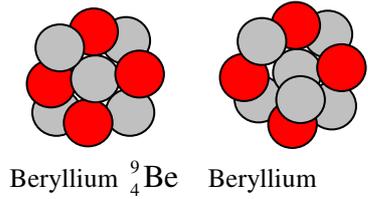


**A) Atomkern und Elementarteilchen.**

1) Aufbau der Atomkerne, Isotope

Heute weiß man, dass Atomkerne aus einer Anzahl  $Z$  einfach positiv geladener Protonen  $p$  ● und einer Anzahl  $N$  elektrisch neutralen Neutronen  $n$  ○ bestehen. Die Gesamtanzahl der Kernbausteine bzw. Nukleonen nennt man Massezahl  $A$ . Also gilt  $A = N + Z$ . Die Anzahlen  $Z$  der Protonen und  $N$  der Neutronen stimmen bei stabilen Atomkern in etwa überein. Meist ist  $N$  etwas größer als  $Z$ .



Um elektrische Neutralität zu erreichen zieht ein (nackter) Atomkern mit der Kernladungszahl  $Z$  ebenso viele Elektronen zu sich. Dadurch entsteht das neutrale Atom. Atomkerne mit gleicher Kernladungszahl  $Z$  aber unterschiedlicher Neutronenzahl  $N$  heißen isotop zu einander, weil sie gleiche Elektronenhüllen haben und somit chemisch „am gleichen Ort stehen“ (gr.: *iso* = gleich, *topos* = Ort). Isotope sind also chemisch gleich, sie lassen sich nur über ihre unterschiedlichen Massen trennen. Siehe z.B. Ultrazentrifuge zur Anreicherung von  $^{235}_{92}\text{U}$  gegenüber  $^{238}_{92}\text{U}$ .

Der Namensgeber der Atome ist also die Kernladungszahl  $Z$ . Die Bezeichnungen H, He, Li, ... sind insofern nur historisch.

Name	H	He	Li	Be	B	C	N	O	F
Z-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Kennzeichnung eines Atomkerns.

An das chemische Zeichen des Stoffes werden die Kernladungszahl  $Z$  und die Massezahl  $A = Z + N$  links als Indizes angesetzt:  $^A_Z\text{X} = ^{Z+N}_Z\text{X}$ . Befindet sich der Kern in einem angeregten Energiezustand, so wird rechts oben noch ein \* angebracht:  $^A_Z\text{X}^*$ .

Beispiel: Ein Kohlenstoffisotop besitzt einen Atomkern mit  $Z = 6$  Protonen. Deshalb besitzt das neutrale Kohlenstoffatom auch 6 Elektronen, im Gr.Zust. mit der Konfiguration  $1s^2 2s^2 2p^2$ .

Die Neutronenzahl  $N$  variiert beim Kohlenstoff von  $N = 3$  bis  $N = 10$ .

$N =$	3	4	5	6	7	8	9	10
$A =$	9	10	11	12	13	14	15	16
Bezeichnung	$^9_6\text{C}$	$^{10}_6\text{C}$	$^{11}_6\text{C}$	$^{12}_6\text{C}$	$^{13}_6\text{C}$	$^{14}_6\text{C}$	$^{15}_6\text{C}$	$^{16}_6\text{C}$

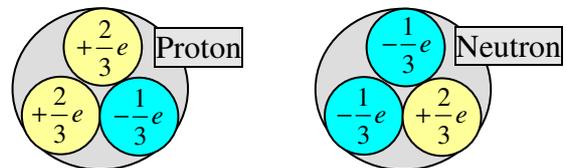
Aber nur  $^{12}_6\text{C}$  und  $^{13}_6\text{C}$  sind stabil. Alle übrigen Isotope des Kohlenstoffs sind instabil und zerfallen. Dabei strahlen sie etwas ab. Sie sind also radioaktiv = „strahlungsaktiv“.

2) Nukleonen, Quarks, Elektronen, Leptonen, Antiteilchen.

Die Nukleonen, also das Proton und das Neutron, sind schwer im Vergleich zum Elektron. Deshalb heißen die Nukleonen, Baryonen (gr.: *barys* = schwer), während die Elektronen zur Familie der Leptonen (gr.: *leptos* = leicht) gehören. Die Elektronen sind elementar, die Nukleonen sind es nicht, sie sind jeweils zusammengesetzt aus drei elementaren Teilchen, den Quarks.

**Proton:**  $p = \underline{uud} : 2 \cdot (+2/3e) + (-1/3e) = +e$

**Neutron**  $n = \underline{udd} : (+2/3e) + 2 \cdot (-1/3e) = 0$

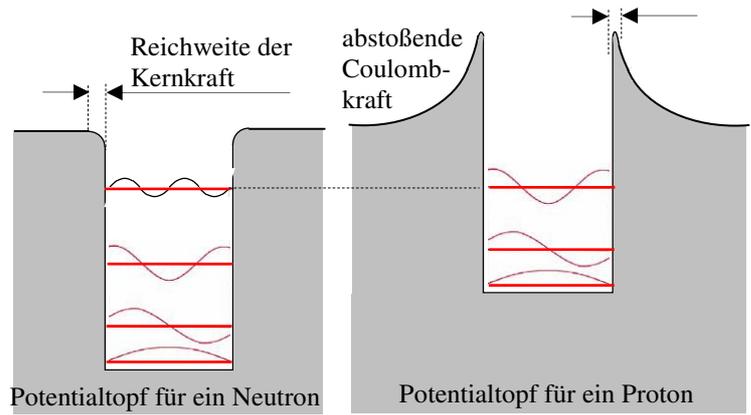


Das ergaben Streuversuche von extrem schnellen Elektronen an Atomkernen. Das Quark existiert in zwei stabilen Versionen: „Up“ mit der Ladung  $+2/3 \cdot e$  und „Down“ mit der Ladung  $-1/3 \cdot e$ . Wird die Ladung  $-e$  bzw.  $+e$  zugeführt, klappt Up in Down um, bzw. umgekehrt.

Zur Familie der Leptonen gehört noch das Neutrino  $\nu$  als „ungeladenes Elektron“. So wie ein Quark von Up in Down umklappen kann, so kann auch ein Neutrino in ein Elektron umklappen, bzw. umgekehrt. Z.B. klappen beim  $\beta$ -Zerfall (s.u.) beide Teilchen gleichzeitig um. Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen, welches als ein in der Zeit rückwärts laufendes Teilchen angesehen werden kann. Entsprechend entstehen bei der gegenseitigen Zerstrahlung „zeitlose“  $\gamma$ -Quanten. Z.B. wird in der Positron-Emissions-Tomographie(PET) (s.u.) radioaktives  $^{18}\text{F}$  verabreicht, welches jeweils ein Positronen =  $\bar{e}$  emittiert. Dieses zerstrahlt mit einem Elektronen des Gewebes gemäß  $e + \bar{e} \rightarrow 2\gamma$  zu zwei gegenläufige  $\gamma$ -Teilchen, die an gegenüberliegenden Orten detektiert werden.

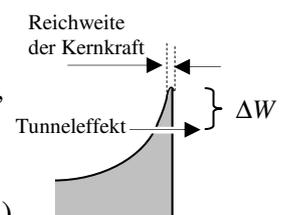
### 3) Entstehung des Atomkerns, Potentialtopf.

Die Bildung der Atomkerne wäre nicht möglich, wenn die Nukleonen, also die Protonen und Neutronen, sich nicht auf irgendeine Weise extrem kräftig anziehen würden. Während die Elektrizität, wie auch die Gravitation, *langreichweitig* ist und selbst in größter Entfernung befindliche Ladungen, bzw. Massen angezogen werden, ist die Anziehungskraft der Nukleonen von extrem kurzer Reichweite. Die entsprechende Kraft heißt *Kernkraft*.



Dass die Kernkraft so *kurzreichweitig* ist liegt daran, dass sie nur ein Abkömmling der *starken Wechselwirkung* ist, welche je drei Quarks zu einem Nukleon verbindet. Die Situation der Nukleonen beschreibt man am einfachsten durch ein *Topfpotentialmodell*. Die neg. 1. Ableitung  $-f'(x)$  des Potentialverlaufs ergibt die Kraft auf das Teilchen. Für Neutronen ist die Kurve *nur* am Rand des Topfes geneigt, nur dort werden sie stark angezogen. Selbst in geringem Abstand vom Kern, wie auch im Kerninneren bewegen sich Neutronen kräftefrei, dort heben sich alle Kräfte auf. Als Quantenobjekte entspringen auch die Nukleonen einem zugehörigen Materiefeld. Wie auf der Geigensaite hat man auch hier konstruktive Interferenz, wenn ganzzahlig viele Halbwellen auf die Strecke passen. Die erlaubten Orbitale sind hier also stehende Wellen. Da Nukleonen, wie Elektronen, den Spin  $\frac{1}{2}$  haben, kann auch hier jedes Orbital nur doppelt besetzt

Für Protonen hat man einen modifizierten Potentialtopf. Der Boden bleibt flach, er liegt aber wegen der gegenseitigen Abstoßung der Protonen etwas höher als bei den Neutronen. Die elektrische Abstoßung bringt im Kerninneren also nur eine kleine Korrektur gegenüber der dort enorm starken Kernkraft. Neutronen und Protonen sind zwar unterschiedliche, aber bezüglich des höchsten besetzten Niveaus doch gleich. Der zur obigen Abbildung gehörige Atomkern beinhaltet also sechs Protonen und acht Neutronen. Es handelt sich also um  ${}^1_6\text{C}$ . Das Modell mit den zwei getrennten Potentialtöpfen für ein und denselben Atomkern erklärt auch, warum die Atomkerne in der Tendenz mehr Neutronen als Protonen enthalten: Der Potentialtopf der Neutronen ist tiefer, er kann bei gleicher Besetzungsobergrenze = *Ferminiveau*, mehr aufnehmen. Ein weiterer bedeutender Unterschied zwischen den Potentialtöpfen von Neutron und Proton ist der Coulombsche Potentialwall, den ein Proton erst überersteigen muss, ehe es in die Reichweite der Kernkraft kommt. Man stellt jedoch fest, dass das Eindringen eines Protons bzw.  ${}^4_2\text{He}$  - Kerns ( $\alpha$ -Teilchen) trotz *unzureichender* Energie gelingt. Das ist auf den Tunneleffekt zurückzuführen, welchen wir mit der *Heisenbergschen Unbestimmtheits-Relation* (HUR)



$\Delta W \cdot \Delta t = h$  erklären. Diese Version hatten wir im Wochenblatt Q5 kennen gelernt. Hier argumentieren wir, dass sich das Proton eine Abweichung  $\Delta W$  vom Energieerhaltungssatz „leisten“ kann, wenn die Tunnelzeit kleiner als  $\Delta t = h / \Delta W$  ist.

### 4) Bindungsenergie und Separationsenergie

Eine Nukleonenaufnahme bzw. eine Kernverschmelzung = *Kernfusion* kann *exotherm* sein, dann wird *Bindungsenergie*  $\Delta W$  frei und der Kern sinkt auf ein *tieferes* Energieniveau.

Die Fusion kann aber auch *endotherm* sein, dann wird Energie aufgenommen.

Wie in der Chemie ist auch hier eine *Anregungsenergie* erforderlich.



Für die Elektronenhülle des Atoms ist die „*Bindungsenergie*“ die, bei einer Bindung *abgegebene* Energie. Also  $W(X^+) + W(e) \rightarrow W(X) + W_{\text{Bind}}$ .

Der Gegenbegriff dazu ist die „*Ionisationsenergie*“ gemäß  $W(X) + W_{\text{Ionis}} \rightarrow W(X^+) + W(e)$ .

In der Kernphysik wird der Begriff *Bindungsenergie* beibehalten.

Der Begriff *Ionisationsenergie* hingegen wird durch „*Separationsenergie*“ ersetzt.

### 5) Energiebilanz, Massendefekt $\Delta m$ und Bindungsenergie $\Delta W$

Die Energiebilanzen von Kernreaktionen ergeben sich aus Einsteins Formel  $W = m \cdot c^2$ .

Grundlage für alles ist die präzise Kenntnis aller Daten:

Teilchen	Proton	Neutron	Elektron
Masse in kg	1,007 276 u	1,008 665 u	$5,485 800 \cdot 10^{-4} u$
Energie in eV	938, 271998 MeV	939, 565 421 MeV	0, 510999 MeV

Lichtgeschwindigkeit  $c = 2,997 924 58 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Maßzahl von  $e$  in Coulomb  $"e" = 1,602 177 33 \cdot 10^{-19}$

Atomare Masseeinheit in kg  $u = 1,660 540 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Atomare Masseeinheit in J  $W_{u,\text{Joule}} = u \cdot c^2 = 1,492 419 \cdot 10^{-10} \text{ J}$

Atomare Masseeinheit in eV  $W_{u,\text{eV}} = u \cdot c^2 / "e" = 9,314 943 \cdot 10^8 \text{ eV}$

Beispiel: Berechnung der Bindungsenergie des Heliumkerns.

Die Masse des Heliumatoms beträgt  $m_{\text{He Atom}} = 4,002 604 u$ .

Die Masse des Heliumkerns beträgt dann  $m_{\text{He Kern}} = m_{\text{He Atom}} - 2 \cdot m_e = 4,001 570 u$ .

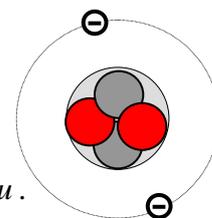
Die Masse der einzelnen Nukleonen beträgt  $m_{\text{Nukleonen}} = 2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n = 4,031 882 u$ .

Der Massendefekt beträgt daher  $\Delta m = m_{\text{Nukleonen}} - m_{\text{He Kern}} = 0,030 375 u$

Die atomare Masseeinheit  $u$  ist bereits gem.  $u \cdot c^2$  in die Energieeinheit *Joule* bzw. gem.  $u \cdot c^2 / "e"$  in die Energieeinheit *eV* umgerechnet.

Ergebnis:  $\Delta W = 4,533 183 \cdot 10^{-12} \text{ J}$  bzw.  $\Delta W = 28,293 891 \cdot 10^6 \text{ eV} = \underline{\underline{28,293 891 \text{ MeV}}}$

Ausgehend von den vier Nukleonen wird pro Heliumkern die Bindungsenergie  $28,29 \text{ MeV}$  frei.



### 6) Bindungsenergien der Atomkerne des Periodensystems

Alle Atomkerne des Kosmos wurden in Sternen „erbrütet“. Meist entstanden sie durch schrittweise Anlagerung von Neutronen. Einige der Neutronen verwandeln sich durch  $\beta^-$ -Zerfall (siehe unten) dabei in Protonen. Nur dann steigen die Kerne durch die Anlagerung im Periodensystem auf. Zunächst bringt die Anlagerung sehr viel Energie, dann immer weniger.

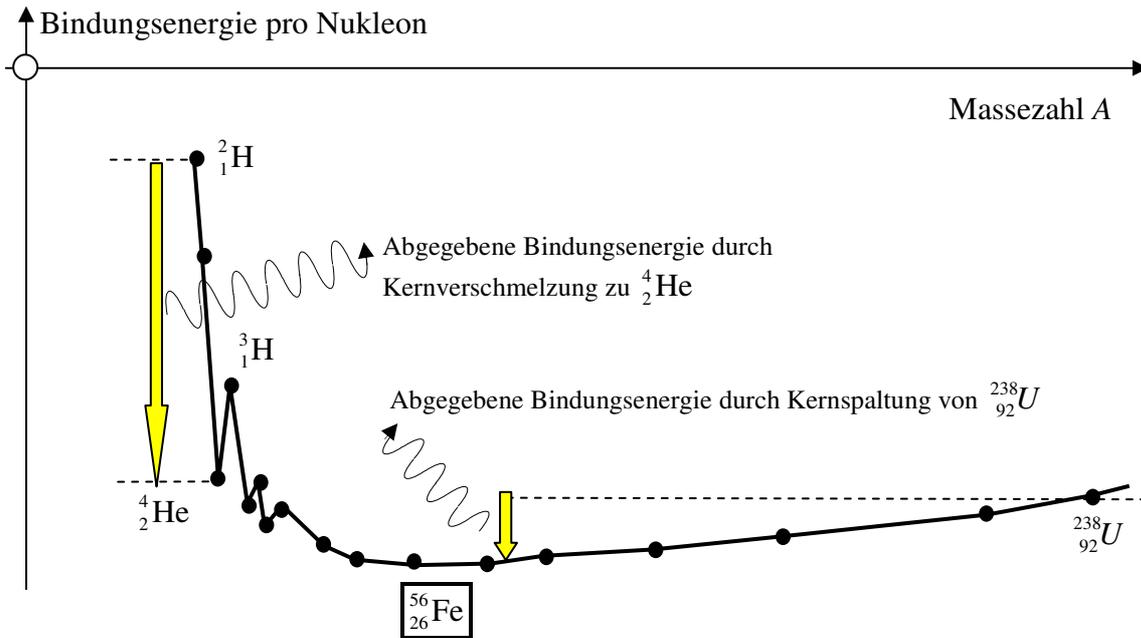
Beim *Eisen*kern ist Schluss. Im Mittel wurde beim *Eisen* die meiste Energie pro Nukleon freigesetzt. Eisen besitzt daher den *stabilsten* Atomkern überhaupt.

Jenseits des Eisens ist der „Energiegewinn“ *negativ*. Man muss mehr Anregungsenergie aufbringen, als an Bindungsenergie herauskommt. Die Reaktionen werden also *endotherm* und die Kerne weniger stabil. Ab Bi (Wismut) werden die Kerne so „wackelig“, dass sie nach einer mittleren Zeit Teile abstrahlen, d.h. strahlungsaktiv = „radioaktiv“ werden.

Der leichteste Kern, in welchem Nukleonen gebunden sind, ist das Wasserstoffisotop Deuterium  ${}^2_1\text{H}$ . Zwei davon verschmelzen unter Energieabgabe zu Helium  ${}^4_2\text{He}$ .

Deshalb liegt Helium energetisch bereits viel tiefer als Deuterium. Z.B. braucht man als Anregungsenergie für die Verschmelzung von Wasserstoffkernen zum Heliumkern den Druck einer Atombombe. Die Fusion *kleiner* Kerne verläuft *exotherm*, der Energiegewinn ist gewaltig. (Wasserstoffbombe). Die Fusion *großer* Kerne verläuft hingegen *endotherm*. In der Natur steht die erforderliche (gigantische) Anregungsenergie nur in untergehenden Sternen zur Verfügung. Ab einer gewissen Größe reicht keine Energie der Welt mehr. Das ist der Grund dafür, dass das Periodensystem etwa bei etwa  $Z = 100$  endet.

Das komplette Energieschema der Kerne zeigt das folgende Diagramm:



## B) Kernumwandlungen

### 1) Isotopentabelle

In einer Isotopentabelle sind *alle* existierenden Isotope aufgelistet.

**Stabile Kerne:** Fett schwarz eingrahmt. Sie liegen in etwa auf der 1. WH, d.h.  $N \approx Z$  mit tendenziell etwas *mehr* Neutronen als Protonen.

**Instabile Kerne** mit  $\beta^+$ -Zerfall befinden sich oberhalb der 1.WH., sie streben zur 1. WH.  
mit  $\beta^-$ -Zerfall befinden sich unterhalb der 1.WH., sie streben zur 1. WH.

In der Zeile (0) steht das Neutron  $n$ . Als *isoliertes* Teilchen unterliegt mit einer Lebensdauer von ca. 15 min. dem mit  $\beta^-$ -Zerfall und wird zu  $p$ . In den Atomkernen ist das Neutron *stabil*.

In der Zeile (1), (2), ... kommen Wasserstoff, Helium ... mit ihren Isotopen.

Das komplette Periodensystem erhält man also durch Lesen *von unten nach oben*.

		Anzahl der Protonen Z								
8						${}^{13}_8\text{O}$	${}^{14}_8\text{O}$	${}^{15}_8\text{O}$	${}^{16}_8\text{O}$	
7	$\beta^+$					${}^{12}_7\text{N}$	${}^{13}_7\text{N}$	${}^{14}_7\text{N}$	${}^{15}_7\text{N}$	
6				${}^9_6\text{C}$	${}^{10}_6\text{C}$	${}^{11}_6\text{C}$	${}^{12}_6\text{C}$	${}^{13}_6\text{C}$	${}^{14}_6\text{C}$	
5				${}^8_5\text{B}$		${}^{10}_5\text{B}$	${}^{11}_5\text{B}$	${}^{12}_5\text{B}$	${}^{13}_5\text{B}$	
4				${}^7_4\text{Be}$		${}^9_4\text{Be}$	${}^{10}_4\text{Be}$	${}^{11}_4\text{Be}$	${}^{12}_4\text{Be}$	
3				${}^6_3\text{Li}$	${}^7_3\text{Li}$	${}^8_3\text{Li}$	${}^9_3\text{Li}$		${}^{11}_3\text{Li}$	
2		${}^3_2\text{He}$	${}^4_2\text{He}$		${}^6_2\text{He}$		${}^8_2\text{He}$			
1		${}^1_1\text{H}$	${}^2_1\text{H}$	${}^3_1\text{H}$						
0			${}^1_0\text{n}$							$\beta^-$
Z/N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Anzahl der Neutronen N