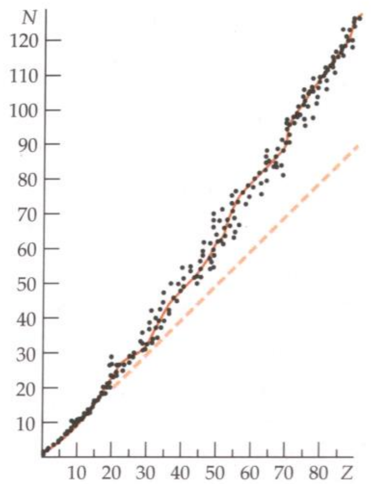
Eigenschaften der Kerne

Die Größe, die Form und die innere Struktur von Kernen lassen sich durch Streuexperimente mit hochenergetischen Teilchen untersuchen.
Verwendet man Elektronen als Streuteilchen, so erhält man Aufschluss über die Ladungsverteilung, d.h. die Verteilung der Protonen im Kern.
Niederenergetische also langsame Elektronen werden an der Elektronenhülle gestreut.
Benutzt man Neutronen, so lässt sich der Wirkungsbereich der starken Kernkraft bestimmen.
Eine große Anzahl verschiedener Streuexperimente führte zu dem Ergebnis, dass Kerne in guter Näherung sphärische Objekte in einem näherungsweise durch gegebenen Radius sind, wobei $R_0 \approx 1{,}5\,fm = 1{,}5 \cdot 10^{-15} m$ beträgt und ***A*** die Massenzahl ist.

$$R = R_0 \cdot A^{1/3}$$

Aus einem zu $A^{1/3}$ proportionalem Kernradius folgt zu ***A*** proportionales Volumen des Kerns. Da aber auch die Kernmasse etwa linear zu ***A*** ansteigt, ist die Nukleonendichte im Kern für alle Kerne etwa gleich.
In dieser Hinsicht besitzt der Atomkern ähnliche Eigenschaften wie ein Flüssigkeitströpfchen, dessen Massendichte ebenfalls unabhängig von seinem Radius ist. Auf dieser Analogie basiert das sog. **Tröpfchenmodell** des Kerns, das einige wichtige Kerneigenschaften zu erklären vermag.



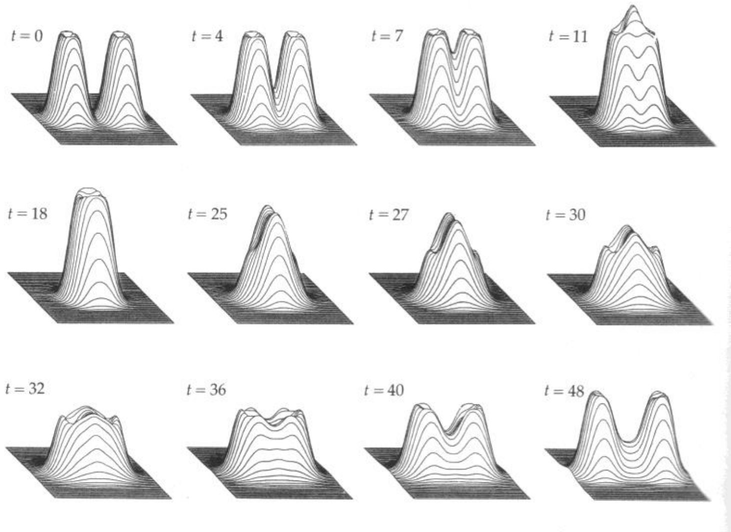
40.1 Auftragung der Neutronenzahl *N* gegen die Kernladungszahl *Z* für stabile Nuklide. Auf der gestrichelten Linie gilt *N* = *Z*.

Es lässt sich mittels der Relativitätstheorie zeigen, dass die Masse des Kerns nicht gleich der Summe der Massen seiner Bestandteile ist. Wenn zwei oder mehrere Nukleonen einen stabilen Kern bilden, nimmt die gesamte Ruhemasse ab, und Energie wird frei.
Umgekehrt muss Energie aufgewendet werden, um einen Kern in seine Bestandteile zu zerlegen.
Die Energiedifferenz zwischen der Ruheenergie eines Kerns und der seiner einzelnen Bestandteile ist die gesamte **Bindungsenergie** des Kerns.
Sie ist gleich der Massendifferenz multipliziert mit c^2, dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit.
Atom und Kernmassen werden oft in der atomaren Masseneinheit *u* angegeben, die als ein Zwölftel der Masse des neutralen ^{12}C-Atoms definiert ist.
Die einer atomaren Masseneinheit entsprechende Ruheenergie ist: $(1u)c^2 = 931{,}5 MeV$.

Wir betrachten im folgenden ein ${}^{4}_{2}He$-Kern, der aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Die Masse eines Helium-Atoms lässt sich mit einem Massenspektrometer sehr genau zu $4{,}002602u$ bestimmen, wobei ein gewisser Anteil der Masse der Hüllenelektronen zuzuschreiben ist.
Die Masse eines ${}^{1}_{1}H$ -Atoms beträgt $1{,}007825u$ und die des Neutrons $1{,}0088665u$. Die Summe der Massen zweier Neutronen und zweier ${}^{1}_{1}H$ -Atome ist gleich $4{,}0329980u$. Dieser Wert übertrifft die Masse des ${}^{4}_{2}He$-Atoms um $0{,}030377u$. Die Massen der beiden Hüllenelektronen ist auf Grund der Verwendung der Wasserstoffatome schon berücksichtigt.
Aus der Massendifferenz ergibt sich die Bindungsenergie des ${}^{4}_{2}He$-Kerns durch Multiplikation mit c^2:

$$(0{,}030377u)c^2 = (0{,}030377u)c^2 \frac{931{,}5MeV}{(1u)c^2} = 28{,}30MeV,$$

Computersimulation des Stoßes zwischen zwei Kohlenstoff-12-Kernen. Der einfallende Kohlenstoffkern hat eine kinetische Energie von 768 MeV, die gleichmäßig auf die zwölf Nukleonen verteilt ist. Die Grundfläche eines jeden Teilbildes entspricht einer Stoßquerschnittsfläche mit einer Kantenlänge von 18 fm. In senkrechter Richtung ist die Dichte der Kerne (Zahl der Nukleonen pro Volumen) wiedergegeben. Die Höhe der Berge bei $t = 0$ entspricht einer Dichte von $1{,}5 \cdot 10^{11}$ Nukleonen/fm^3. Die Zeiteinheit ist $3{,}3 \cdot 10^{-24}$ s. Die zusammenstoßenden Kohlenstoffkerne gehen für eine kurze Zeit eine Bindung ein, bevor sie sich wieder trennen. Ein Teil der kinetischen Energie des einfallenden Kerns wird beim Stoß in Anregungsenergie der Kerne umgesetzt. (Mit freundlicher Genehmigung von Ronald Y. Cusson)



wobei wir $(1u)c^2 = 931{,}5MeV$ benutzt haben. Die Bindungsenergie des ${}^{4}_{2}He$ beträgt also 28,3MeV.
Im allgemeinen lässt sich die Bindungsenergie E_B eines Kerns der atomaren Atommasse M_A, der Z Protonen und N Neutronen enthält, nach der Formel

$$E_B = (Zm_H + Nm_n - M_A)c^2$$

berechnen.
Nachfolgend sind die Atommassen einiger ausgewählter Isotope aufgelistet.

Tabelle 40.1 Atommassen von einigen ausgewählten Isotopen

Element	Symbol	Ordnungszahl Z	Atomare Masse / u
Neutron	n	0	1,008665
Wasserstoff	^{1}H	1	1,007825
Deuterium	^{2}H oder D	1	2,014102
Tritium	^{3}H oder T	1	3,016050
Helium	^{3}He	2	3,016030
	^{4}He	2	4,002603
Lithium	^{6}Li	3	6,015125
Bor	^{10}B	5	10,012939
Kohlenstoff	^{12}C	6	12,000000
	^{14}C	6	14,003242
Sauerstoff	^{16}O	8	15,994915
Natrium	^{23}Na	11	22,989771
Kalium	^{39}Ka	19	38,963710
Eisen	^{56}Fe	26	55,939395
Kupfer	^{63}Cu	29	62,929592
Silber	^{107}Ag	47	106,905094
Gold	^{197}Au	79	196,966541
Blei	^{208}Pb	82	207,976650
Polonium	^{212}Po	84	211,989629
Radon	^{222}Rn	86	222,017531
Radium	^{226}Ra	88	226,025360
Uran	^{238}U	92	238,048608
Plutonium	^{242}Pu	94	242,058725

In der nachfolgenden Abbildung ist die Bindungsenergie pro Nukleon gegen die Massenzahl aufgetragen. Der Mittelwert von $\frac{E_B}{A}$ liegt bei *8,03MeV*.

Der relativ flache Verlauf der Kurve im Bereich *A>50* bedeutet, dass die Bindungsenergie ungefähr proportional zur Anzahl der Nukleonen im Kern ist.

Der allmähliche Abfall von $\frac{E_B}{A}$ für große Massenzahlen rührt von der Coulomb-Abstoßung der Protonen her, die mit Z^2 anwächst und die Bindungsenergie mindert. Für *A>260* wird die Coulomb-Abstoßung so groß, dass die Kerne instabil werden und spontan zerplatzen.

40.3 Die Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl A. Im Bereich $A > 50$ verläuft die Kurve relativ flach, die Bindungsenergie ist also etwa proportional zur Massenzahl.