

Empfohlenes Skript für Physik III

KERNPHYSIK

Th. Elze, C. Freudenberger und A. Muthig

Institut für Kernphysik,
J. W. Goethe-Universität Frankfurt am Main
1999

<http://www.ikf.physik.uni-frankfurt.de/IKF-HTML/Elze/kernphysik.html>

Einführung

Zur Einordnung der Kernphysik:

Gebiet	typ. Dimension	typ. Energie	theor. Beschreibung
Weltraumphysik, Astronomie			allg. Relativitätstheorie klass. Mechanik, Elektrodynamik
Makroskopische Physik			
Atom- und Festkörperphysik	10^{-8} cm	1 eV	Quantenmechanik, Quanten- elektrodynamik spez. Relativitätstheorie
Kernphysik	10^{-12} cm	1 MeV	
Elementar- teilchenphysik	$<10^{-13}$ cm	>1 GeV	

Vergleich Atom und Kern

	Atom	Kern
Dimension (Durchmesser)	0.1-1 nm	1-10 fm (fermi, femtometer)
Masse/c²	Elektron: 511 keV	Nukleon: ~ 931 MeV
Bindungsenergien:	$z^2 \cdot 13.6 \text{ eV}$	8 MeV / Nukleon
Wechselwirkung:	elektro-magn. $V \sim 1/r$ 10^{-10}m	Starke Wechselwirkung Schwache Wechselwirkung el.-mag-Wechselwirkung kurze Reichweite (10^{-15} m)

Geschichte I

Historische Entwicklung der Kernphysik

- 1895 Entdeckung der Röntgenstrahlen
- 1896 Entdeckung der Radioaktivität (Becquerel)
- 1897 Entdeckung des Elektrons (J. J. Thomson)
- 1898 Separation von Radium aus Erzen (Curie)
Gesetz des radioaktiven Zerfalls (Rutherford, Soddy)
Identifizierung der verschiedenen Strahlungsarten
(Alpha-, Beta-, Gammastrahlung)
- 1911 Alpha-Streuexperimente (Rutherford) zeigen die Existenz
eines Atomkerns (Beginn der Kernphysik)
- 1913 Systematik der Röntgenspektren (Moseley),
Begriff der Ordnungszahl, Basis für das Periodensystem
- 1913 Erklärung des Wasserstoffspektrums (Bohr)
- 1919 Erste Kernumwandlung (Rutherford)
- ab 1925 Entwicklung der Quantenmechanik zur Beschreibung der Atom-
struktur (u.a. De Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Born)
- 1930 Erste Teilchenbeschleuniger (Cockroft, Walton, Lawrence)

Geschichte II

- 1932 Entdeckung des Neutrons (Chadwick). Formulierung des bis heute geltenden Kernaufbaus aus Z Protonen und $N = A - Z$ Neutronen
- 1935 Beschreibung der Kernkräfte durch Mesonenaustausch (Yukawa)
- 1936 Entdeckung des Myons (Anderson und Neddermeyer)
- 1938 Kernspaltung (Hahn und Straßmann)
- 1939 Erste korrekte Interpretation des Mechanismus der Kernspaltung (Meitner und Frisch),
Theoretische Behandlung mit Hilfe des Tröpfchenmodells (Bohr und Wheeler)
- ab 1940 Entdeckung der Transurane (Seaborg)
- 1942 Erste kontrollierte Kettenreaktion (Fermi)
- 1946 Entdeckung des Pions (Träger der anziehenden „Kernkraft“) (Powell)
- 1950 Viele kernphysikalische Untersuchungen mit Hilfe von
Reaktoren und Teilchenbeschleunigeranlagen,
Entwicklung verfeinerter Kernmodelle, verbesserte Beschreibung
der Mechanismen bei Kernreaktionen
- 1956 Theorie des Beta-Zerfalls (Fermi)
- ab 1970 Kernphysik mit schweren Ionen. Besonders herausragend: Erzeugung
neuer Elemente (zur Zeit (1998) bis $Z = 112$) bei der GSI in Darmstadt

Atomkern

1.2 Zusammensetzung und Masse der Atomkerne

Um 1920 waren nur Alphateilchen, Protonen und Elektronen bekannt. Man nahm daher an, daß der Atomkern aus Protonen und Elektronen bestehe.

Experimentelle Tatsachen

1. Die Atomgewichte A der Elemente sind (mit Ausnahmen) ungefähr ganzzahlig.
2. Alpha-Streuexperimente ergaben, daß die Kernladung den Wert Ze besitzt, wobei die Ordnungszahl Z etwa der halben Massenzahl entspricht.
3. Beim radioaktiven Zerfall und ersten künstlichen Kernumwandlungen wurde die Emission von Alphateilchen, Protonen und Elektronen beobachtet.

Aus diesen Beobachtungen ergab sich die Folgerung, daß der Kern aus A Protonen und $(A-Z)$ Elektronen besteht.

Bei diesem Modell traten aber verschiedene Probleme auf

Die genannten Schwierigkeiten wurden durch die Entdeckung des Neutrons beseitigt (Chadwick, 1932).

Zusammensetzung des Atomkerns

Proton:

Masse: $938.27 \text{ MeV}/c^2$

Spin: $1/2$

Ladung: $+1$

$t_{1/2}$: $> 10^{-31}$ Jahre

Neutron:

Masse: $939.57 \text{ MeV}/c^2$

Spin: $1/2$

Ladung: 0

$t_{1/2}$: 10.4 min

Zerfall : β^- , $E = 782 \text{ keV}$

Nukleonen bestehen aus Quarks:

Quark	Ladung	Spin
up	$+2/3$	$1/2$
down	$-1/3$	$1/2$

Proton: uud

Neutron: udd

Klassifizierung der Kerne

A Anzahl Nukleonen

Z Anzahl Protonen (Ordnungszahl)

N Anzahl Neutronen

$$A = Z + N$$

Begriffe:

Isotope: $Z = \text{konstant}$

Isobare: $A = \text{konstant}$

Isotone: $N = \text{konstant}$

Isomere:
Zustände) $A, Z = \text{konstant}$ (metastabile

Klassifizierung der Kerne

Heisenberg folgerte daraus, daß der Kern aus Z Protonen und $A-Z$ Neutronen, also insgesamt A Fermionen, besteht.

Wichtige Begriffe:

Isotope: Kerne mit gleichem Z , verschiedenem A

Isobare: Kerne mit gleichem A

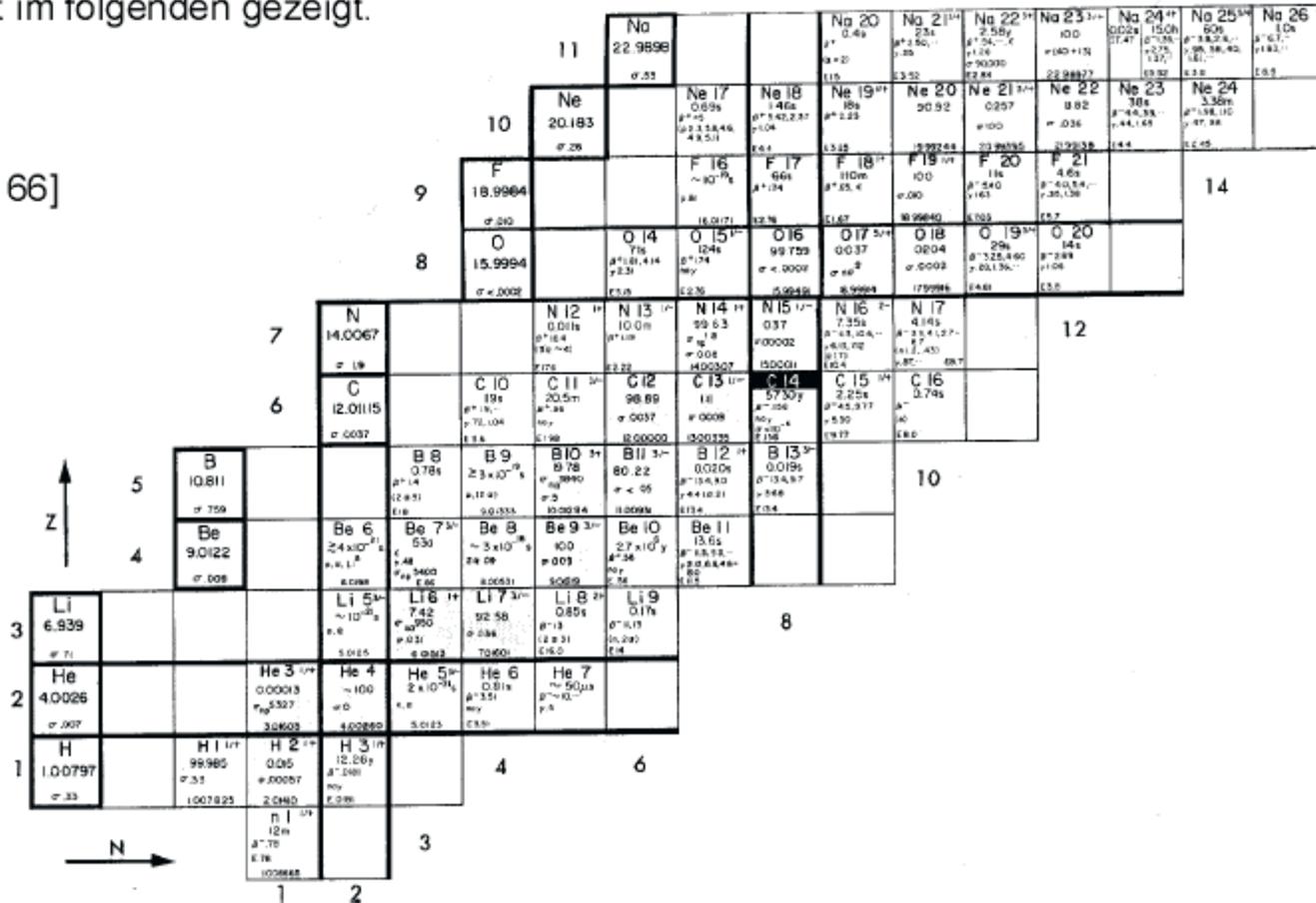
Isotone: Kerne mit gleicher Neutronenzahl $A-Z$

Isomere: Kerne mit gleichem A und Z , metastabile Zustände

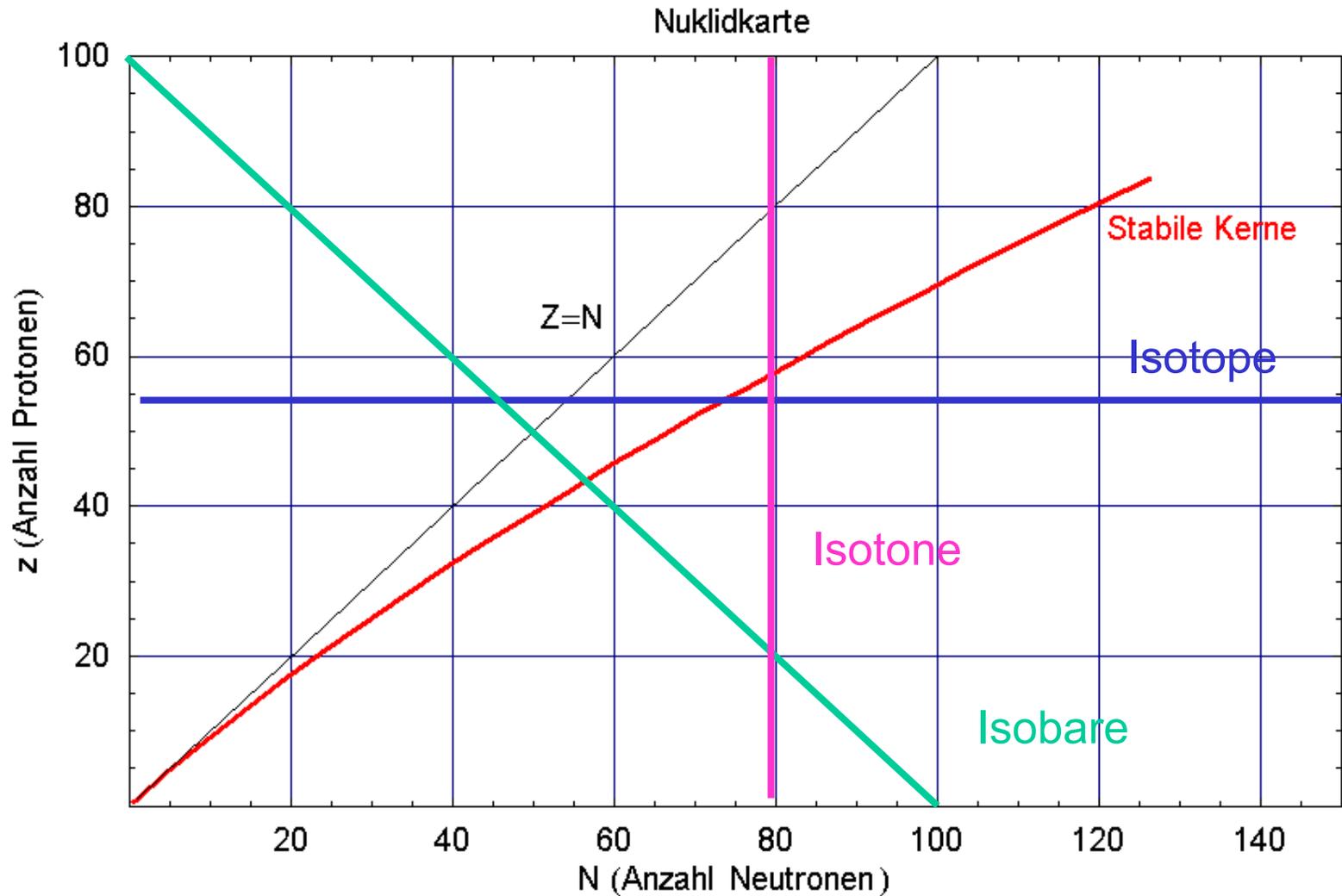
Nuklidkarte

Alle beobachteten Kerne lassen sich in eine Nuklidkarte (N,Z-Ebene) eintragen. Ein Ausschnitt ist im folgenden gezeigt.

aus [Eng 66]



Nuklidkarte II



Links zu Nuklidkarten

<http://www1.physik.tu-muenchen.de/~gammel/matpack/html/Nuclear/Nuclids/nuclids1.html>

<http://www1.physik.tu-muenchen.de/~gammel/matpack/html/Nuclear/Elements/stable.html>

<http://sutekh.nd.rl.ac.uk/CoN/>

Histor X
View >>
3 ...
2 ...
La...
Mo...
To...

9-F-20

- Atomic Mass: 19.9999813 ± 0.0000000 amu
- Excess Mass: -17.396 ± 0.084 keV
- Binding Energy: 154402.672 ± 0.087 keV
- Beta Decay Energy: B- 7024.533 ± 0.084 keV

- Spin: 2+
- Half life: 11.00 S (0.1818 %)
- Mode of decay: Beta to [Ne-20](#)
 - Decay energy: 7.025 MeV

- Possible parent nuclides:
 - Beta from [O-20](#)

 [Element F](#)



Stable Isotopes

The following table lists all known *stable* isotopes. Several elements have naturally occurring isotopes of extremely large half life (for instance chromium-50 with $1.8 \cdot 10^{17}$ years). These are not found in the table below - look into the elements individual description to find the complete list of all isotopes (Look here for [chromium](#)). Bismuth is the element with the highest atomic number that has a stable isotope (83-Bi-209).

Z	Symbol	Name	Stable Isotopes
1	H	Hydrogen	<u>H-1</u> : 99.985% <u>H-2</u> : 0.015%
2	He	Helium	<u>He-3</u> : 0.000138% <u>He-4</u> : 99.999862%
3	Li	Lithium	<u>Li-6</u> : 7.5% <u>Li-7</u> : 92.5%
4	Be	Beryllium	<u>Be-9</u> : 100%
5	B	Boron	<u>B-10</u> : 20.0% <u>B-11</u> : 80.0%
6	C	Carbon	<u>C-12</u> : 98.90% <u>C-13</u> : 1.10%
7	N	Nitrogen	<u>N-14</u> : 99.63% <u>N-15</u> : 0.37%
8	O	Oxygen	<u>O-16</u> : 99.762% <u>O-17</u> : 0.038% <u>O-18</u> : 0.200%

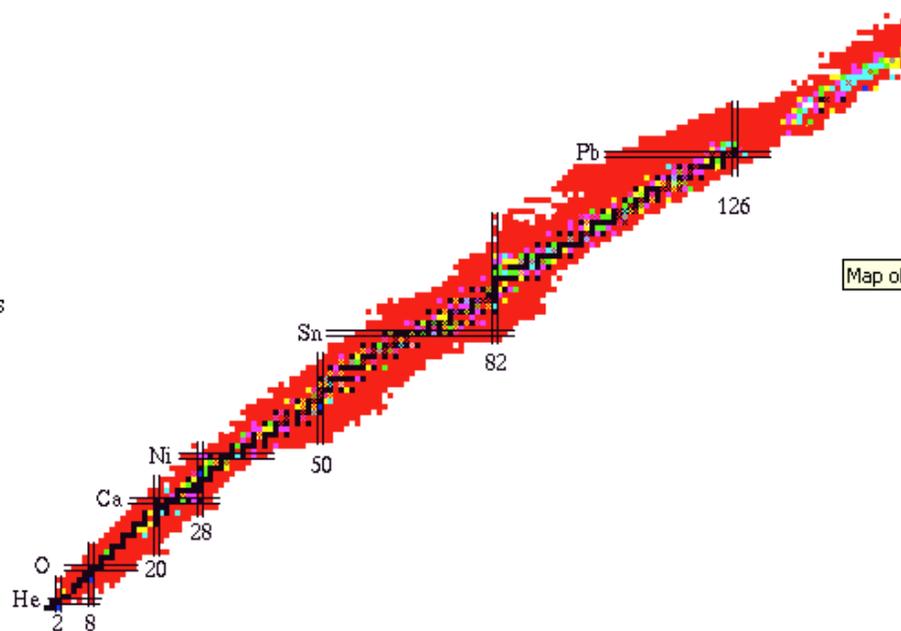
Histor X

View >>

-  3 ...
-  2 ...
-  La...
-  Mo...
-  To...

The arrangement of this Chart is first presenting map of all known nuclides. Each horizontal row represents one element, the colored dots indicate the known isotopes of that element. A vertical column represents the nuclides with same neutron numbers.

Heavy lines on the Chart occur for Z and N equal to 2,8,20,28,50,82, and 126. These are the so-called "magic numbers".



When you click a region of dot, you may see more detailed chart section.

From which you can get idea of life time of nuclides which is distinguished by its color. By clicking a cell, you may get property of the nuclide or atom.

Map of Nuclides

To find a nuclide, you can give nuclide name in as U235 and send



[Online Cross Section Graphs](#)

Same kind of service is also available at JAERI [JNDC](#).

This table is mirrored at:

- [KAERI Korea](#)

Massen und Bindungsenergien

Nach der speziellen Relativitätstheorie gilt:

$$E = mc^2 = m_0c^2 + T = \sqrt{(m_0c^2)^2 + p^2c^2}$$

m_0 ist die Ruhemasse des betrachteten Teilchens

Für $T \ll m_0c^2$ ($v \ll c$) gilt

$$E \approx m_0c^2 \left(1 + \frac{p^2}{2m_0^2c^2} \right) = m_0c^2 + \frac{p^2}{2m_0}$$

Für $T \gg m_0c^2$ ($v \approx c$) gilt

$$E \approx c \cdot p$$

Die Kinematik kernphysikalischer Prozesse zwischen Nukleonen oder Atomkernen lässt sich durch die nichtrelativistischen Beziehungen beschreiben. Elektronen sind dagegen i. a. stark relativistisch ($v \approx c$).

Massen von Kernen (Einheiten)

Masseneinheiten. Beziehungen zwischen Massen und Bindungsenergien

Gemessen und in Tabellen angegeben werden Atommassen ($M_{\text{Kern}} + M_{\text{Hülle}}$).

Für kernphysikalische Fragestellungen spielt $M_{\text{Hülle}}$ i.a. keine Rolle und kann vernachlässigt werden.

Standard: $1 \text{ u} = 1/12 m(^{12}\text{C}) = 1.66 \cdot 10^{-24} \text{ g} = 931.5 \text{ MeV}/c^2 = 1 \text{ atomare Masseneinheit}$

In dieser Einheit ist

$$M_p = 1.00727647 \text{ u} = 938.2796 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_n = 1.00866501 \text{ u} = 939.5731 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_e = 5.4858026 \cdot 10^{-4} \text{ u} = 0.511003 \text{ MeV}/c^2$$

Bindungsenergien

Genauere Massenbestimmungen zeigen, daß die Atom-(Kern-)massen kleiner sind als die Summe ihrer Bestandteile.

$$\begin{aligned} \text{Atommasse } m(Z,A) &= Z M_p + Z M_e + (A-Z) M_n - B(Z,A)/c^2 \\ &= Z m_H + (A-Z) M_n - B(Z,A)/c^2 \end{aligned}$$

$$\text{Kernmasse } M(Z,A) = Z M_p + (A-Z) M_n - B'(Z,A)/c^2$$

Hierbei ist $B(Z,A)$ die gesamte Bindungsenergie (Kern + Hülle), $B'(Z,A)$ die Kernbindungsenergie.

Aus diesen Gleichungen erhält man eine Beziehung zwischen Atom- und Kernmasse:

$$M(Z,A) = m(Z,A) - (Z M_e - B_e(Z)/c^2).$$

Die Bindungsenergie der Hülle ist näherungsweise gegeben durch

$$B_e(Z) = 15.73 Z^{7/3} \text{ eV}$$

und kann gegenüber dem Term $Z M_e$ vernachlässigt werden, so daß

$$B(Z,A) = B'(Z,A).$$

Eine weitere bequeme Größe ist der Massendefekt (-exzeß) $\Delta(Z,A) = M(Z,A) - A$.

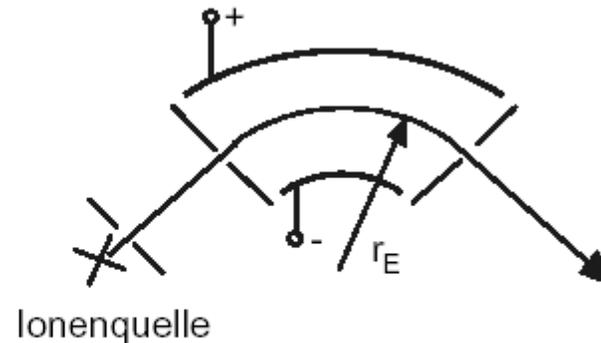
Messung von Atommassen

Grundlagen der Massenspektroskopie

Im folgenden werden einige Filter erläutert, aus denen Massenspektrometer oder Massenspektrographen aufgebaut werden können. Wichtige Filter sind:

1. Energiefilter,
2. Impulsfilter,
3. Geschwindigkeitsfilter.

Zylinderkondensator als Energiefilter:

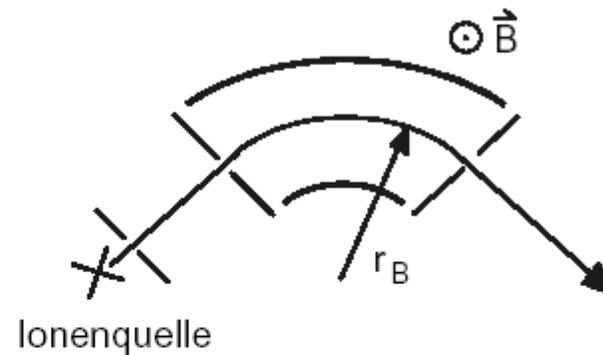


Bedingung für eine Kreisbahn:

$$\frac{mv^2}{r_E} = n \cdot e \cdot E = \text{const.}$$

Magnetische Ablenkung

Impulsfilter (Magnetfeld):



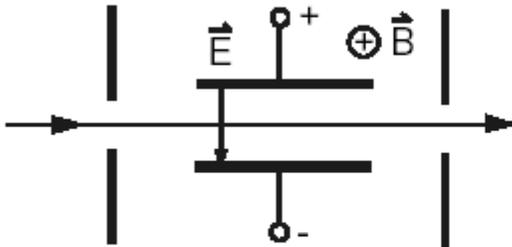
Bedingung für eine Kreisbahn:

$$\frac{mv^2}{r_B} = n \cdot e \cdot v \cdot B = \text{const.}$$

$$p = m \cdot v = r_B \cdot n \cdot e \cdot B = \text{const.}$$

Wien-Filter

Geschwindigkeitsfilter (Wien-Filter):



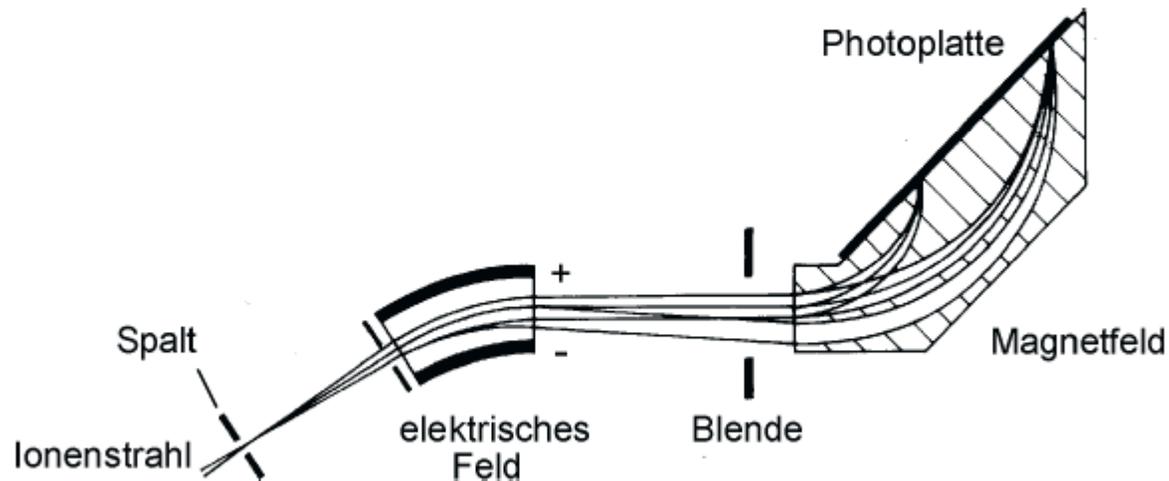
$$n \cdot e \cdot E = n \cdot e \cdot v \cdot B \quad \Rightarrow \quad v = \frac{E}{B}$$

Positive Ionen werden durch das E -Feld nach unten, durch das B -Feld nach oben abgelenkt. Bei Gleichheit der Kräfte findet keine Ablenkung statt, und die Ionen können das Filter passieren.

Massenspektrometer I

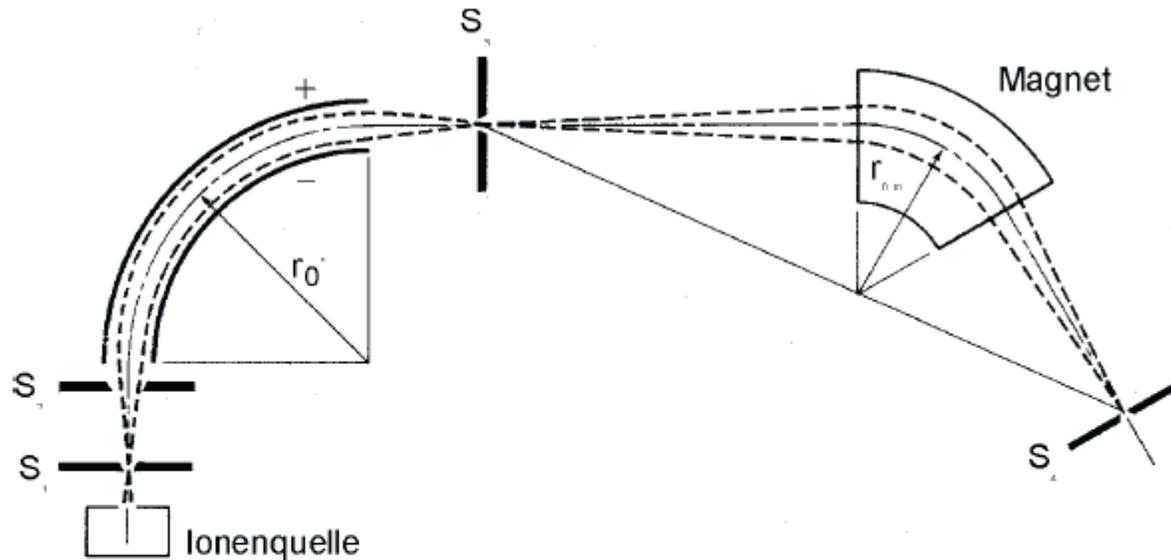
Massenspektrographen und Massenspektrometer

Die Kombination zweier Filter (magnetisches und elektrisches Feld) erlaubt eine Massenbestimmung.



aus [Beth96]

Massenspektrometer II



Absolute Messungen von Atommassen erfordern die genaue Kenntnis von E , B , r_E und r_B . Die erreichbare Genauigkeit beträgt etwa $\Delta m/m \approx 10^{-4}$.

Relative Messungen sind genauer. Standard ist die Masse von ^{12}C . Da ^{12}C komplexe Moleküle bildet, sind Eichlinien im gesamten Massenbereich vorhanden. Bei relativen Messungen können Massen mit einer Genauigkeit von $\Delta m/m \approx 10^{-8}$ bestimmt werden.

Beispiel einer Massenbestimmung mit MS

Zur Erläuterung diene folgendes Beispiel:

Die Masse eines einfach geladenen Kohlenwasserstoffions beträgt

$$m((^{12}\text{C}_i \text{ } ^1\text{H}_k)^+) = i m(^{12}\text{C}) + k m(^1\text{H}) - 1 M_e$$

Die Bindungsenergien der Elektronen sind zu vernachlässigen.

Beispiel: Gemessen werde das Dublett $^{160}\text{Gd}^+ - (^{12}\text{C}_{12} \text{ } ^1\text{H}_{16})^+$. Gesucht ist die Masse des ^{160}Gd -Atoms.

Man mißt für die Massendifferenz

$$m((^{12}\text{C}_{12} \text{ } ^1\text{H}_{16})^+) - m(^{160}\text{Gd}^+) = 0.19805 \text{ u};$$

also ist die Masse von ^{160}Gd

$$m(^{160}\text{Gd}) = 12 \cdot 12 + 16 \cdot 1.007825 - 0.00055 - 0.19805 = 159.92660 \text{ u}.$$

Massenbestimmung durch Kernreaktionen

Bestimmung von Massendifferenzen aus der Energietönung von Kernreaktionen

Wir betrachten die Kernreaktion $A + B \rightarrow C + D$. Die Ruhemassen der vier Teilchen seien M_A, M_B, M_C, M_D und deren kinetische Energien im Schwerpunktsystem T'_A, T'_B, T'_C, T'_D . Der Reaktions-Q-Wert (Energietönung) ist gegeben durch

$$Q = T'_C + T'_D - T'_A - T'_B = (M_A + M_B - M_C - M_D) \cdot c^2 = (\Delta_A + \Delta_B - \Delta_C - \Delta_D) \cdot c^2$$

wobei die Größen Δ_i die Massendefekte sind. Ist $Q > 0$, so wird Energie frei, die Reaktion ist exotherm, ist $Q < 0$, so wird Energie gebraucht, die Reaktion ist endotherm.

Beispiel: ${}^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow {}^7\text{Be} + \text{n}$

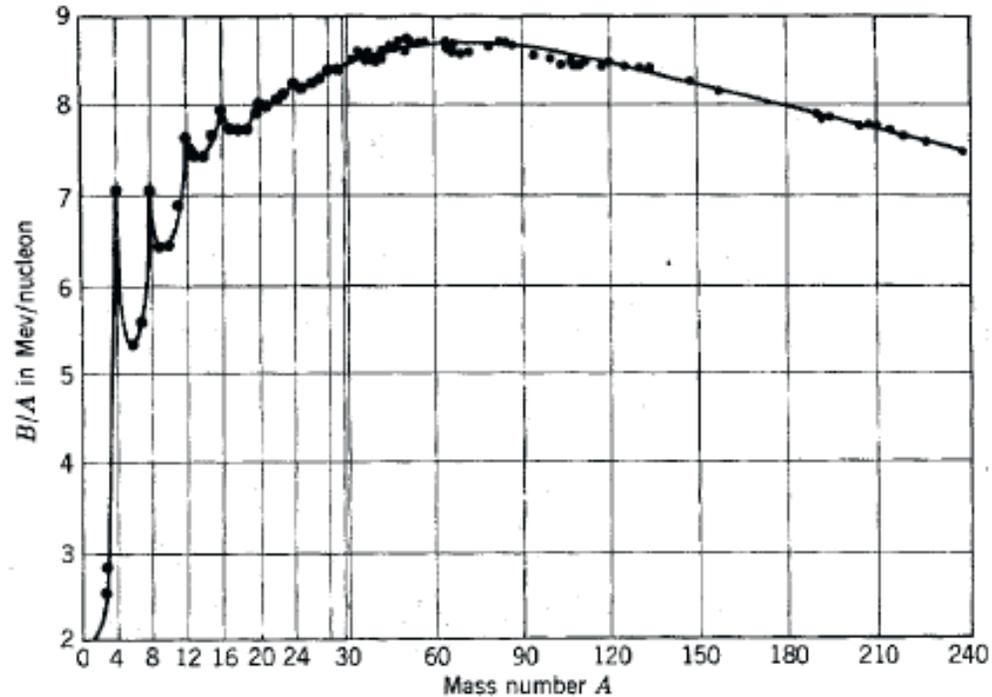
In Massendefekten ausgedrückt ergibt sich der Q-Wert zu

$$Q = (14908.6 + 7289.0 - 15770.3 - 8071.7) \text{ keV} = -1644.2 \text{ keV.}$$

Es handelt sich um eine endotherme Reaktion. Die im Laborsystem notwendige kinetische Energie ergibt sich zu $T_{Lab} = -Q (M_1 + M_2) / M_2$, wobei M_1 die Masse des Projektils, M_2 die des Targetkerns ist. Solche „Schwellenenergien“ für endotherme Reaktionen lassen sich sehr genau bestimmen, so daß daraus Massendifferenzen mit großer Präzision ermittelt werden können.

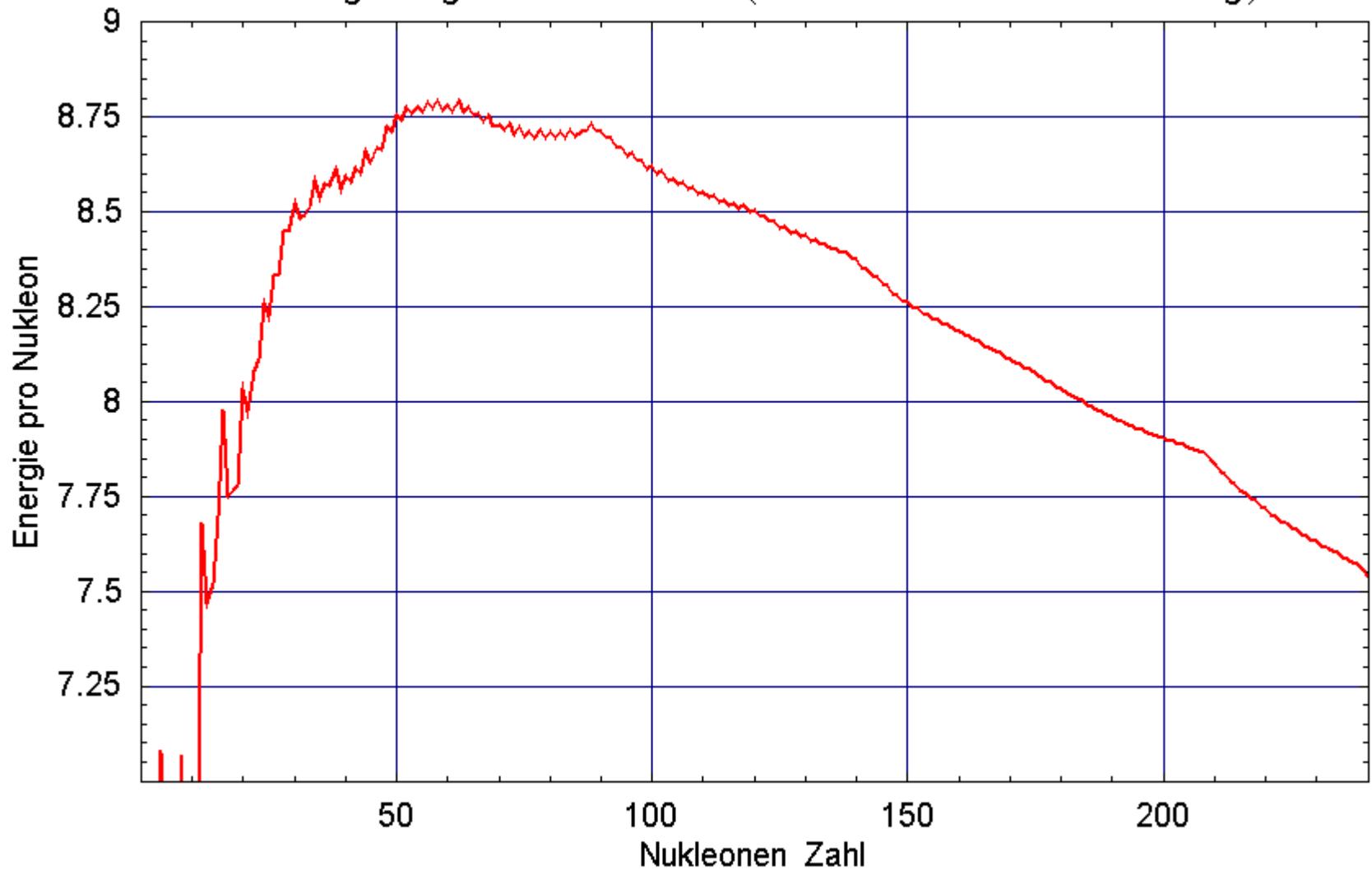
Bindungsenergien aus Massen bestimmt

Systematik der Bindungsenergien



aus [Eva55]

Bindungsenergien der Atomkerne (alle Massen mit höchster Bindung)



Bindungsenergien von stabilen Kernen

In der Abbildung ist die Bindungsenergie/Nukleon als Funktion der Nukleonenzahl aufgetragen. Die Figur zeigt dreierlei:

1. Die Bindungsenergie pro Nukleon B/A ist näherungsweise konstant. $B/A \approx 8 \text{ MeV}$. Hinweis auf „Sättigungscharakter“ der Kernkräfte, d.h. es besteht Analogie zur homöopolaren Atombindung (Austausch von Valenzelektronen). Yukawa forderte deshalb 1936 auch für die Kernbindung ein Austauscheteilchen, das schließlich 1946 in Form des Pions entdeckt wurde.
2. Für sehr leichte und sehr schwere Kerne nimmt die Bindungsenergie ab. Es besteht die Möglichkeit, durch Spaltung schwerer Kerne oder Fusion leichter Kerne Energie zu gewinnen.
3. Bei bestimmten Nukleonenzahlen („magische“ Zahlen) wird ein anomales Verhalten (besonders große Bindungsenergie) beobachtet. Dies wird als Hinweis auf Schaleneffekte ähnlich denen in der Atomhülle gewertet.