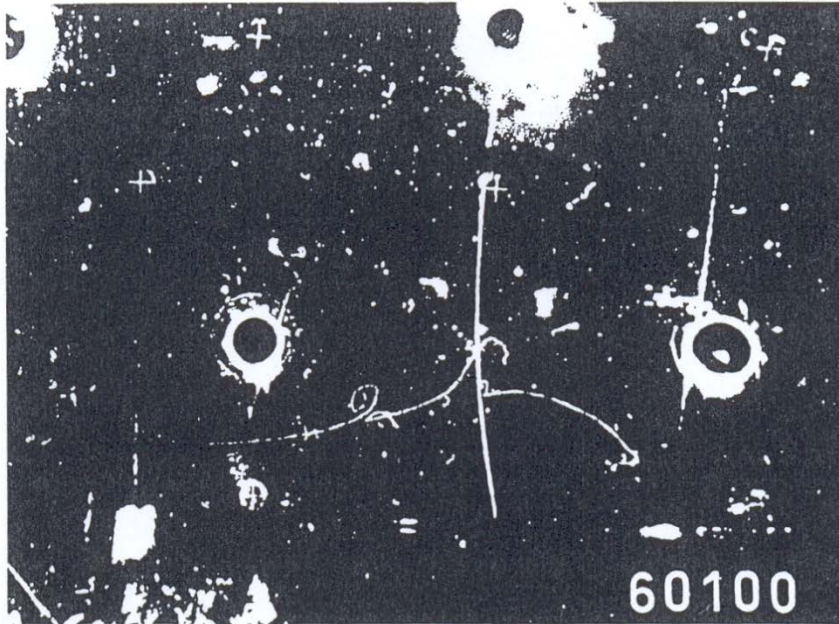


Abb. XIII.1 Entdeckung des “schwachen neutralen Stromes”



a)

Neutraler Strom
= "schwaches Licht"

b)



Abb. 9. Dieses erste Ereignis mit einem neutralen schwachen Strom wurde in Aachen entdeckt. Ein Neutrino dringt von links in die Blasenkammer ein (auf dem Bild nicht sichtbar) und wird elastisch an einem Elektron gestreut. Das Elektron ist als rechte Spurkaskade (Bremsstrahlung) zu erkennen. Dieses Bild ist in die Geschichte des CERN eingegangen

One out of three $\nu_e \rightarrow \nu_e$ events

Die neutralen νN Ereignisse finden mit erheblicher Rate statt:

$$R_\nu = \frac{\sigma_{NC}(\nu N \rightarrow \nu X)}{\sigma_{CC}(\nu N \rightarrow \mu X)} = 0.307 \pm 0.008$$

d.h. etwa 1/3 der νN Wechselwirkungen geschieht aufgrund des Z-Austauschs

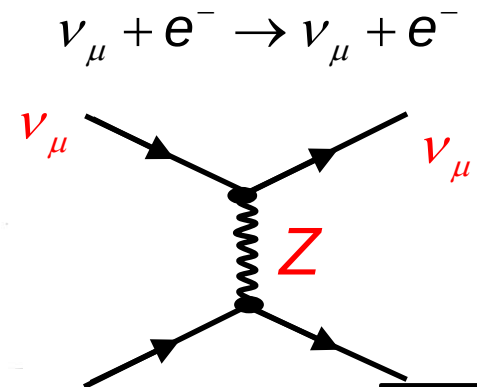


Fig-TP-6.3

Abb. VIII.2 Entdeckung der W- und Z-Bosonen

$$p\bar{p} \rightarrow Z \rightarrow f\bar{f} + X$$

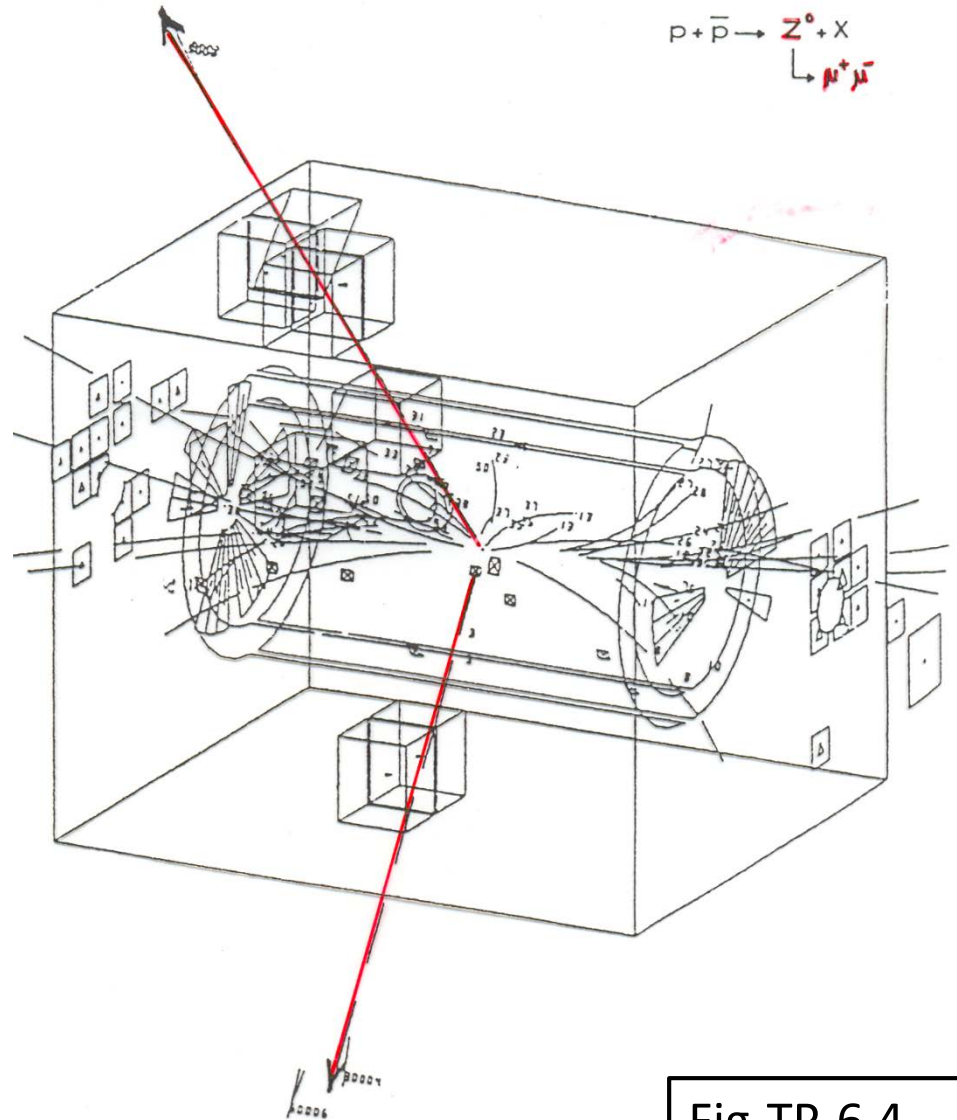
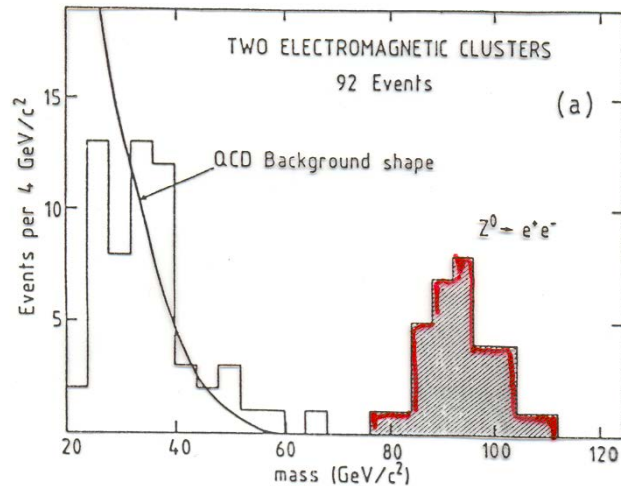
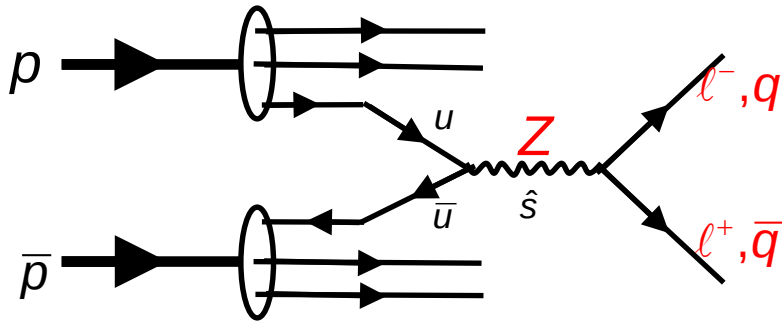
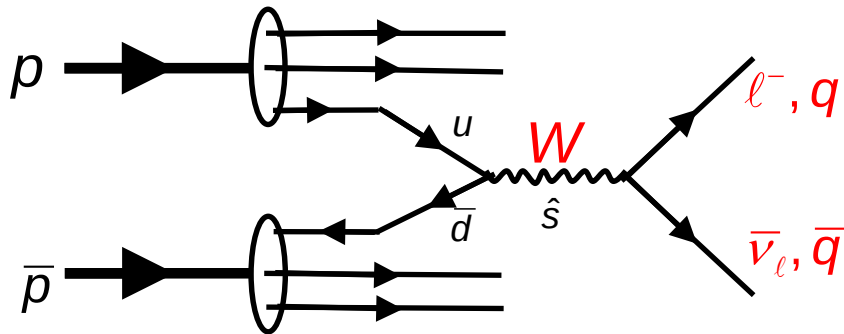


Fig-TP-6.4

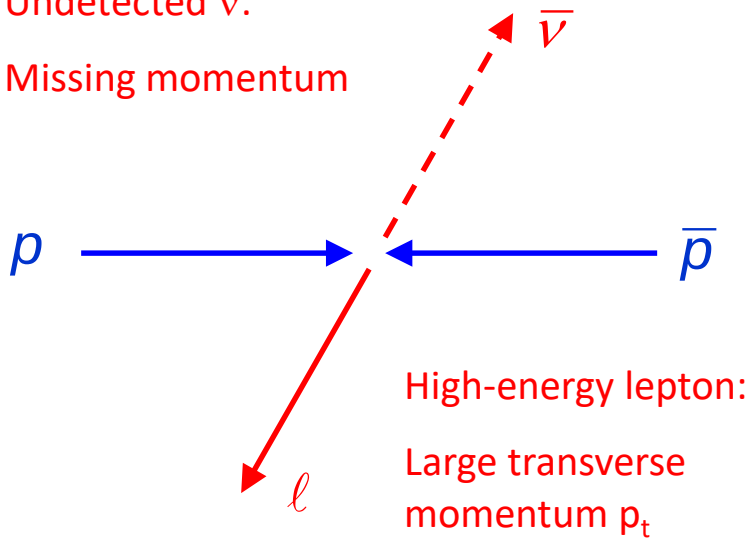
Abb. VIII.3 Entdeckung der W- und Z-Bosonen

$$p\bar{p} \rightarrow W \rightarrow \ell \bar{\nu}_\ell + X$$



Undetected ν :

Missing momentum



$$W^- \rightarrow e \bar{\nu}$$

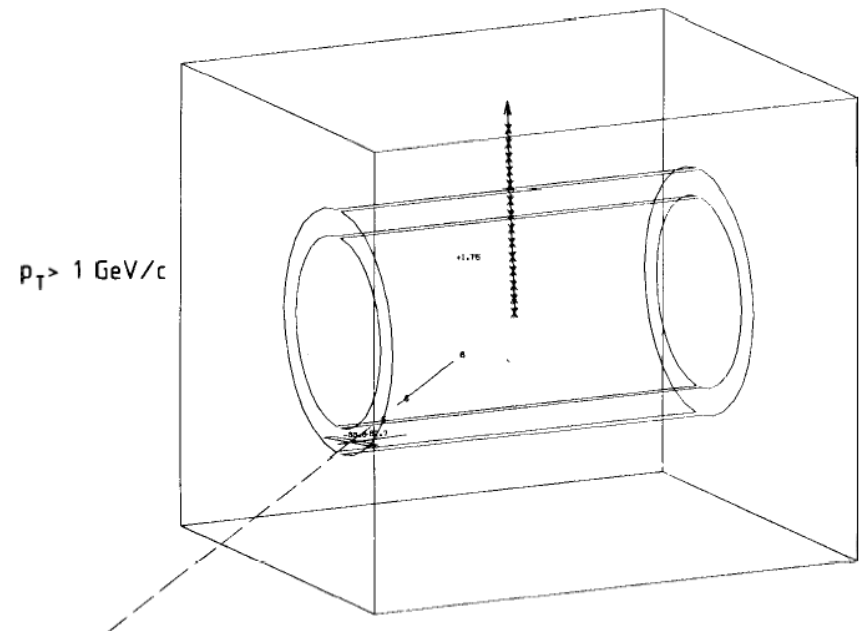
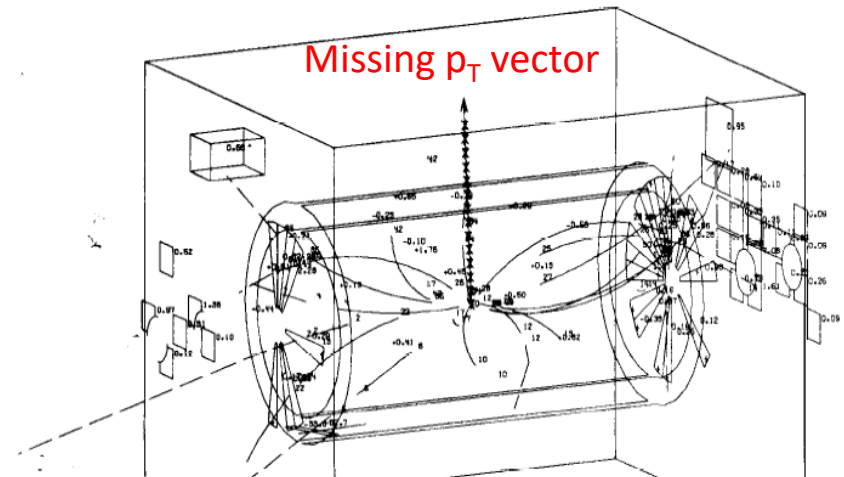


Fig. 16b. The same as picture (a), except that now only particles with $p_T > 1$ GeV/c and calorimeters with $E_T > 1$ GeV are shown.

Abb. VIII.4 CKM-Matrix

Betrag der Matrixelemente:

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 0.97434^{+0.00011}_{-0.00012} & 0.22506 \pm 0.00050 & 0.00357 \pm 0.00015 \\ 0.22492 \pm 0.00050 & 0.97351 \pm 0.00013 & 0.0411 \pm 0.0013 \\ 0.00875^{+0.00032}_{-0.00033} & 0.0403 \pm 0.0013 & 0.99915 \pm 0.00005 \end{pmatrix}$$

Abb. VIII.5 Beta-Spektrum

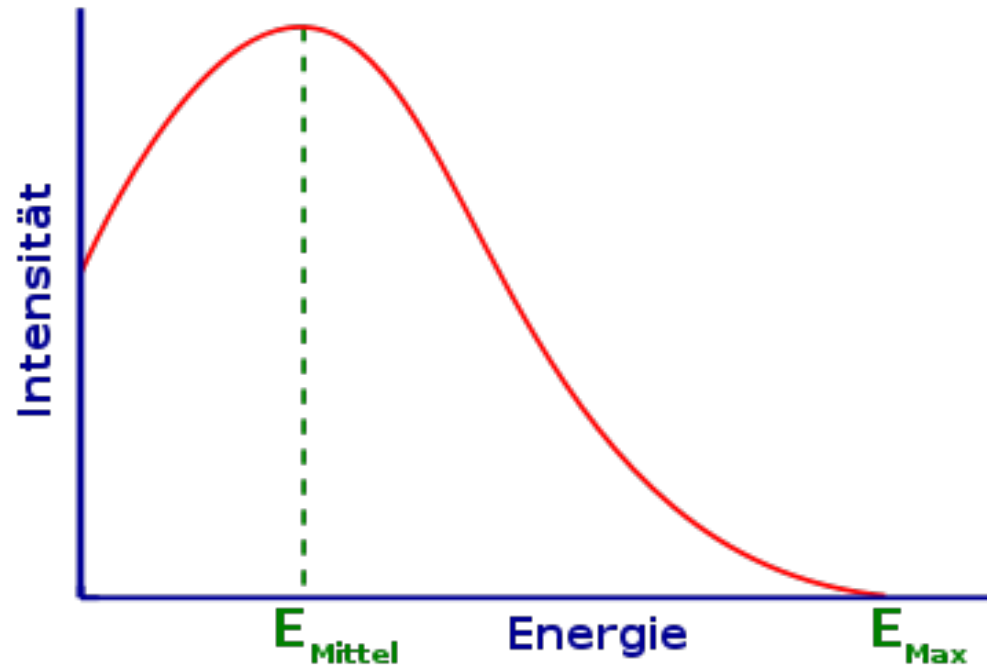


Abb. VIII.6 Kurie-Plot und Neutrino-Masse

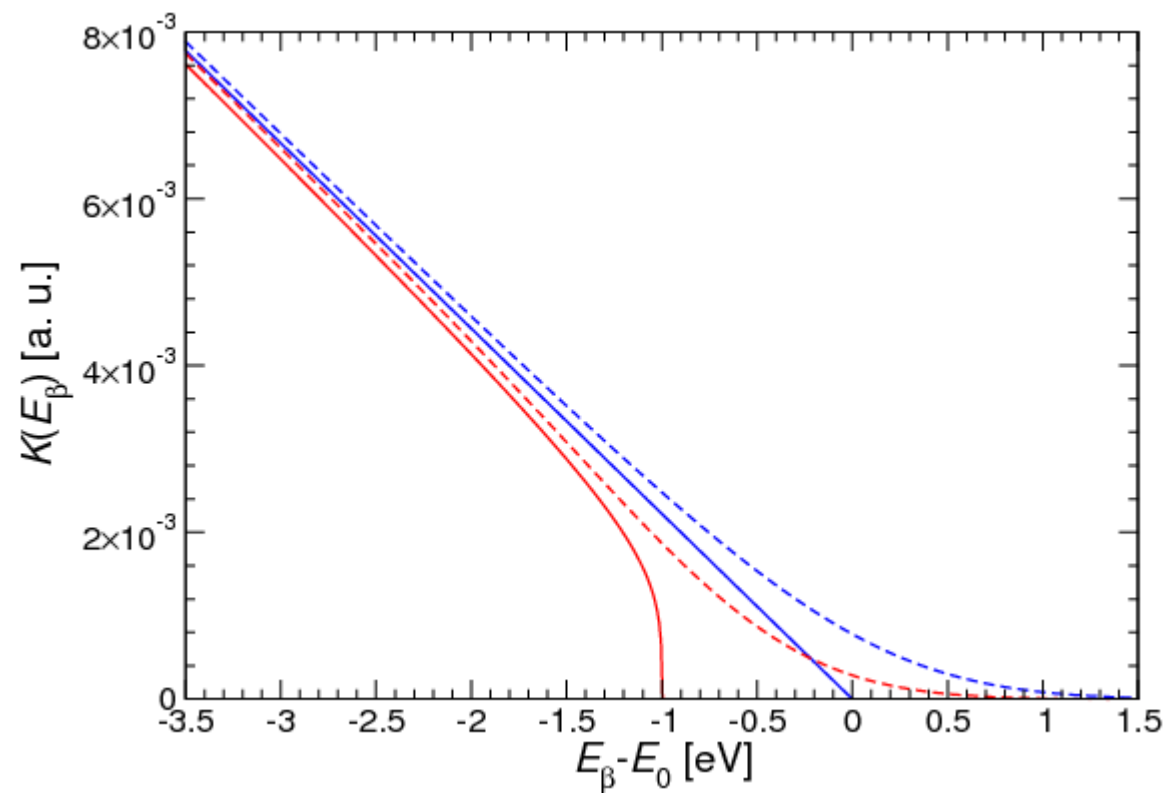


Abb. VIII.6a β -Spektrum und Neutrino-Masse (Tritium-Zerfall)

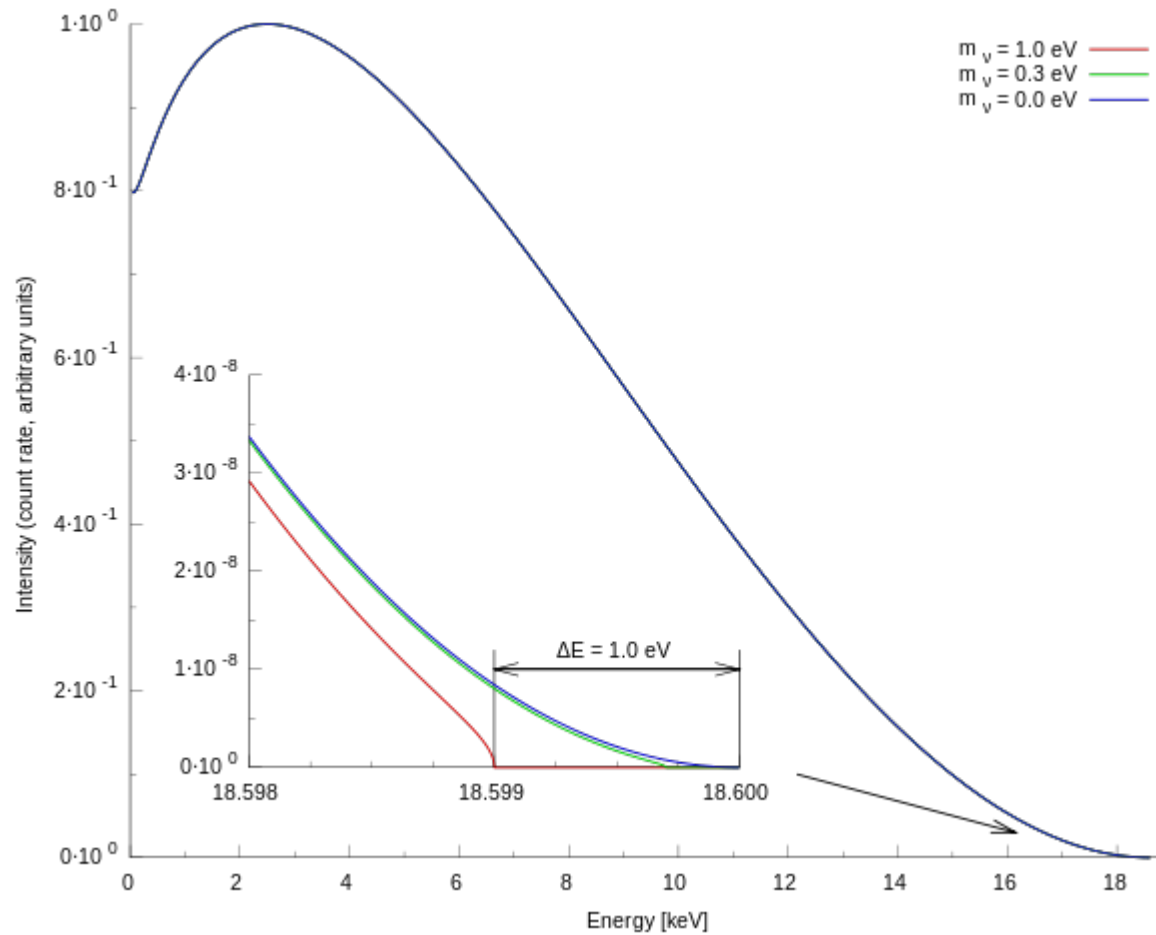


Abb. VIII.7 KATRIN = Karlsruhe Tritium Neutrino Exp.

Goal: measure neutrino mass w/ sensitivity of 0.2 eV (90%CL)

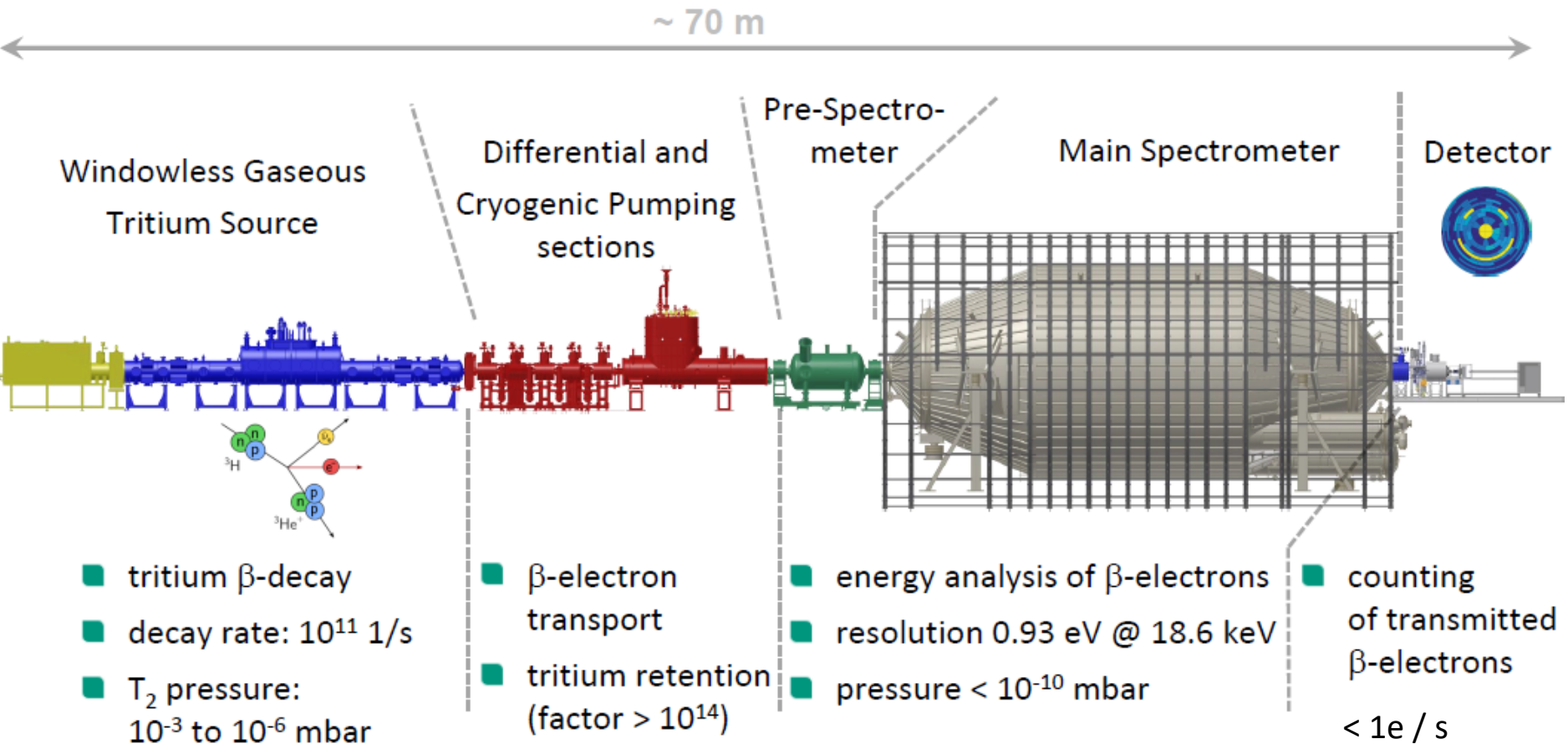
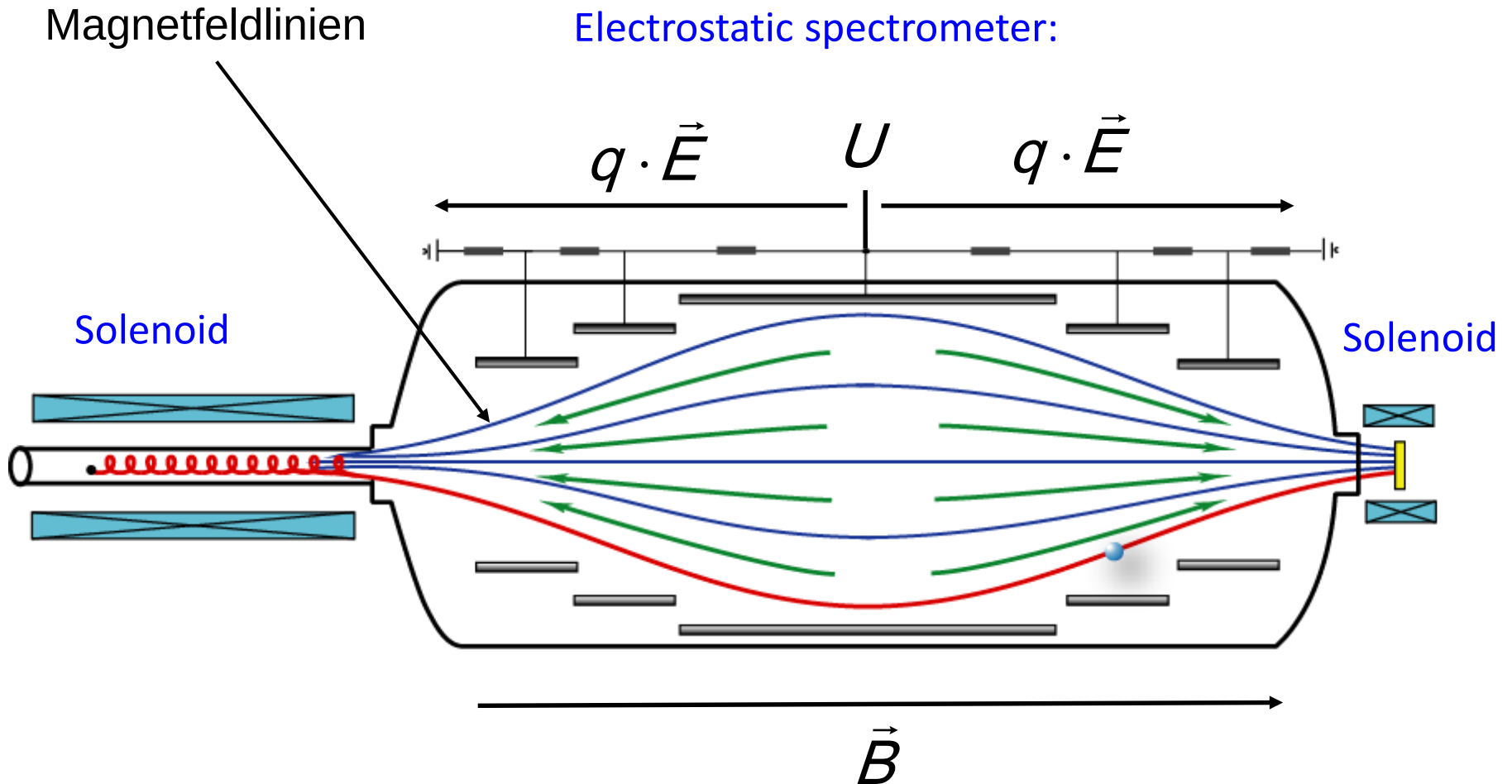
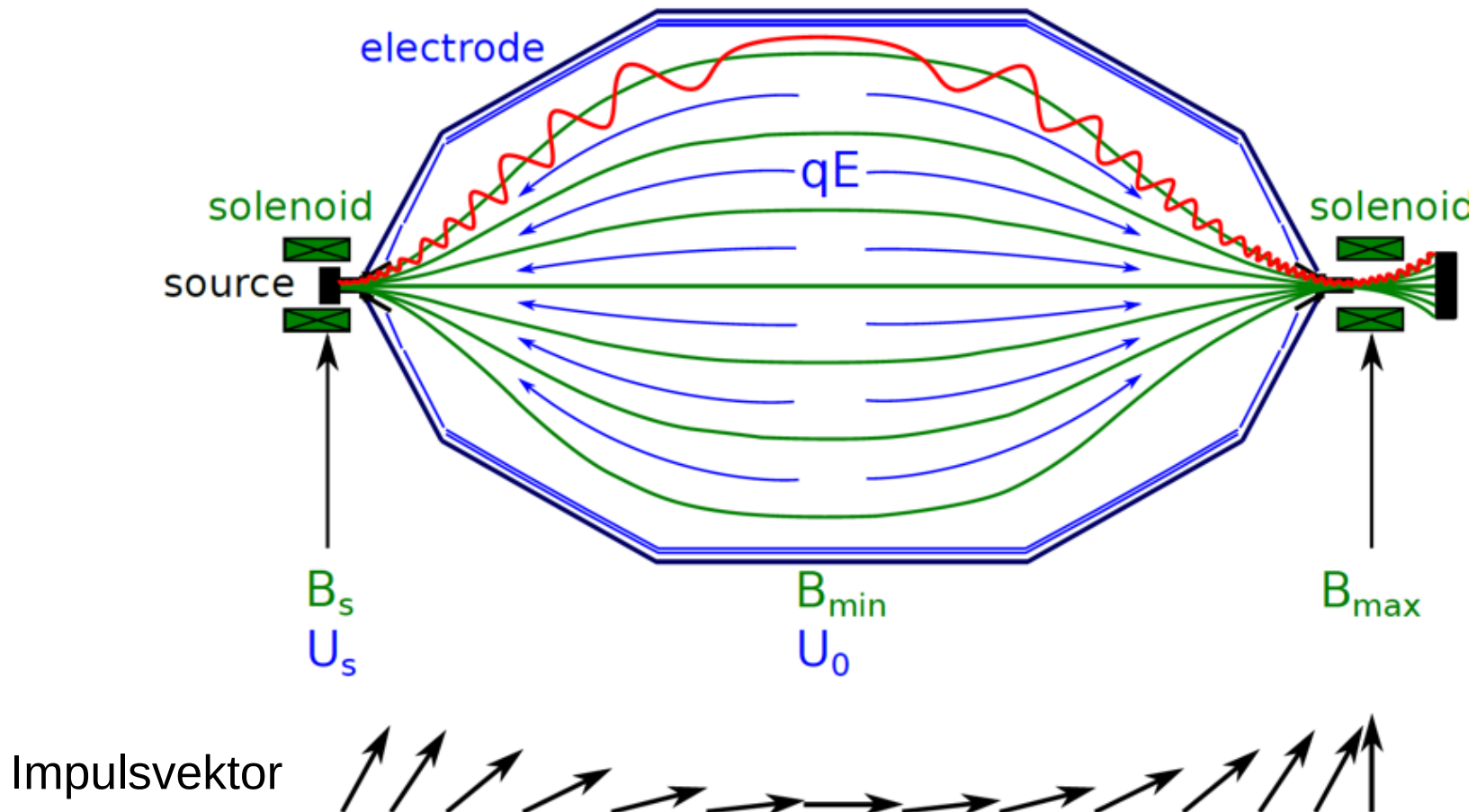


Abb. VIII.7a MAC-E Filter - Prinzip



No electron flux for: $E_{kin} = e \cdot U_{max}$

Abb. VIII.7b MAC-E Filter – Prinzip II



Adiabatic variation of B-field leads to alignment of momentum vector.

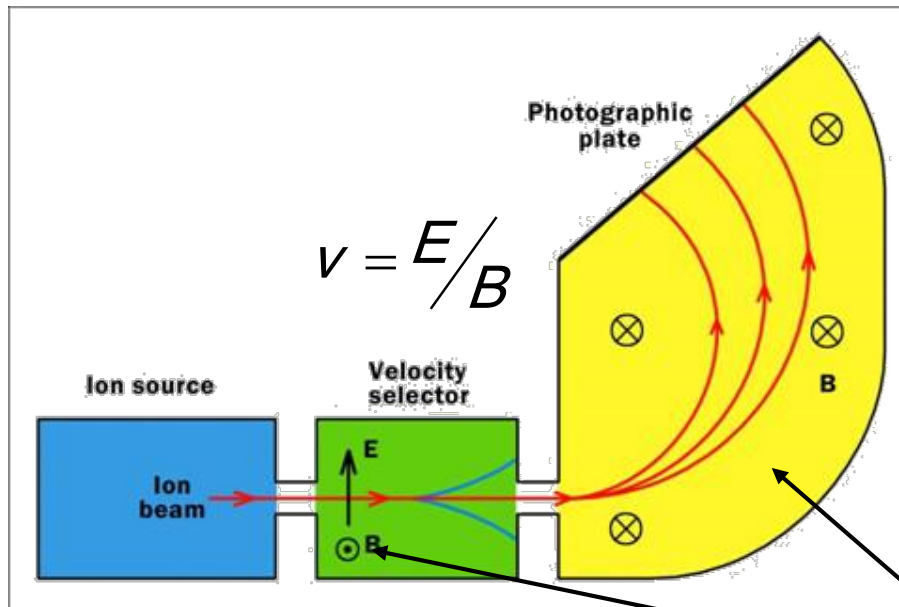
Looks good on paper, but ...

Abb. VIII.7c



Abb. IX.1 Massen-Spektrometer: Prinzip

Gekreuztes E und B-Feld:
Geschwindigkeitsselektion

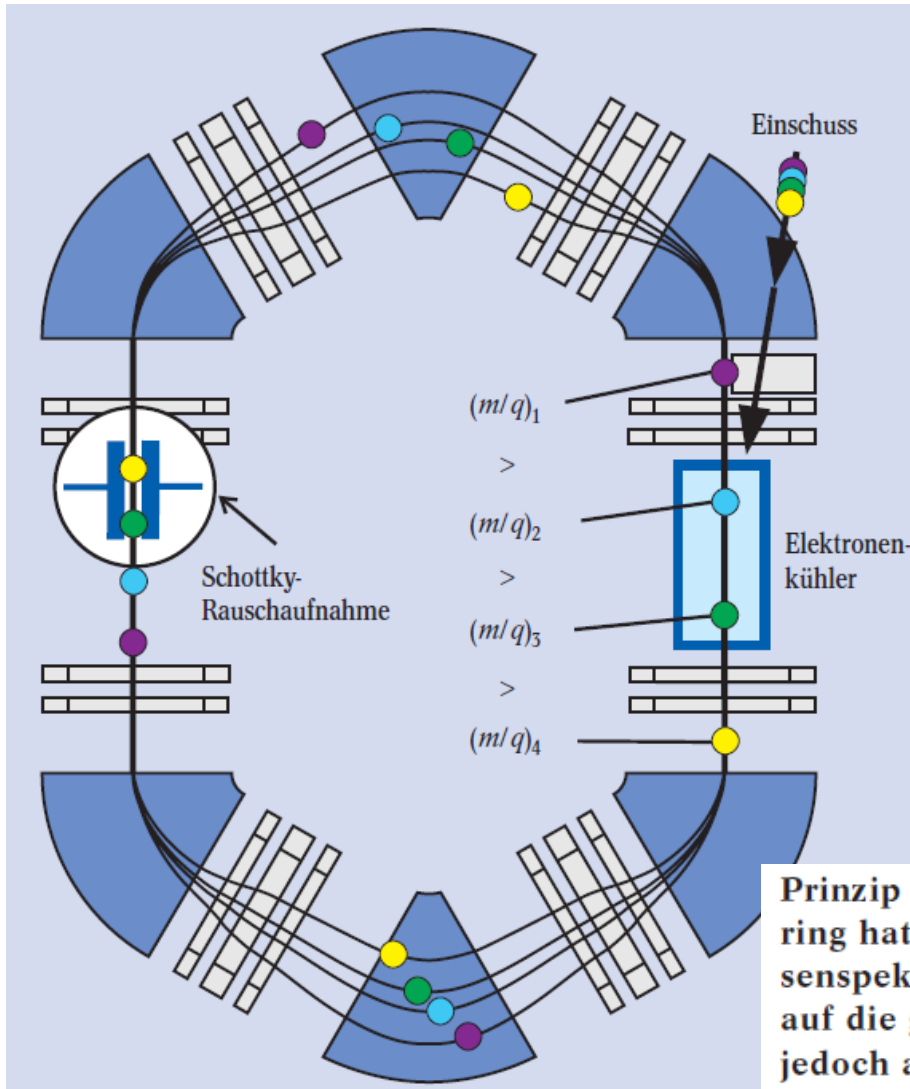


$$p = mv = qRB$$

$$m = qR \frac{B}{v} = qR \frac{B^2}{E}$$

Gleiches B-Feld

Abb. IX.2 Massen-Spektrometrie im Speicherring



$$f_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{qB}{m} \quad \text{Umlauffrequenz abhängig von Masse}$$

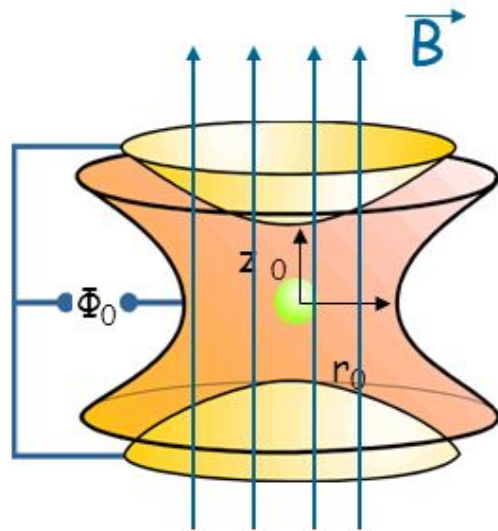
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{\gamma_t^2} \frac{\Delta(m/q)}{m/q} + \frac{\Delta v}{v} \left(1 - \frac{\gamma^2}{\gamma_t^2} \right)$$

← Ionenoptischer Parameter des Speicherrings

$$\frac{\Delta v}{v} \rightarrow 0$$

Prinzip der Schottky-Speicherring-Messmethode. Der Speicherring hat einen Umfang von etwa 110 m. Bei der Schottky-Massenspektrometrie werden alle Ionen mittels Elektronenkühlung auf die gleiche Geschwindigkeit gebracht, sie bewegen sich jedoch aufgrund ihres unterschiedlichen Masse-Ladungs-Verhältnisses (m/q) auf verschiedenen langen Flugbahnen.

Abb. IX.3 Massen-Spektrometrie mit Penning-Fallen



Axial motion:

oscillation in E-field

$$\omega_z = \sqrt{\frac{qV_0}{md^2}}$$

Magnetron motion:

$\vec{E} \times \vec{B}$ drift

$$\omega_- = \frac{\omega_c}{2} - \sqrt{\frac{\omega_c^2}{4} - \frac{\omega_z^2}{2}}$$

Reduced cyclotron motion:

$$\omega_+ = \frac{\omega_c}{2} + \sqrt{\frac{\omega_c^2}{4} - \frac{\omega_z^2}{2}}$$

Relevant for mass measurements:

$$\omega_c = \omega_+ + \omega_- = \frac{q}{m} B$$

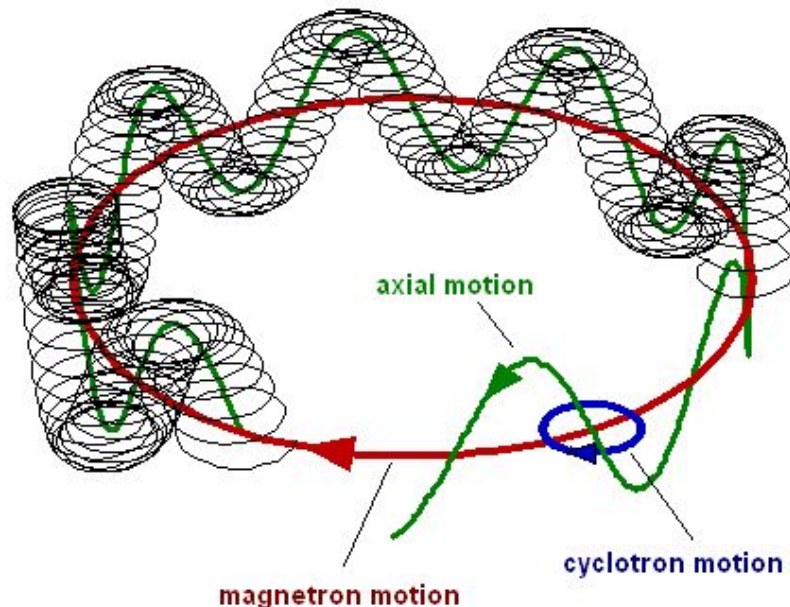


Abb. IX.4 Bindungsenergie

$$B / A = (Zm_p + Nm_n - m(A, Z)) / A \quad m(A, Z) = \text{Kernmasse}$$

(Falls man $m(A, Z)$ die Atommasse ist muss auch noch m_e und E_e berücksichtigt werden)

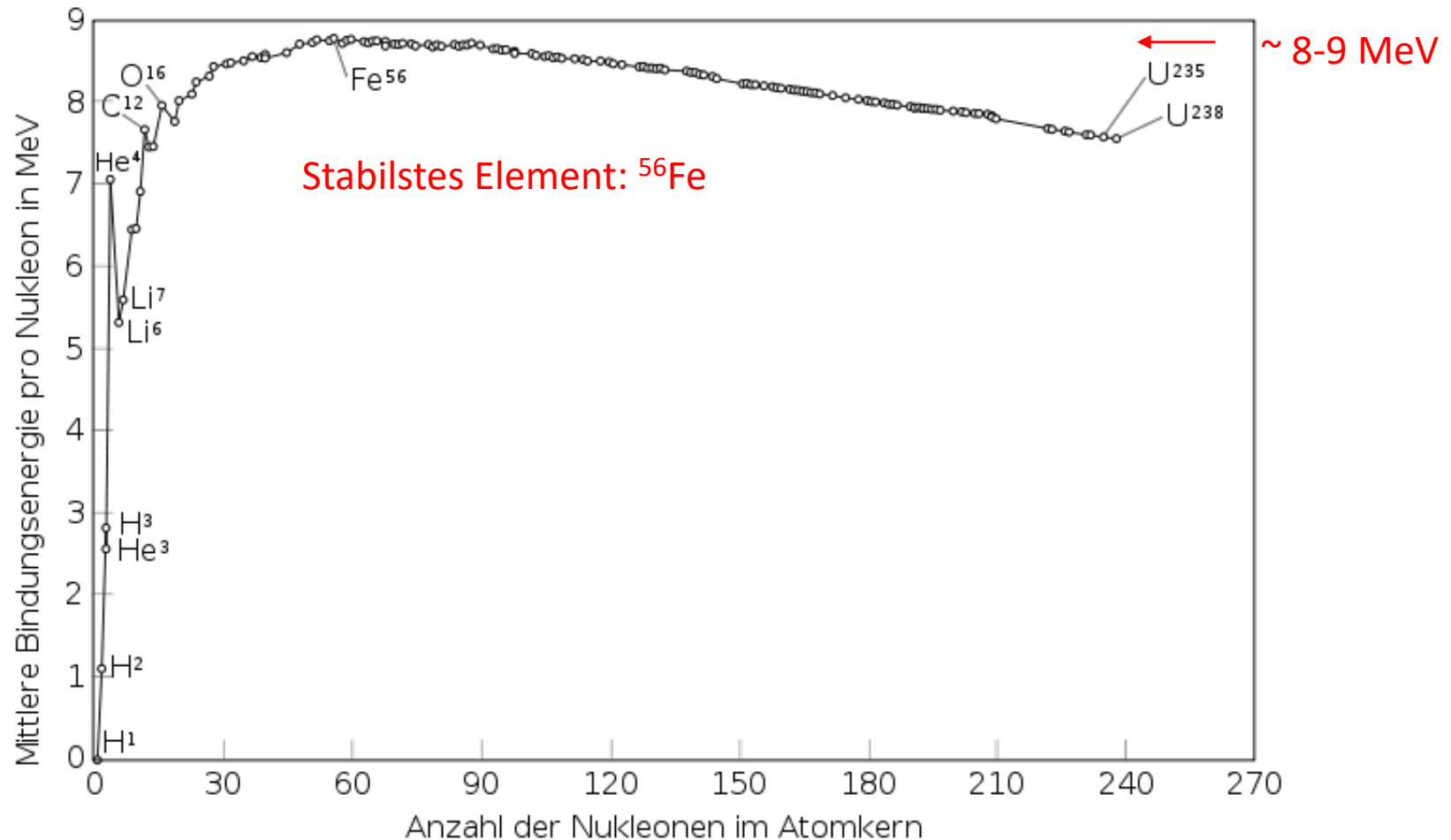


Abb IX.5 Bethe-Weizsäcker-Formel

$$B = a_V A - a_O A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{Asym} \frac{(N - Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

$$a_V \approx 15.67 \text{ MeV}$$

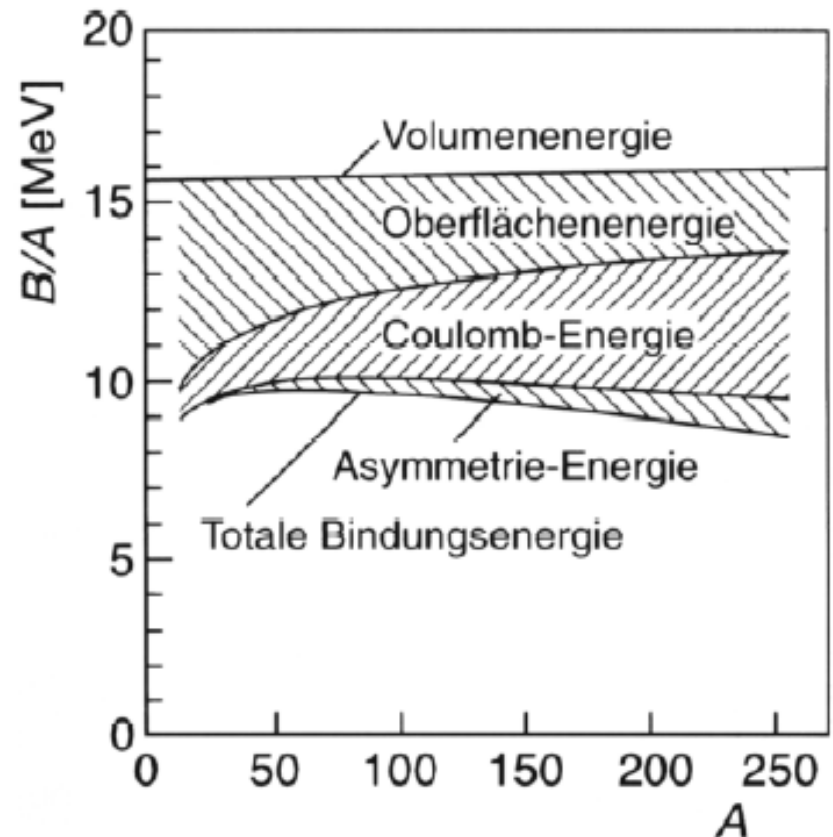
$$a_O \approx 17.23 \text{ MeV}$$

$$a_C \approx 0.71 \text{ MeV}$$

$$a_{Asym} \approx 23.3 \text{ MeV}$$

s.a. Povh

$$\delta = \begin{cases} +11.2 \text{ MeV} & \text{gg - Kerne} \\ 0 \text{ MeV} & \text{ug - Kerne} \\ -11.2 \text{ MeV} & \text{uu - Kerne} \end{cases}$$



Erlaubt die Berechnung des Q-Wertes von radioaktiven Zerfällen / Spaltungs- und Fusions-Prozessen