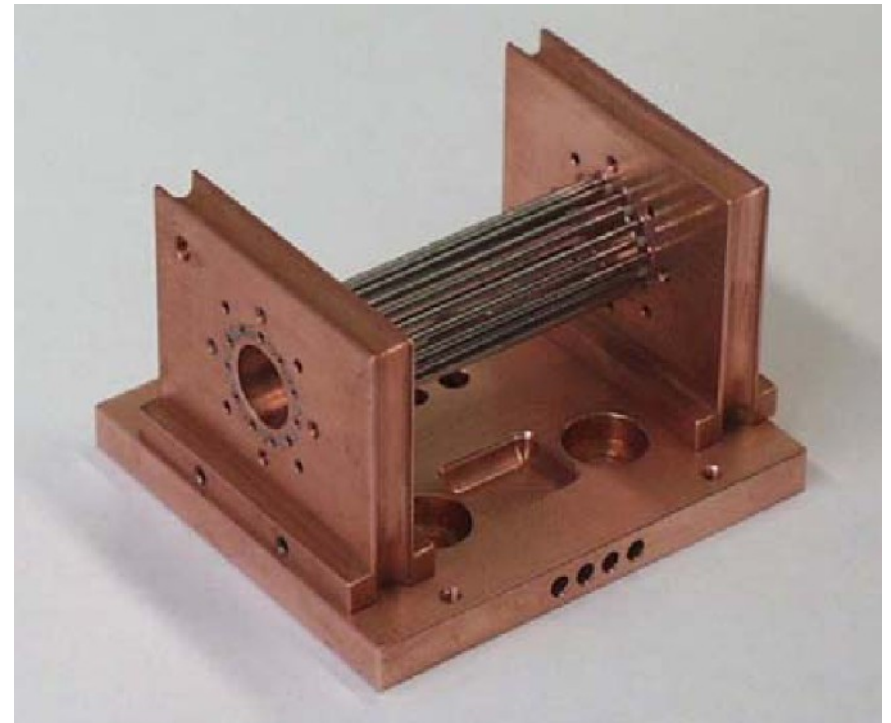


Penningfalle für
seltene Atomkerne am Rand der Stabilität

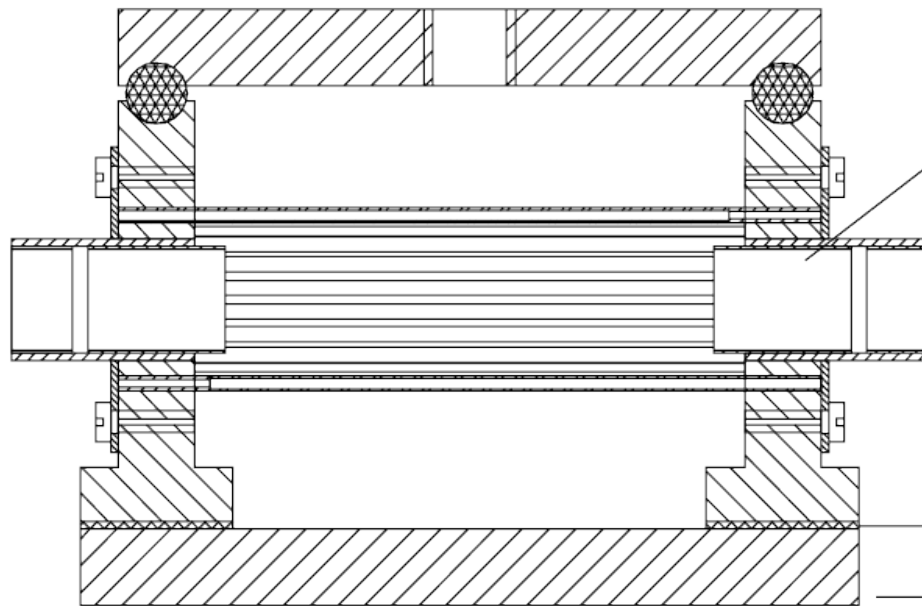
22pol-Falle zur Puffergaskühlung von Ionen bei 10 Kelvin



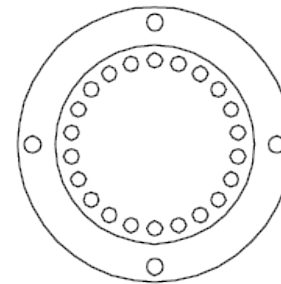
46 mm



end electrode

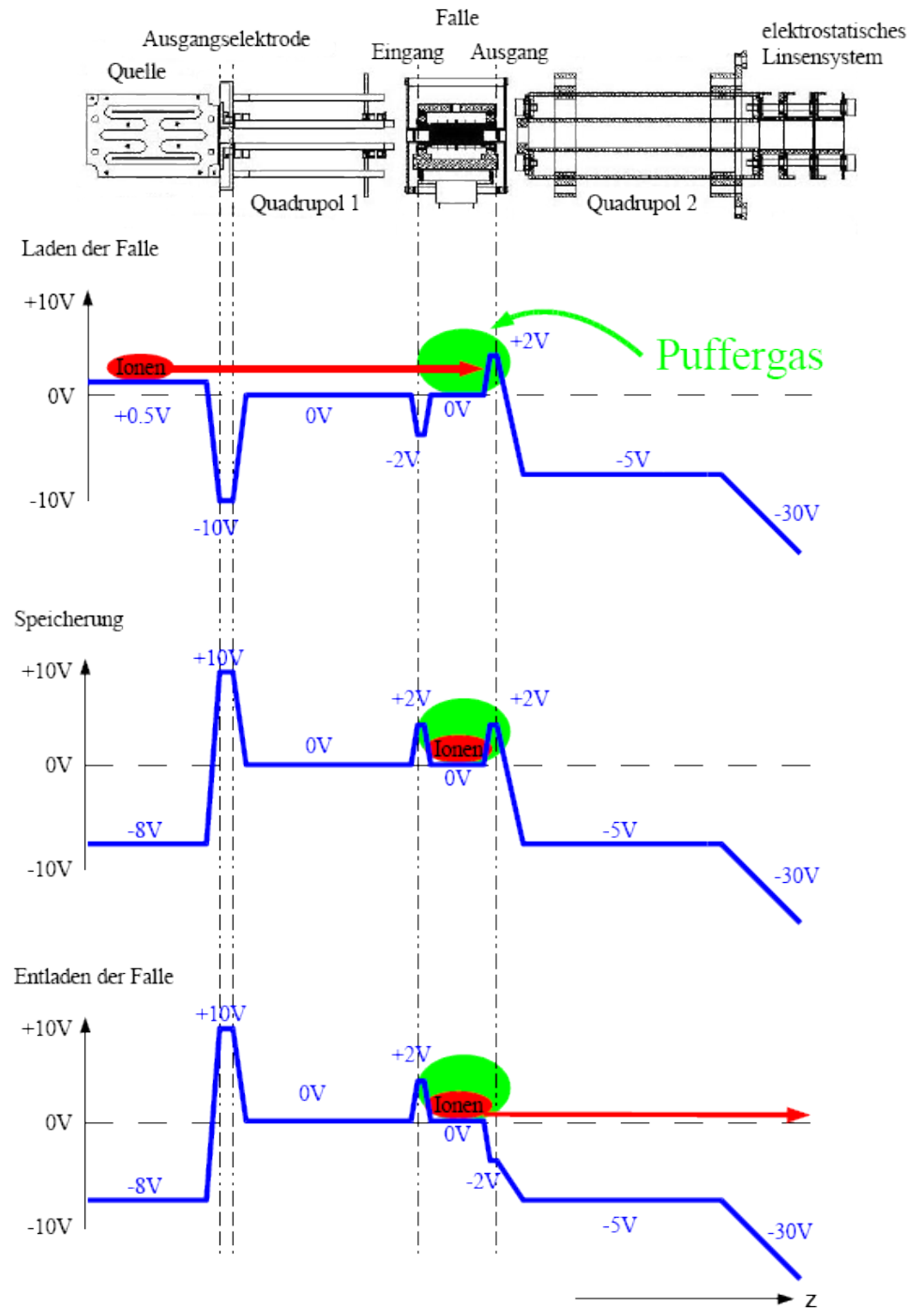
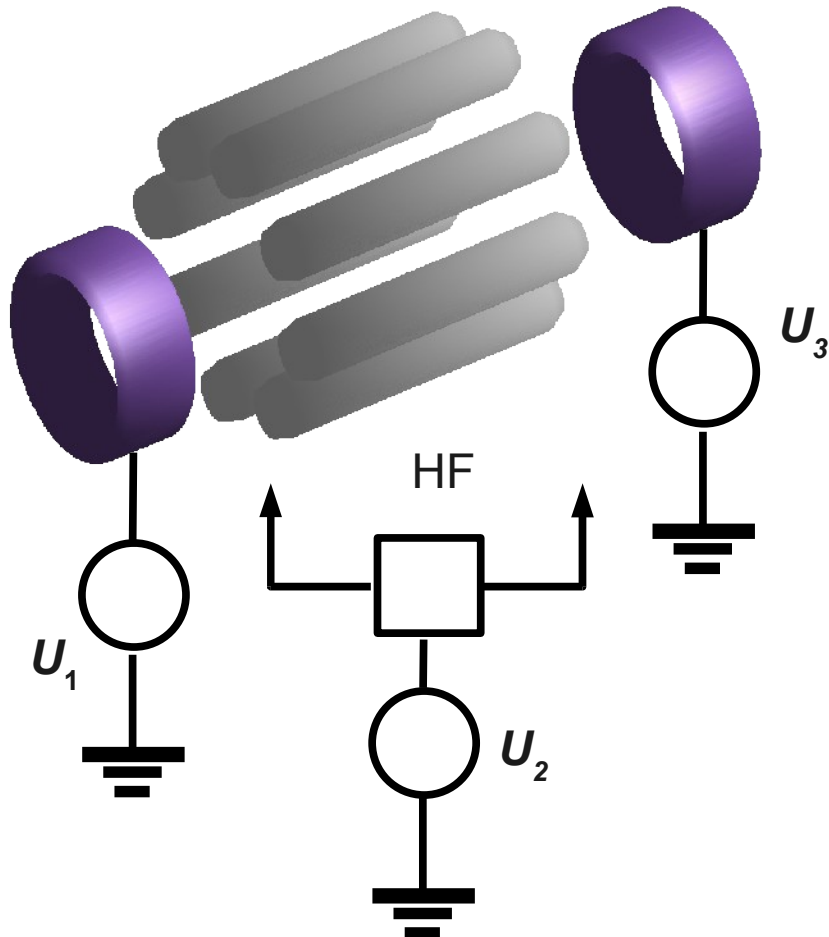


sapphire insulation
ground plate



**10 Kelvin
Kältemaschine**

Ionenkufig laden und entladen



„Kalte Chemie“

**Selbständig ablaufende chemische Reaktionen
mit aggressiven Reaktionspartnern:**

- **Reaktive neutrale Atome („Radikale“)**
- **Ionen**
- **Elektronen**

Starke Reaktivität im Quanten-Grundzustand ohne Aktivierungsenergie

Mechanismen beim „Angriff“ auf chemische Bindungen

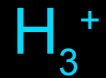
Auch bei geringsten Temperaturen und Dichten:

- **Hohe Schichten der Atmosphäre**
- **Astrophysikalische Molekülwolken / Vorstufe der Sternentstehung**

Molekülonen im interstellaren Raum

Ionen treiben die Reaktionsketten voran

- Mehr als 150 molekulare Verbindungen im interstellaren Raum
- Bis zu $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ und anderen organischen Molekülen
- Nachgewiesene Ionen:



...



ON2
Star forming region
("Chicken" Nebula)
Infrared

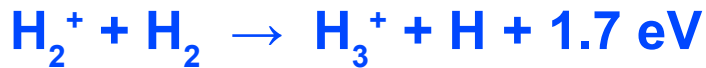
UKIRT
Mauna Kea
Chris Davis (JAC)

Kalte Chemie im Wasserstoff-Gas

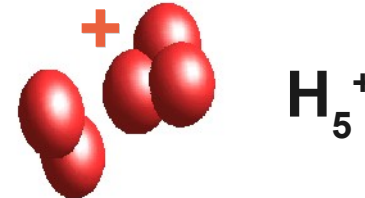
Durch Entfernen eines Elektrons entsteht H_2^+



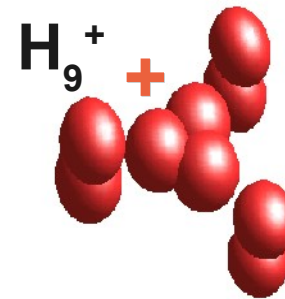
H_2^+ reagiert sehr schnell zum dreiatomigen Wasserstoff-Ion H_3^+



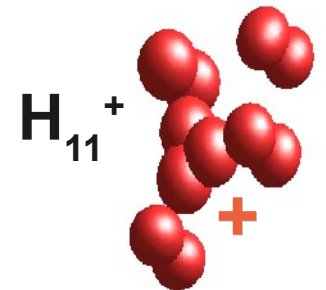
Neutraler Wasserstoff bildet mit H_3^+ Wasserstoff-Cluster („Klumpen“)



Die Wasserstoff-Cluster wachsen, bis die Bindung zu „zerbrechlich“ wird

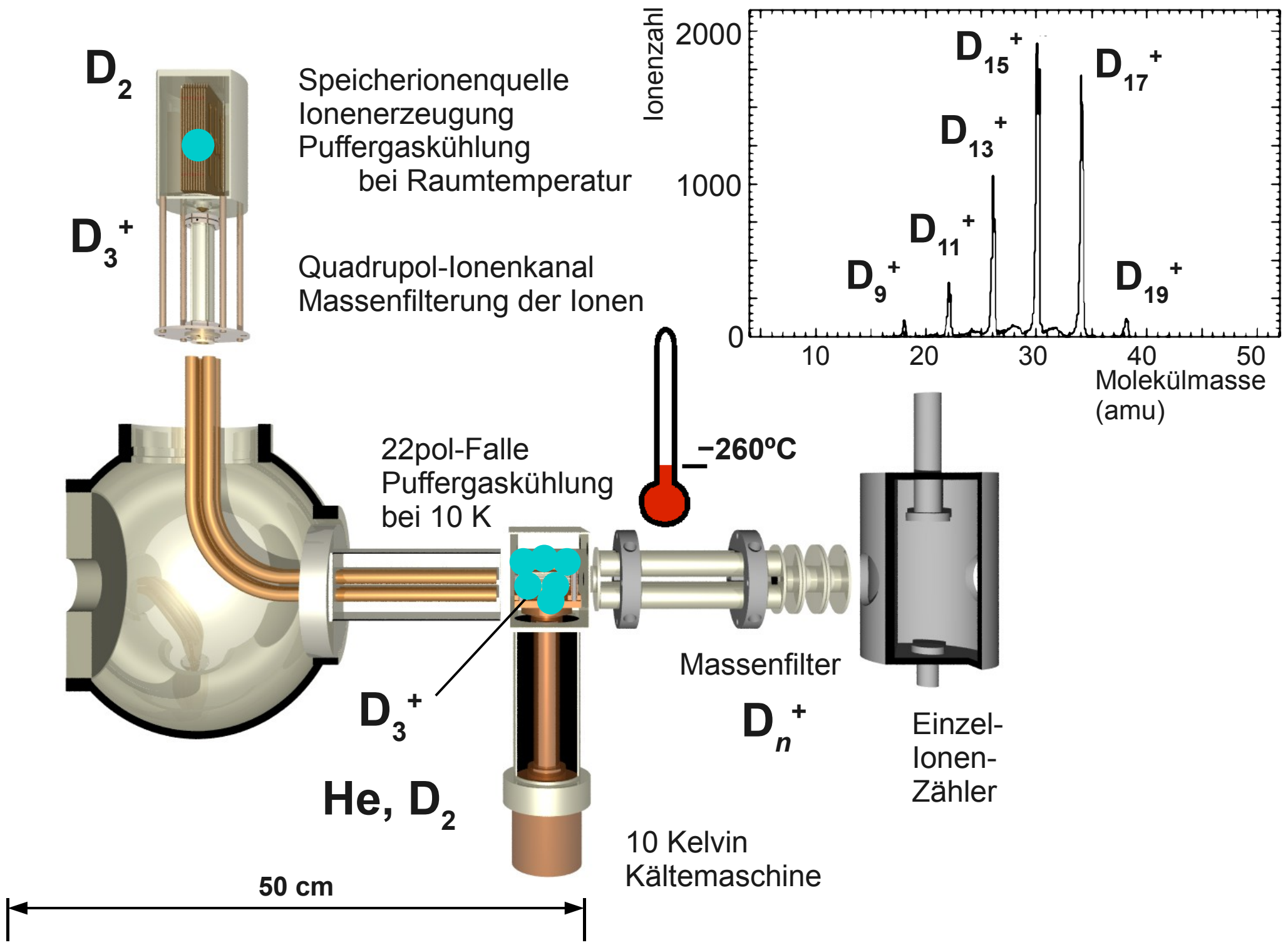


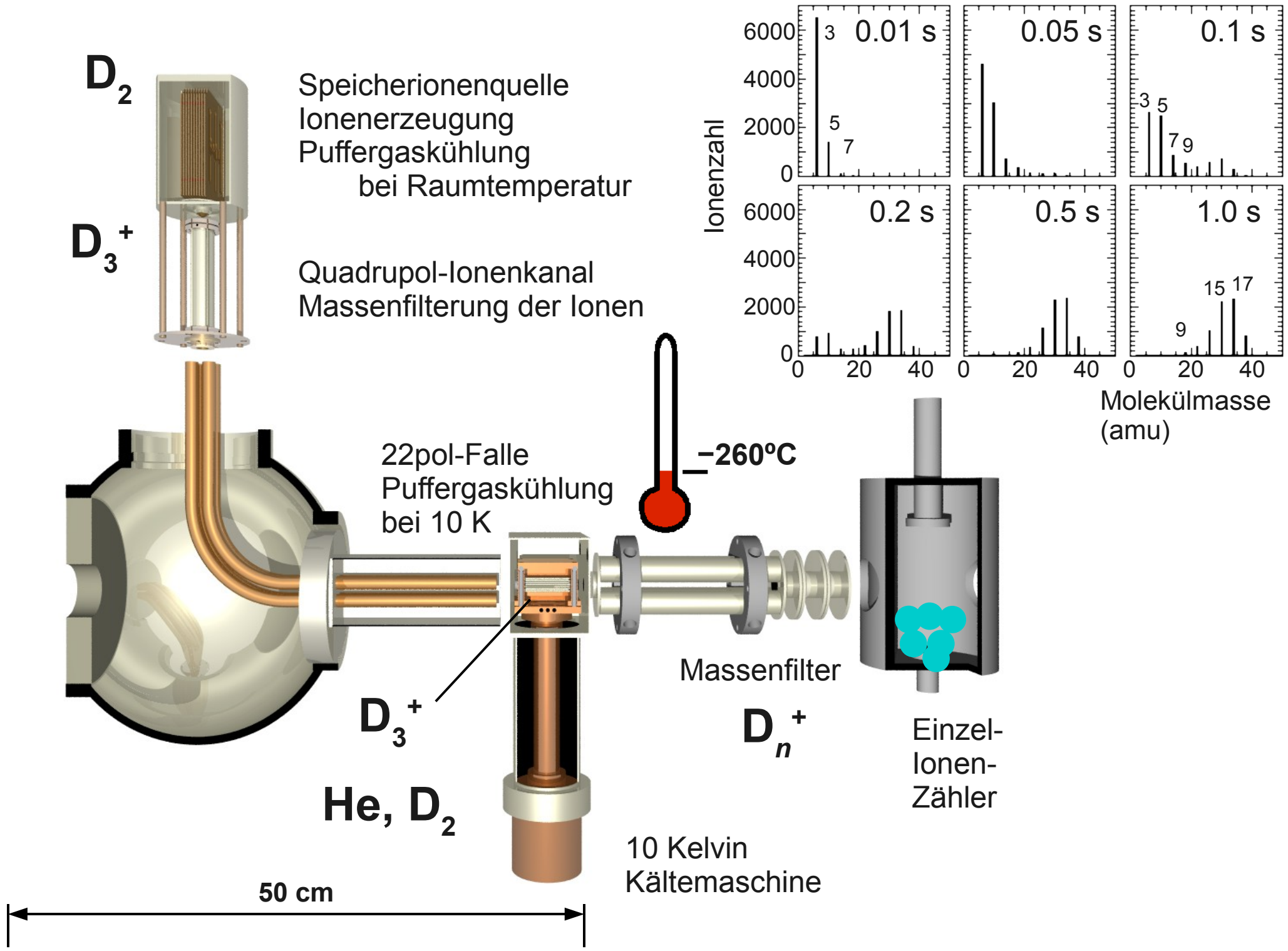
Hochsymmetrische Struktur von H_9^+



Weitere H_2 -Komponenten werden nur locker gebunden

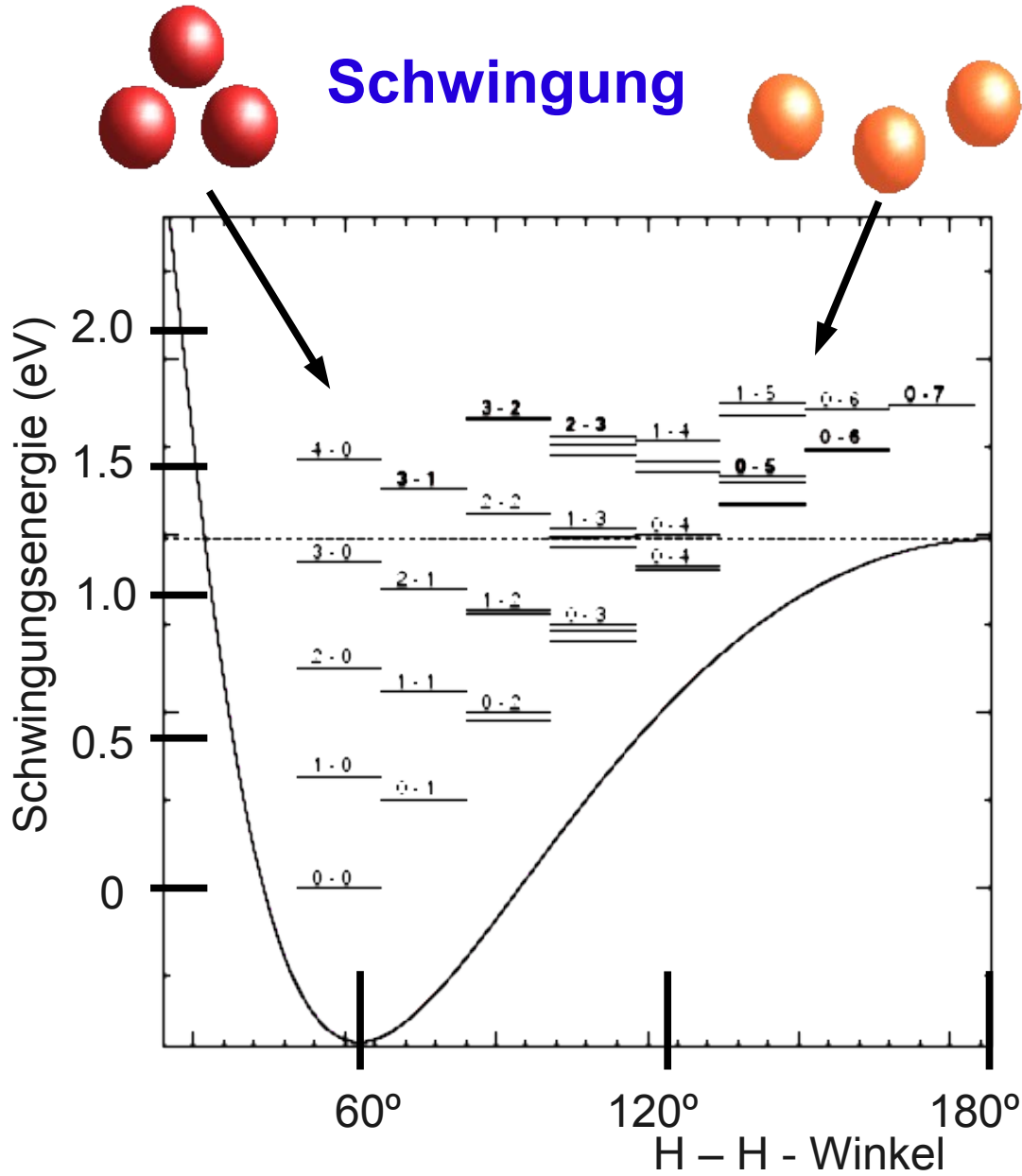
Thermische Energie bei Zimmertemperatur: 0.025 eV





Interne Molekülbewegung

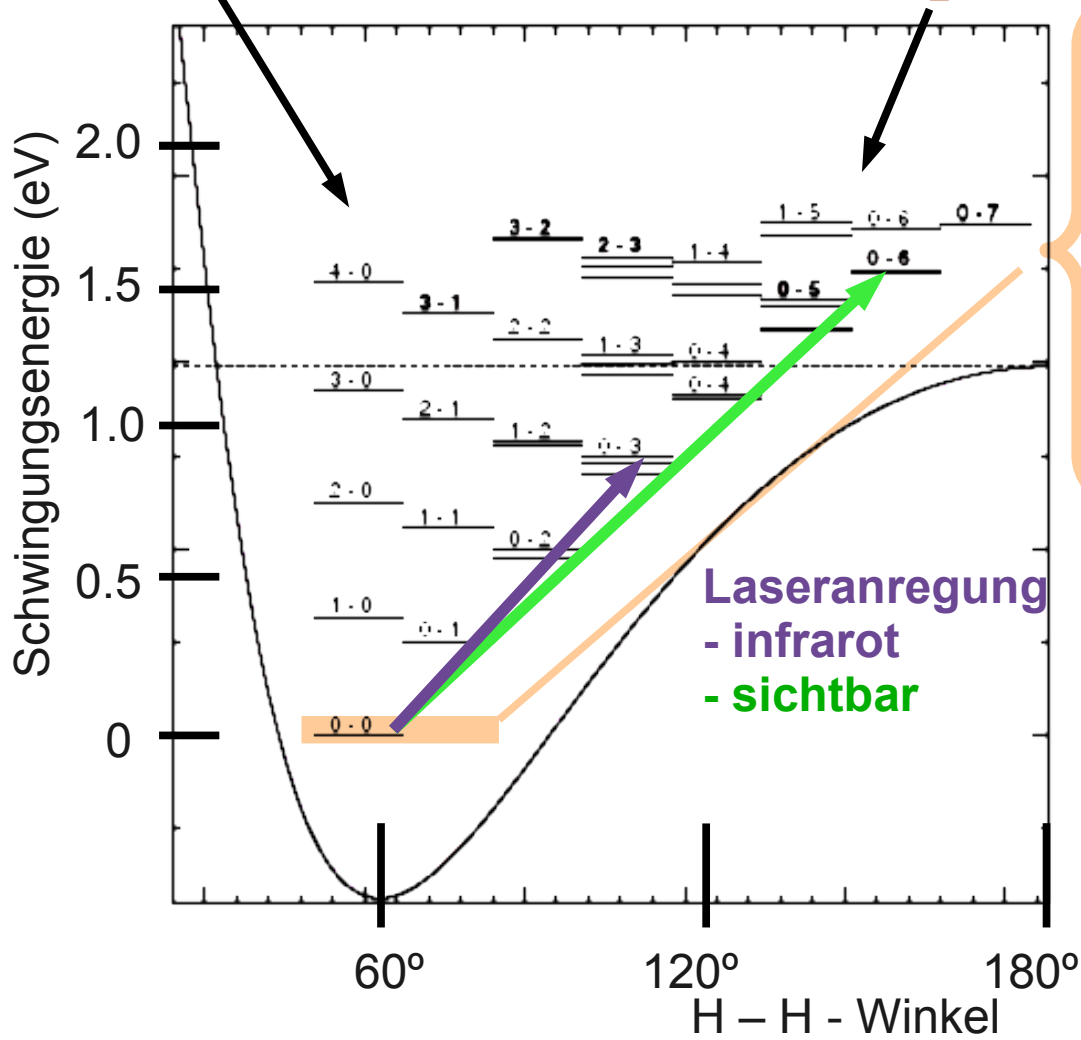
Schwingung



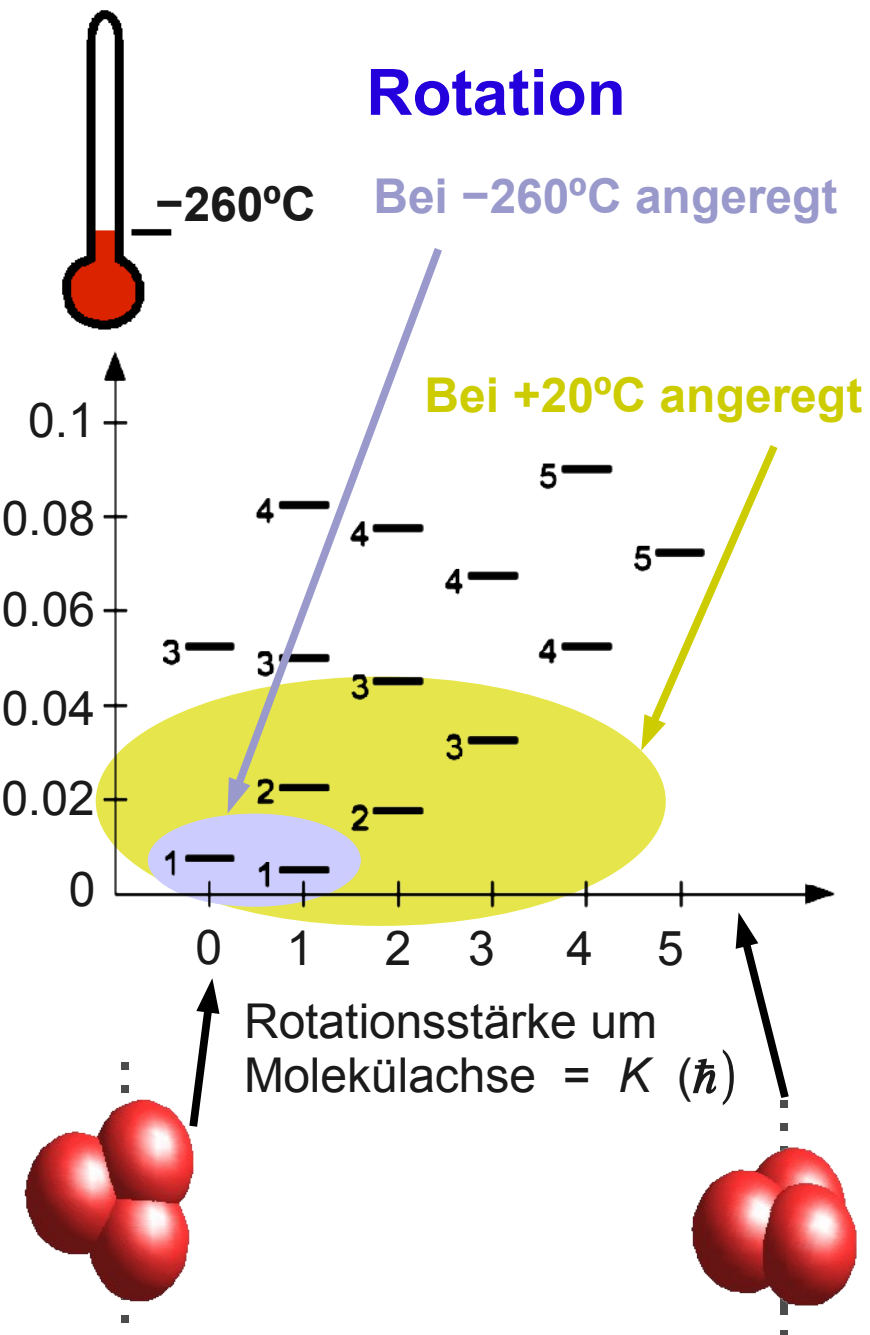
Thermische Energie bei Zimmertemperatur: 0.025 eV

Interne Molekülbewegung

Schwingung



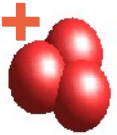
Rotation



Thermische Energie bei Zimmertemperatur: 0.025 eV

Laserinduzierte kalte Chemie

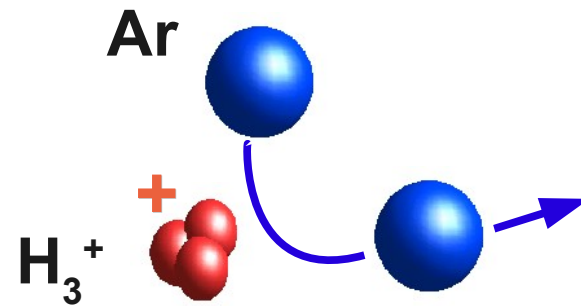
Resonanzfrequenzen bei der Laseranregung geben Aufschluss über die interne Bewegung der H_3^+ -Ionen



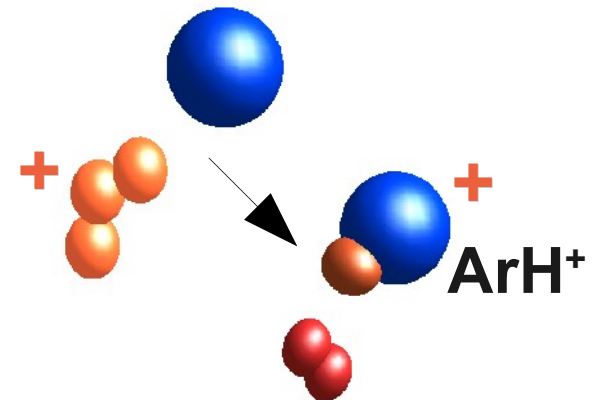
Jede resonante Anregung muss empfindlich nachgewiesen werden (Dichte 10^{12} mal geringer als etwa in Luft)

Hierzu dient die laserinduzierte Reaktion von H_3^+ mit dem Edelgas Argon

Kaltes H_3^+ reagiert nicht mit Ar-Atomen

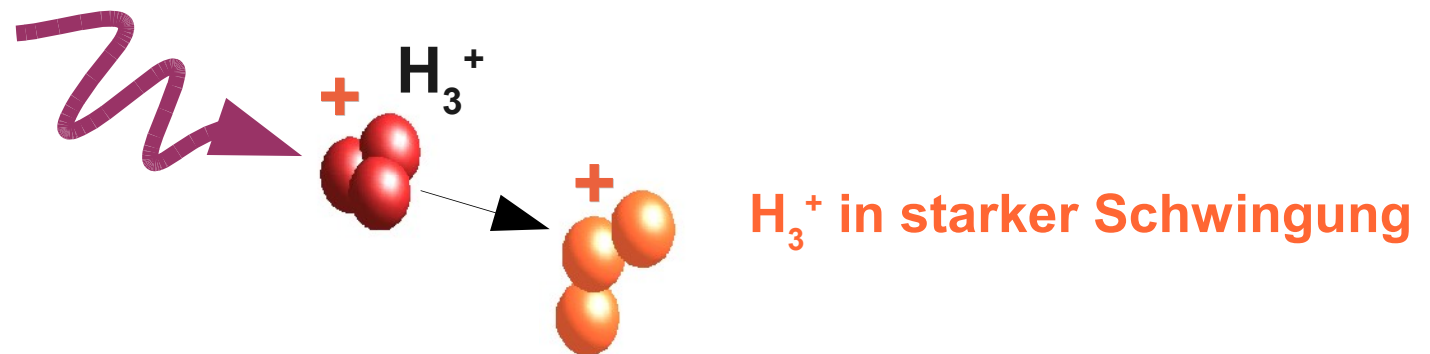


Mit stark schwingendem H_3^+ bildet sich ArH^+

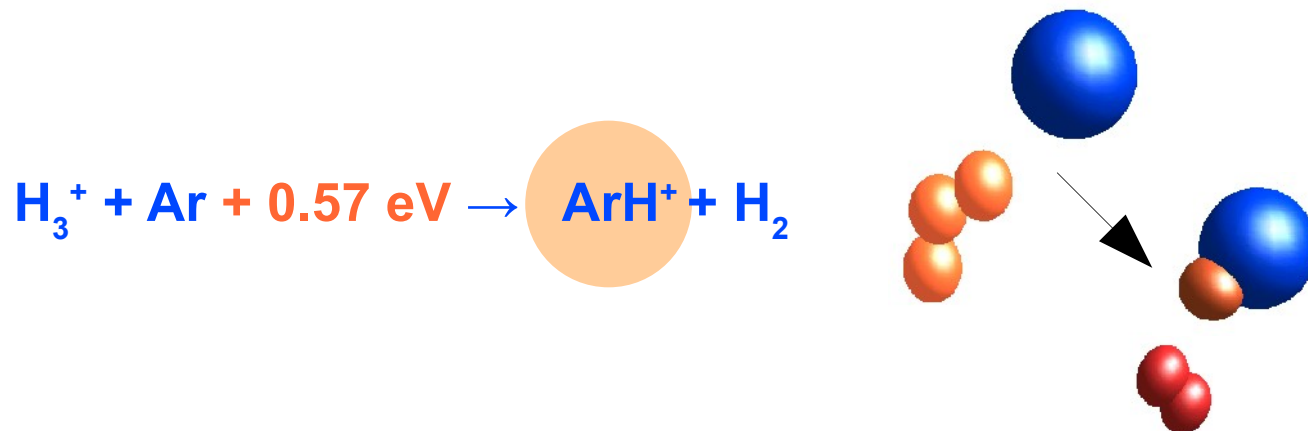


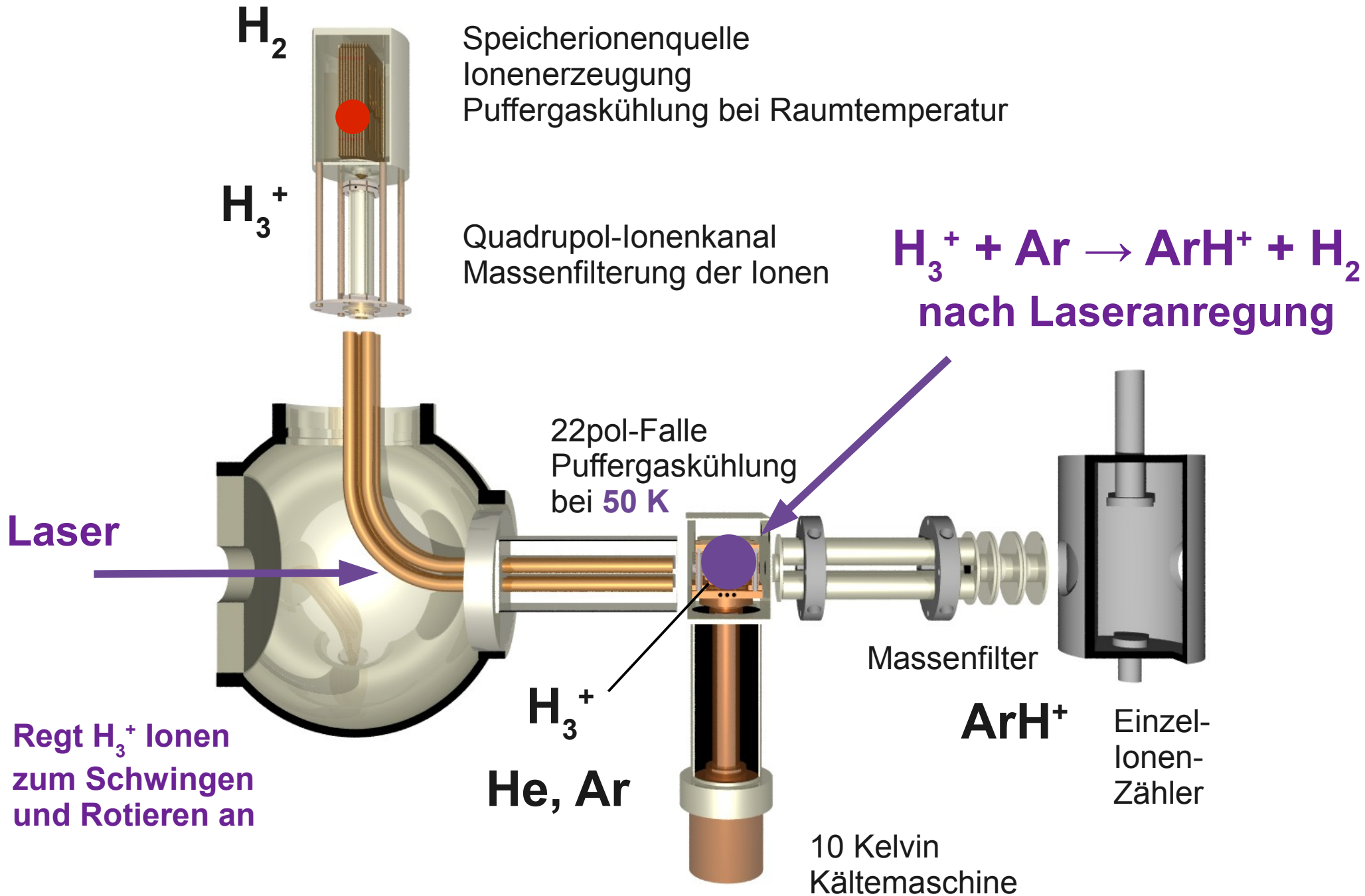
Laserinduzierte kalte Chemie

Beim Abstimmen der Laserwellenlänge wird eine Resonanz des H_3^+ getroffen



Das schwingungsangeregte H_3^+ -Ion reagiert zu ArH^+ ,
das durch Ionenzählen nachgewiesen wird



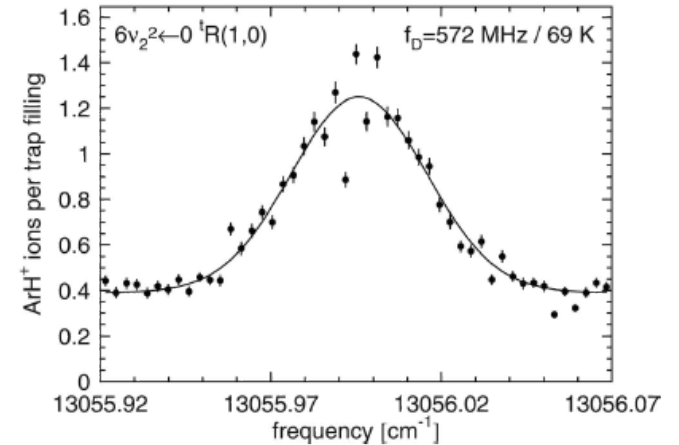
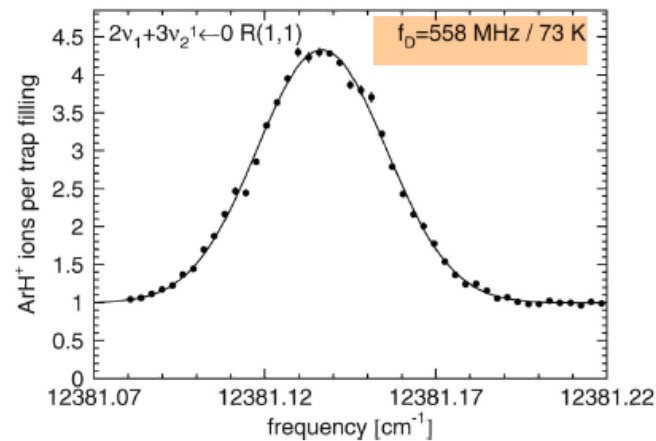
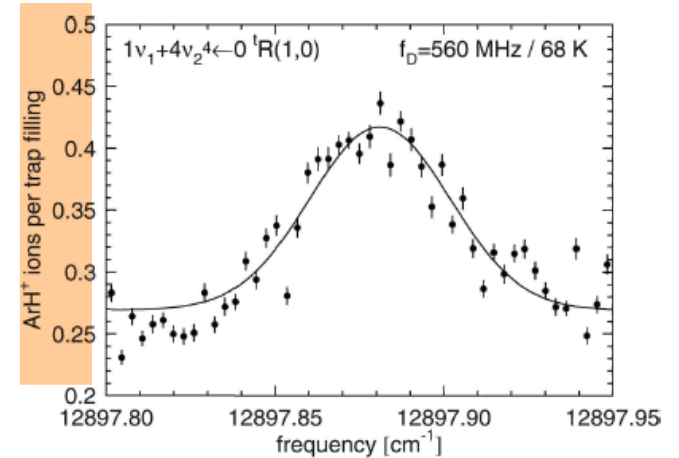
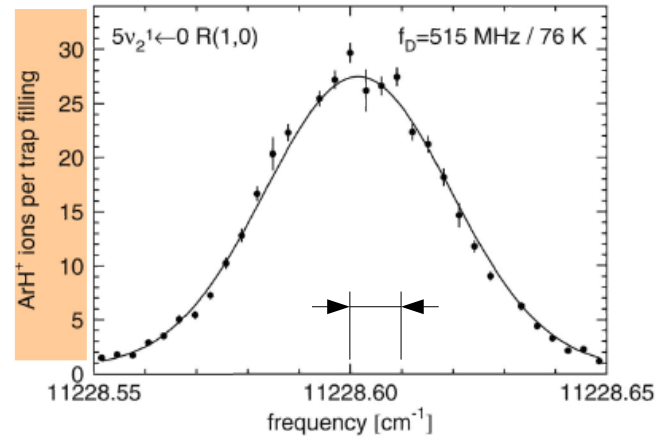


Laserspektroskopie der internen Molekülbewegungen

Resonanzfrequenzen für stark schwingendes und schwach rotierendes H_3^+

164312-7 Spectra of H_3^+ above the barrier to linearity

J. Chem. Phys. **129**, 164312 (2008)



„Schmetterlings“-Mode
der Molekülschwingung

FIG. 5. Four examples of spectra obtained by chemical probing spectroscopy. The translational temperature derived from the Doppler width f_D is given in the insets.

Durchstimmbare Laserdiode

Laserwellenlänge:

766 – 890 nm

Relative Linienbreite des Signals: $\sim 4 \times 10^{-6}$

Relative Linienbreite des Lasers: $< 10^{-8}$

Ionenkäfige und kalte Chemie

Hochfrequenz-Ionenkäfige bieten reflektierende, berührungsfreie Wände für Ionen (Energien bis ~10 eV)

**Hochfrequenz-Ionenkanäle (meist 4 Pole = Quadrupole) bieten Ionen-transport und schmalbandige Massenfilter („Quadrupol-Massenspektrometer“)
→ Hochempfindlicher Nachweis z.B. von Spurenstoffen**

Mit Ionenkäfigen bei tiefen Temperaturen lassen sich chemische Reaktionen unter Extrembedingungen untersuchen

Spektroskopie kalter Ionen liefert „Fingerabdrücke“ zu ihrem empfindlichen Nachweis und zur Messung ihrer internen Bewegungszustände

Arbeitsgruppe „HF-Falle und Laserspektroskopie“

Dr. A. Petrignani

M. Berg

D. Bing

H. Kreckel (jetzt Urbana, Illinois)

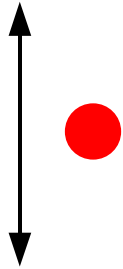
M. Motsch (jetzt MPQ Munchen)

Das ponderomotive Potential

Berührungsfreie Wände für geladene Teilchen – Hochfrequenz-Ionenkäfige

Ponderomotive Energie U_p

Geladenes Teilchen wird zum Mitschwingen gezwungen



$$U_p = \frac{e^2 E_0^2}{4 m \omega_0^2}$$

Beschleunigung

$$a(t) = \frac{eE_0}{m} \cos \omega t$$

bewirkt Schwingung

$$x(t) = \frac{eE_0}{m\omega^2} (1 - \cos \omega t) + x_0 = \frac{1}{2}$$

mit Geschwindigkeit

$$v(t) = \frac{eE_0}{m\omega} \sin \omega t$$

→ **Mittlere kinetische Energie des Teilchens:**

$$U_p = \overline{E_{\text{kin}}} = \frac{m}{2} \overline{v(t)^2} = \frac{e^2 E_0^2}{2 m \omega^2} \overline{\sin^2 \omega t}$$