

KAPITEL 12 :

Kernkraft

- 12.1 Globale Eigenschaften der Kerne**
- 12.2 Nukleon–Nukleon Potential**
- 12.3 Charakter der Kernkraft**

12.1 Globale Eigenschaften der Kerne

Bindungszustand und Stabilität durch Bindungsenergie bestimmt

Bindungsenergie = $-(\text{Masse des Systems} - \sum \text{Massen der Konstituenten})$

Ladungszahl : $Z = \text{Zahl der Protonen im Kern}$

Massenzahl : $A = Z + N$ $N \dots \text{Zahl der Neutronen}$

Bindungsenergie: über Masse der Atome definiert

$$B(Z, A) = [Z \cdot M(^1\text{H}) + (A - Z)M_n - M(A, Z)] \cdot c^2$$

1. Massenbestimmung durch Massenspektrometrie:

Methode: gleichzeitige Messung von p und E eines Ions der Ladung Q durch Ablenkung in elektrischen und magnetischen Feldern ($p \ll m$)

2. Massenbestimmung durch Kernreaktionen:

z.B.: Einfang von therm. Neutronen: $n + ^1\text{H} \longrightarrow ^2\text{H} + \gamma$

$$B = (M_n + M_{^1\text{H}} - M_{^2\text{H}})c^2 = E_\gamma + \underbrace{\frac{E_\gamma^2}{2M_{^2\text{H}}c^2}}_{\text{Rückstoss-Energie}}$$
$$= 2.225 \text{ MeV} \equiv E_\gamma$$

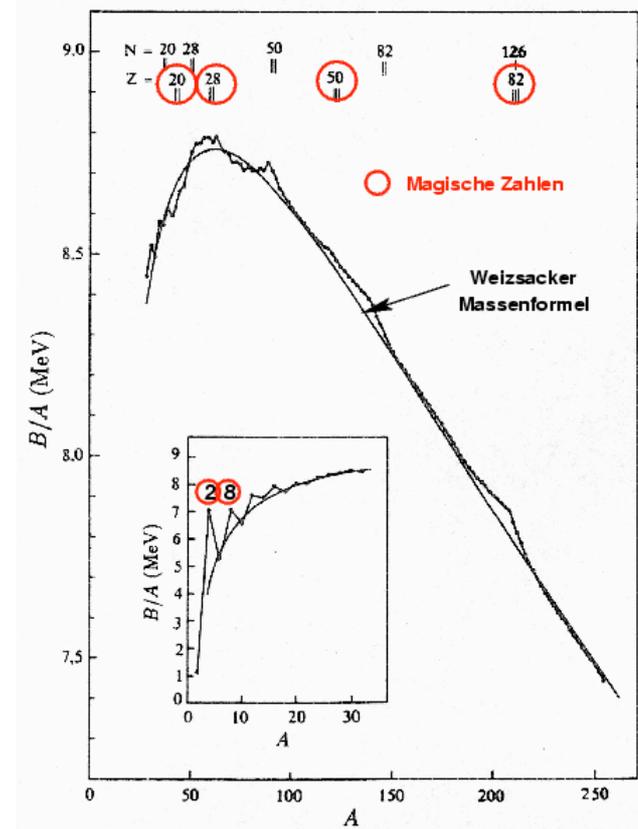
Atomare Masseneinheit:

$$1u = \frac{1}{12}M_{^{12}\text{C}} = 931,481 \text{ MeV}/c^2 = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Bindungsenergie pro Nukleon

Weizsäcker Massenformel (empirische Formel):

$$M(A, Z) = NM_n + ZM_p + ZM_e - a_v A + a_s A^{2/3} + a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_a \frac{(N-Z)^2}{4A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$



$N = A - Z$ (A .. Massenzahl, Z .. Zahl der Protonen, N ... Zahl der Neutronen)
Werte von a_v , a_s , a_c , a_a und δ vom Massenbereich abhängig,
in dem man Parameter optimiert

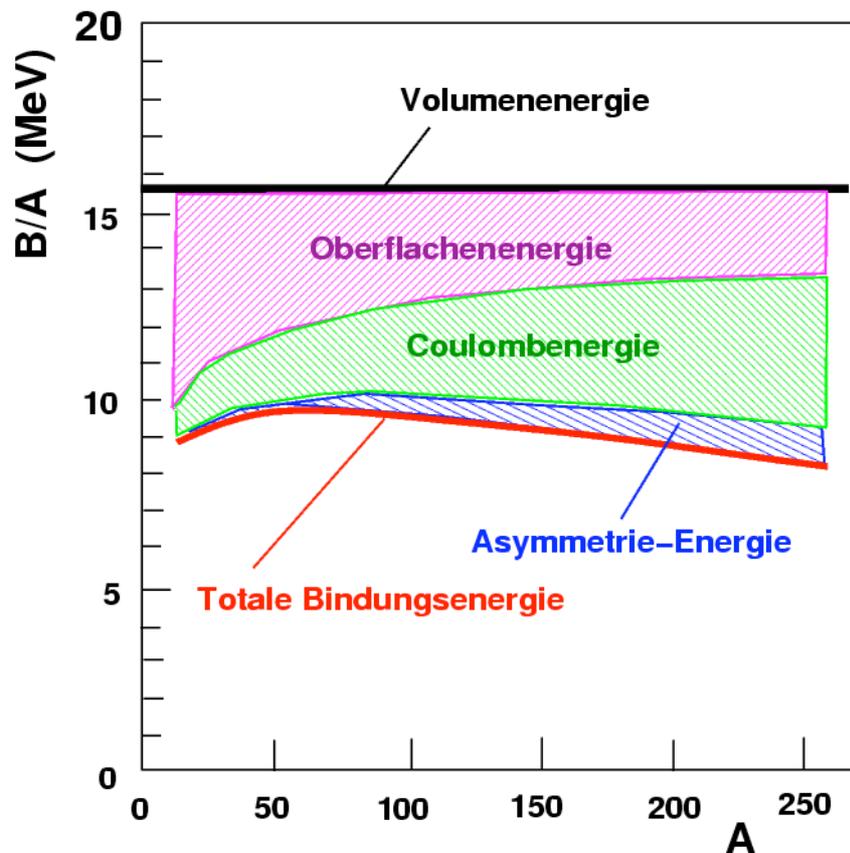
Parametrisierung der Bindungsenergie:
für die meisten Kerne: $B/N \sim 7 - 8$ MeV

Bindungsenergie pro Nukleon für Kerne mit gerader
Nukleonenzahl: besonders stabil (*magische Kerne*)

Bemerkungen:

- Hauptanteil zur Masse des Atoms: $M_n + M_p + M_e$
- Globale Eigenschaften der Kerne gut beschrieben
- Einzelheiten der Kernstruktur nicht berücksichtigt

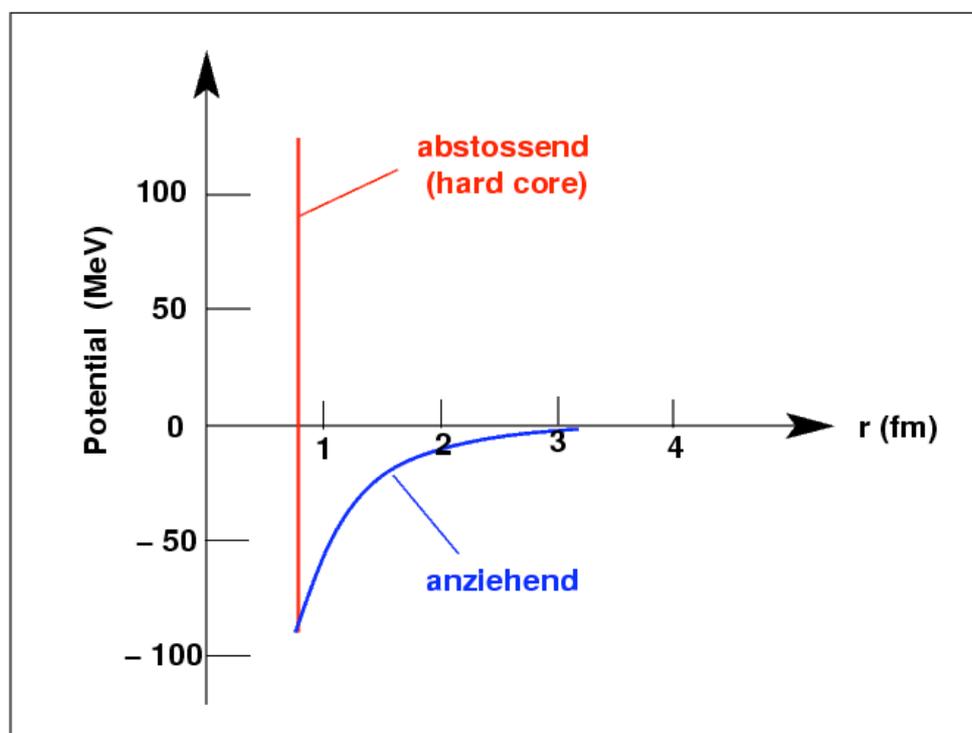
Weizsäcker Massenformel: einzelne Beiträge



- **Volumen-Term:** Proportional zur Zahl der Nukleonen
Reichweite der Kernkraft ist klein \rightarrow Sättigung
 $\rho_N \sim 0.17$ Nukleonen/fm³ = $3 \cdot 10^{17}$ kg/m³
mittlerer Abstand der Nukleonen im Kern ~ 1.8 fm
- **Oberflächen-Term:** proportional R^2 bzw. $A^{2/3}$
($R \sim A^{1/3}$)
- **Coulomb-Term:** proportional zu $\frac{Z^2}{A^{1/3}}$
- **Asymmetrie-Term:**
Bei kleinem A : Kerne mit $N = Z$ bevorzugt
Bei schweren Kernen: $N \neq Z \rightarrow$ teilweises
Kompensieren der Coulomb-Abstoßung
proportional zu $\frac{(N-Z)^2}{4A}$: Symmetrie nimmt mit wachsender
Kernmasse ab
- **Paarungs-Term:** proportional zu $\delta A^{-1/2}$
(nicht in Figur oben eingezeichnet)

12.2 Nukleon – Nukleon Potential

- Kernkraft ist für Aufbau der Kerne verantwortlich:
Kerne: *“freie” Nukleonen in einem Potentialtopf*
- Information über N – N Potential:
 - N – N Streuung
 - gebundener n – p Zustand: Deuteron
- N – N Streuung bei kleinen Energien: nichtrelat. QM
Nukleon: punktförmiges, strukturloses Objekt mit Spin und Isospin
- Schematische Darstellung der radialen Abhängigkeit des N – N Potentials für $l = 0$:



Bemerkung: Spin- und Isospin Abhängigkeit des N – N Potentials nicht dargestellt

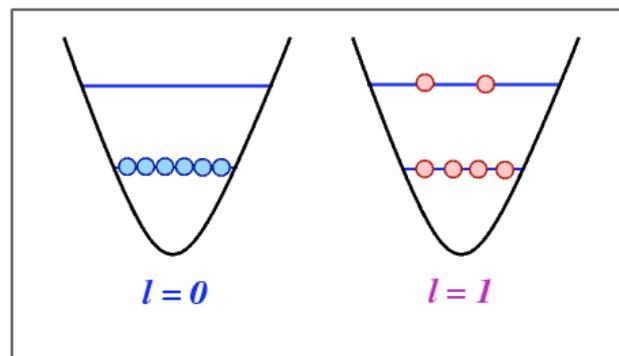
12.3 Charakter der Kernkraft

Konsistente Theorie der Kernkraft, die auf WW zwischen Quarks und Gluonen aufbaut, existiert bislang nicht (Vielkörperproblem) \implies qualitative Behandlung

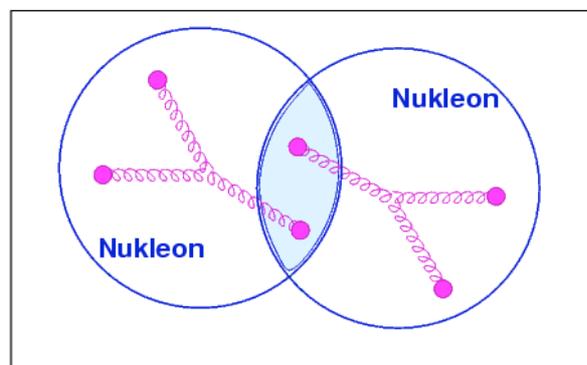
- Abstossung bei kleinen Abständen: durch Spin–Spin WW der Quarks

effektive Abstossung durch:
Zunahme der farbmagnetischen Energie
Zunahme der Anregungsenergie

Quarkzustand bei überlappenden Nukleonen:



- Anziehung: kovalente Bindung entspricht Austausch des "Einzelquarks"



u+d Quark sind zu Diquark gekoppelt

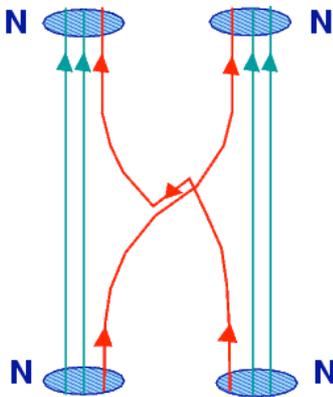
Wenn Nukleonen überlappen:
beide Nukleonen als Diquark – Quark System auffassen

Max. Anziehung der Kernkraft bei Abständen von 1 fm

Mesonaustausch

Im Nukleon existieren Seequarks ($q\bar{q}$ -Paare)

Effektiver Quark – Quark Austausch durch farbneutrale $q\bar{q}$ – Paare vermittelt:



Grösserer Beitrag als der direkte Quark – Quark Austausch

Dominiert bei allen Abständen



Yukawa: π postuliert (1935) (Nobelpreis 1949)

WW zwischen Nukleonen durch Austausch von Pionen (Mesonen) beschrieben

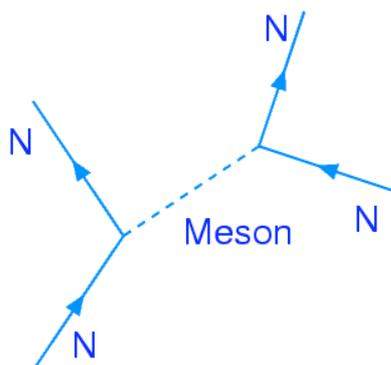
$$V = g \frac{e^{-\frac{mc}{\hbar} r}}{r}$$

Yukawa – Potential

m ... Mesonmasse

g ... Konstante, spielt Rolle einer Ladung

Bemerkung: Modellrechnungen vernachlässigen innere Struktur der N und Mesonen (\rightarrow punktförmige Nukleonen)



bei grossen Abständen:

$1-\pi$ -Austausch liefert gute Beschreibung der Daten

Zusammenfassung: Kernkraft

- Konzeptionell kann man Kernkraft auf fundamentale Konstituenten und deren WW zurückführen
—→ ist für theoretisches Verständnis befriedigend
- Quantitative Beschreibung durch QCD undurchführbar
 α_s sehr gross bei kleinen Impulsüberträgen
—→ perturbative QCD nicht anwendbar
- Verwende auch heute noch phänomenologische Mesonaustausch-Modelle zur quantitativen Beschreibung der Kernkraft