Physikalisches Praktikum für Anfänger - Teil 1
Gruppe 3 - Atomphysik

3.3 Das Beta-Spektrometer

1 Methode und Theorie

Bei diesem Versuch zum β-*Zerfall* wird im Gegensatz zu den übrigen Versuchen dieses Praktikums, bei denen Prozesse in der Elektronenhülle der Atome untersucht werden, die Auswirkung der schwachen Wechselwirkung im Kern des Atoms betrachtet.
Die meisten radioaktiven Elemente sind β-Strahler, d.h. sie senden energiereiche Elektronen aus. Das Elektron wird bei der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton aus dem Kern emittiert. Diese Kernumwandlung bezeichnet man als β^--*Zerfall*, der nach folgender Reaktionsgleichung verläuft:

$$n \quad \rightarrow \quad p^+ + e^- + \bar{\nu}_\mathrm{e} \tag{1}$$

Dabei bedeuten: n Neutron, p^+ Proton, e^- Elektron und $\bar{\nu}_\mathrm{e}$ Antineutrino.
Daneben existieren noch zwei weitere β-Zerfallsarten, der *K-Einfang* und der β^+-*Zerfall*, die in den gängigen Lehrbüchern der Atom- bzw. Kernphysik beschrieben werden.
Die Spektren von α- und γ-Strahlern unterscheiden sich deutlich von denen der β-Strahler. α- und γ-Strahler emittieren Strahlung mit einem oder einigen wenigen, diskreten Energiewerten. β-Strahler senden dagegen ein kontinuierliches Energiespektrum aus, angefangen von beliebig kleinen Energien bis zu einer für diesen speziellen Zerfall charakteristischen Grenzenergie. Ist dem kontinuierlichen β-Spektrum noch ein diskretes Spektrum überlagert, so handelt es sich hierbei um sogenannte Konversionselektronen, die durch die Wechselwirkung des angeregten Kerns mit den Elektronen der unteren K-Schale in Konkurrenz zur Emission eines γ-Quants ausgesandt werden. Die Energiezustände der Kerne vor und nach β-Emission sind unabhängig von der Energie des emittierten Elektrons. Da ferner das ausgesandte Elektron einen Spin besitzt und der Gesamtdrehimpuls eine Erhaltungsgröße darstellt, wurde von Pauli die Existenz des Neutrinos vorgeschlagen, welches ebenso wie das Elektron einen halbzahligen Spin besitzt. Die Gesamtenergie ist gleich der oberen Grenzenergie der Elektronen (Grenzenergie des Spektrums), sie verteilt sich auf das Neutrino und das β-Teilchen.

2 Versuchsaufbau

Die Impulsverteilung der β-Strahlung eines radioaktiven Präparates wird mit einem Halbkreis-β-Spektrometer (siehe Abb. 1) bestimmt:
Die von dem Präparat PR ausgesandte Beta-Strahlung wird in einem Messingkasten durch einen Spalt E und eine Blende B zu einem schwach divergierenden Elektronenstrahl geformt. Unter dem Einfluss des senkrecht zur Zeichenebene wirkenden homogenen Magnetfeldes werden die Elektronen durch die Lorentzkraft auf Kreisbahnen abgelenkt. Die Radien sind dabei abhängig von der Geschwindigkeit, bzw. dem Impuls der Elektronen und der Magbetfeldstärke.

$$r = \frac{p}{e_0 \cdot B} \tag{2}$$

p = Impuls des Elektrons
B = magnetische Induktion, Umrechnung: $1\,\mathrm{T} \equiv 1\,\mathrm{Vs/m^2}$
e_0 = Elementarladung

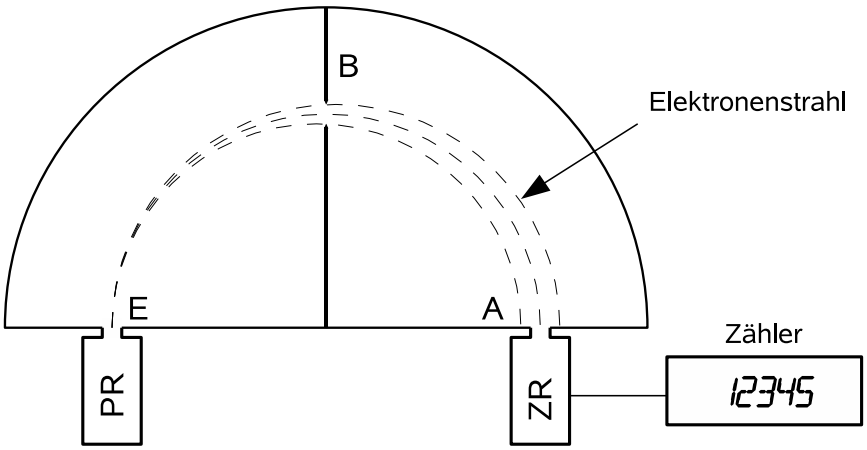

Abbildung 1: Skizze des β-Spektrometers

Nach dem Durchlaufen eines Halbkreises findet für Elektronen gleicher Geschwindigkeit eine Fokussierung statt. Durch einen Austrittsspalt A gelangen die Elektronen in das Zählrohr ZR und werden anschließend vom Zähler registriert. Verändert man nun die Stromstärke durch den Elektromagneten und damit das Magnetfeld, so gelangen nur diejenigen Elektronen zum Zählrohr, deren Geschwindigkeit so groß ist, dass ihr Ablenkradius genau der halbe Abstand zwischen Eintritts- und Austrittsspalt beträgt. Die Intensität liest man am Zähler ab. Die Feldstärke wird aus der Stromstärke mittels der Hysteresekurve (siehe Abb. 2) bestimmt.

3 Durchführung

1. Da β-Strahlung in Luft nur eine geringe Reichweite besitzt, wird die Messapparatur zu Beginn des Versuchs mittels einer Vakuumpumpe evakuiert. Ermitteln Sie, während das Spektrometer ausgepumpt wird, bei eingeschaltetem Netzgerät ($I = 0\,\mathrm{A}$) die Nullrate des Zählrohres über einen Zeitraum von 10 min.

2. Schalten Sie erneut die Pumpe ein, um die Anlage noch einmal vollständig zu evakuieren. Messen Sie danach die Zählrate für jeweils eine Minute bei ansteigenden Stromstärken I durch den Elektromagneten ($0,00\,\mathrm{A}$ bis $1,60\,\mathrm{A}$ in Schritten von $0,1\,\mathrm{A}$). Die Werte sind **nicht** um die Nullrate zu korrigieren!
   Um den Punkt genau zu bestimmen, bei dem gerade noch Elektronen zu registrieren sind (Zählrate = Nullrate), muss im Bereich hoher Feldstärken ($I = 1,1\,\mathrm{A}$ ... $1,3\,\mathrm{A}$) der Abstand der Messpunkte verringert werden ($\Delta I = 0,05\,\mathrm{A}$).

3. Messen Sie dann die Zählraten noch einmal bei rückläufigen Stromstärken von $1,60\,\mathrm{A}$ nach $0,00\,\mathrm{A}$.

4. Die zu den jeweiligen Stromstärken I gehörenden Magnetfeldstärken B entnehmen Sie aus Abbildung 2. Beachten Sie bei der Auswertung die Hysterese!

5. Tragen Sie die nicht um die Nullrate korrigierten Zählraten gegen die magnetische Induktion B auf. Zur Bestimmung der maximalen magnetischen Induktion B mit Zählrate = Nullrate wird dann die Nullrate in das Diagramm eingetragen. Bestimmen Sie den Schnittpunkt mit der Zählratenmessung. Sie erhalten ein genaueres Ergebnis, wenn Sie nach Ende der Messung die Nullrate ein zweites mal bestimmen und den Mittelwert der beiden Nullraten verwenden.

6. Berechnen Sie mit Hilfe von Gleichung (2) den maximalen Impuls der Elektronen. Bestätigen Sie, dass es sich um relativistische Elektronen handelt, indem Sie aus dem klassischen Impuls mit der Ruhemasse die Geschwindigkeit berechnen. Berechnen Sie danach $\beta = v/c$, bzw. v aus der relativistischen Beziehung

$$\begin{aligned} p &= \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1-\beta^2}} \\ &= \gamma \cdot m_0 \cdot v \qquad (\gamma = \text{Lorentz-Faktor}) \end{aligned} \tag{3}$$

und daraus dann die Gesamtenergie

$$W_{\text{ges}} = \gamma \cdot m_0 \cdot c^2 \qquad (\text{in MeV}) \,, \tag{4}$$

die kinetische Energie

$$W_{\text{kin}} = W_{\text{ges}} - m_0 \cdot c^2 \qquad (\text{in MeV}) \tag{5}$$

und die Masse

$$m = \gamma \cdot m_0 \quad . \tag{6}$$

Vergleichen Sie die Masse mit der Ruhemasse der Elektronen.

Hinweise:

- Der Abstand Präparat–Zählrohrfenster beträgt 100 mm.
- Das Präparat bitte nicht aus dem Spektrometer nehmen. Denken Sie an das Induktionsgesetz und stellen Sie den Strom langsam auf 0, bevor Sie ihn ausschalten!

Literatur: Gehrtsen Physik: Kap. 18.2.

11.2010/Ra

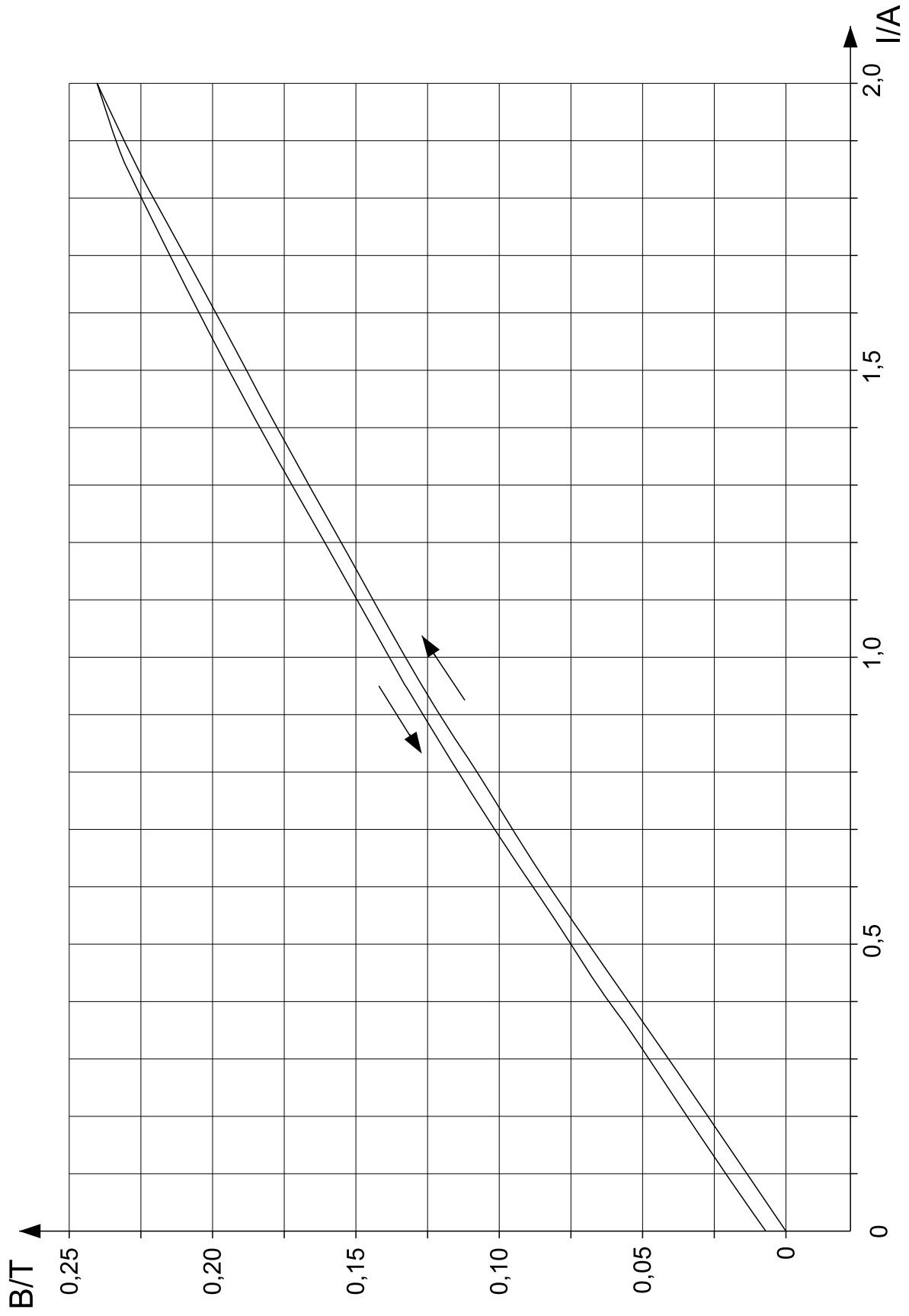

Abbildung 2: Magnetische Induktion B in Abhängigkeit des Spulenstroms I