

Versuch B15: β -Spektroskopie

1. Literatur: Walcher, Praktikum der Physik
Gerthsen/Kneser/Vogel, Physik
Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik,
Bd. IV,2: Aufbau der Materie
Schpolksi, Atomphysik, Bd. I u. II

Stichworte: Kernumwandlungen, Radioaktivität, α -, β -Zerfall, Aktivität, Zerfallsgesetz, Nachweis radioaktiver Strahlung durch Ionisation, Geiger-Müller-Zählrohr

2. Grundlagen

2.1 Kernumwandlung und radioaktiver Zerfall

Bei einer Kernumwandlung geht der Atomkern eines Nuklids X^A_Z (Atomart mit Massen- bzw. Nukleonenzahl A, ($A = Z$ Protonen + N Neutronen) in den Atomkern eines anderen Nuklids oder in mehrere Atomkerne verschiedener Nuklide über. Die Umwandlung kann spontan oder erzwungen (z.B. durch Teilchenbeschuss) erfolgen. Die spontane Kernumwandlung eines instabilen Nuklids ist im Allg. mit der Emission eines energiereichen ionisierenden Teilchens verbunden.

Die wichtigsten spontanen Kernumwandlungen sind der α - und der β -Zerfall: Beim α -Zerfall wird ein α -Teilchen (He-Atomkern) emittiert, beim β^+ -Zerfall ein β^+ -Teilchen (Positron bzw. Elektron) zusammen mit einem Neutrino ν_e bzw. Antineutrino $\bar{\nu}_e$. Befindet sich der bei der Umwandlung entstehende Atomkern nicht im Grundzustand, kann er durch γ -Zerfall in diesen übergehen und gibt dabei seinen Energieüberschuss in Form von γ -Strahlung (energiereichen Photonen) ab.

Man spricht bei einer spontanen Kernumwandlung wegen der ionisierenden Wirkung der emittierten Teilchen auch von einer *radioaktiven Kernumwandlung* bzw. von einem *radioaktiven Zerfall*. Die verschiedenen Zerfallstypen zeigt Abb. 1 in einem Energieschema.

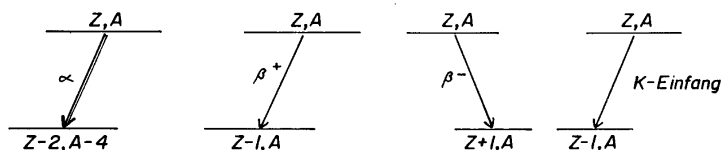


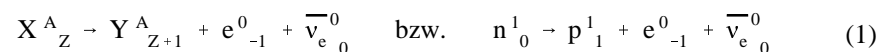
Abb.1: Spontane Kernumwandlungen, schematisch

Kenntnisse über Grundlagen zum radioaktiven Zerfall (Zerfallstypen, Zerfallsgesetz, Aktivität, Zerfallskonstante, mittlere Lebensdauer, Halbwertszeit, sowie Reichweite, Ionisationsvermögen und Nachweis radioaktiver Strahlung werden hier vorausgesetzt. Es wird auf die z.B. angegebene Literatur sowie die Versuchsanleitungen *B12: Geschwindigkeit von α -Teilchen* sowie *B13: Radioaktiver Zerfall* verwiesen.

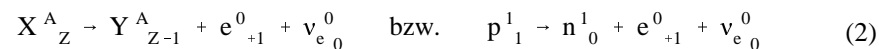
2.2 β -Zerfall

Beim β -Zerfall wandelt sich ein Nuklid mit der Kernladungszahl Z - bei gleichbleibender Massenzahl A - in ein Nuklid mit der Kernladungszahl Z + 1 bzw. Z - 1 um. Man unterscheidet drei verschiedene Kernumwandlungen: den β^- -Zerfall, den β^+ -Zerfall und den K-(Elektronen)-Einfang.

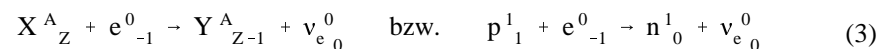
Beim β^- -Zerfall wandelt sich das Nuklid X^A_Z in das Nuklid Y^A_{Z+1} um. Es wird im Atomkern ein Neutron (n^1_0) in ein Proton (p^1_1) umgewandelt. Unter Erhaltung der elektrischen Ladung wird ein Elektron (e^0_{-1}) und unter Erhaltung der Leptonenzahl¹⁾ ein (nahezu masseloses) Elektron-Antineutrino ($\bar{\nu}_e^0_0$) emittiert.



Beim β^+ -Zerfall wandelt sich das Nuklid X^A_Z in das Nuklid Y^A_{Z-1} um. Es wird im Atomkern ein Proton (p^1_1) in ein Neutron (n^1_0) umgewandelt. Unter Erhaltung von elektrischer Ladung und Leptonenzahl werden ein Positron (e^0_{+1}) und ein (nahezu masseloses) Elektron-Neutrino ($\nu_e^0_0$) emittiert. Die Atomhülle gibt ein überschüssiges Elektron ab.



Beim K-Einfang wandelt sich ebenfalls das Nuklid X^A_Z in das Nuklid Y^A_{Z-1} um, d.h. es wird im Atomkern ebenfalls ein Proton (p^1_1) in ein Neutron (n^1_0) umgewandelt, wobei jedoch anstelle der Emission eines Positrons die Absorption eines Elektrons (vorzugsweise aus der kernnahen K-Schale des Atoms) stattfindet.



1) Leptonen sind das Elektron e, das Myon μ , die Neutrinos ν_e , ν_μ und ihre Antiteilchen

2.3 β -Energiespektrum

Die beim β -Zerfall instabiler Nuklide freigesetzte Energie verteilt sich auf die kinetische Energie der β^\pm -Teilchen und der Neutrinos ν_e bzw. $\bar{\nu}_e$. Man beobachtet ein kontinuierliches Spektrum der kinetischen Energie der emittierten β^\pm -Teilchen.

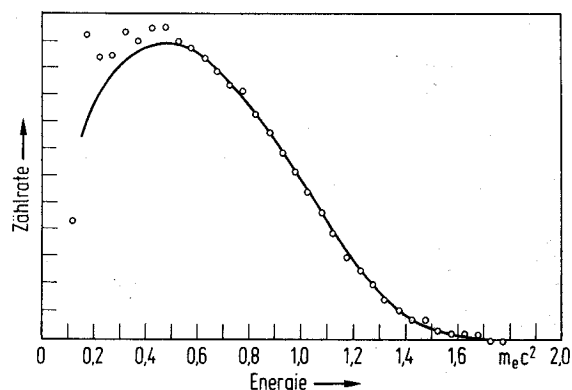


Abb.2: Energiespektrum der beim β -Zerfall freier Neutronen emittierten Elektronen

Abb.2 zeigt beispielhaft ein Messergebnis zur Zählrate der beim β -Zerfall freier Neutronen emittierten Elektronen in Abhängigkeit ihrer kinetischen Energie. Diese ist in Einheiten ihrer Ruhenergie ($E_0 = m_0 c^2 = 511 \text{ keV}$) aufgetragen. Die maximale kin. Energie E_{max} , d.h. die freigesetzte Energie, ergibt sich hier theoretisch aus der beim β -Zerfall, Gl.(1), auftretenden Massendifferenz (unter Vernachlässigung des Antineutrinos) zu

$$E_{\text{max}} = \frac{m_n - m_p - m_0}{m_0} E_0 = 1,531 E_0 \quad (4)$$

Diese stimmt mit dem experimentellen Ergebnis überein. Des weiteren beobachtet man beim Energiespektrum des β -Zerfalls ein Maximum der Zählrate, welches allgemein bei etwa $1/3 E_{\text{max}}$ liegt.²⁾

2) Eine genauere Betrachtung zeigt unterschiedliche Spektren von β^+ - und β^- -Zerfall aufgrund der unterschiedlichen Wechselwirkung zwischen dem Coulombfeld des Kerns und der unterschiedlich geladenen β -Teilchen.

Darüber hinaus können im Energiespektrum der β -Teilchen bei diskreten Energien die Linien sog. *Konversionselektronen* aus der Atomhülle auftreten, welche durch direkte Übertragung der Anregungsenergie des Kernzustandes freigesetzt werden. Ebenso können Linien sog. *Augerolektronen*, d.h. freigesetzter Atomhüllenelektronen infolge der Absorption der beim K-Einfang emittierten charakteristischen Röntgenstrahlung auftreten (s. auch Versuch B10: *Versuch mit Röntgenstrahlen*).

2.4 β -Spektrometer

Die kinetische Energie der β -Teilchen wird oft magnetisch bestimmt, so auch im vorliegenden Versuch. Die Teilchen durchlaufen in einem sog. *Impulsfilter* z.B. ein zu ihrer Geschwindigkeit transversales homogenes Magnetfeld B , wodurch ihre Bahn infolge der Lorentzkraft einen Kreisbogen beschreibt. Aufgrund mehrerer geeignet angebrachter Spalte passieren nur solche Teilchen das Filter, deren Kreisbahn einen bestimmten Radius r ($\pm \Delta r$) hat (s.u. Versuchsaufbau).

In dieser Kreisbahn ist die wirkende Zentripetalkraft $F = m v^2/r$ gleich der Lorentzkraft $F_L = e v B$ und damit der Impuls $p = m v$ der Teilchen

$$p = m v = e B r \quad (5)$$

Die Gesamtenergie E der β -Teilchen ist relativistisch gerechnet

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (6)$$

Ihre kinetische Energie E_k ergibt sich aus der Differenz von Gesamtenergie E und Ruhenergie E_0 mit Gl.(5) zu

$$E_k = E_0 \left(\sqrt{\left(\frac{e B r}{m_0 c} \right)^2 + 1} - 1 \right) \quad (7)$$

Das im Versuch benutzte Spektrometer hat einen Kreisbahnradius $r = 5 \text{ cm}$. Damit ergibt sich numerisch der Zusammenhang zwischen E_k und B :

$$E_k = 511 \left[\left(\left(8,59 \times 10^{-4} (\text{B/mT})^2 + 1 \right)^{1/2} - 1 \right) \right] \text{keV} \quad (7a)$$

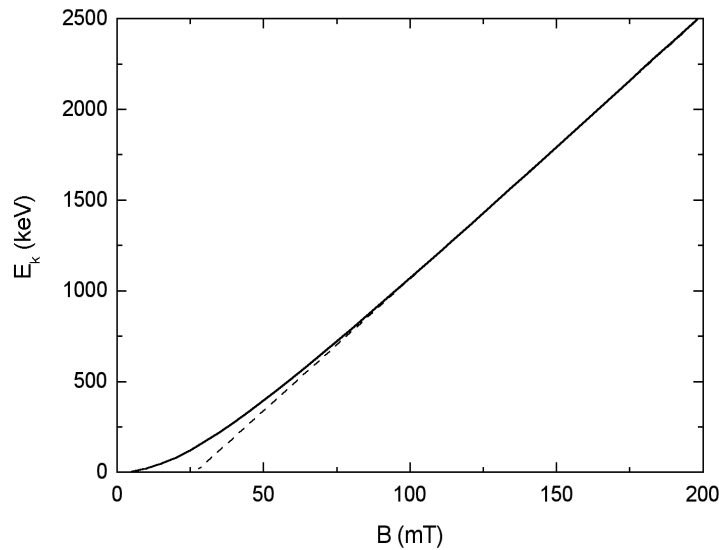


Abb.3: Kinetische Energie E_k der transmittierten β -Teilchen als Funktion der magn.Induktion B des im Versuch benutzten Spektrometers

Abb.3 zeigt den Zusammenhang $E_k(B)$ für das im Versuch benutzte Spektrometer. Für Energien E_k oberhalb der Ruhenergie E_0 ist E_k nahezu linear von B abhängig.

2.5 β -Zerfall von ^{22}Na und ^{90}Sr

Die Zerfallsdiagramme der im Versuch benutzten Nuklide ^{22}Na und ^{90}Sr sind in Abb. 4 schematisch dargestellt. ^{22}Na zerfällt mit einer Halbwertszeit von 2,6 Jahren zu 90,49% unter β_1^+ -Emission (546 keV) und zu 9,46% unter Elektroneinfang in einen angeregten Zustand des Nuklids ^{22}Ne , der unter γ -Emission (1275 keV) in den Grundzustand übergeht. Ein geringer (0,05%) und im Versuch nicht festzustellender Anteil des ^{22}Na zerfällt unter β_2^+ -Emission (1820 keV) direkt in den Grundzustand von ^{22}Ne .

^{90}Sr zerfällt mit einer Halbwertszeit von 28,5 Jahren unter β_1^- -Emission (546 keV) in das instabile Nuklid ^{90}Y , welches mit einer Halbwertszeit von 64,1 Stunden hauptsächlich (99,98%) unter β_2^- -Emission (2274 keV) in den Grundzustand von ^{90}Zr zerfällt. Ein geringer, hier nicht messbarer Teil (0,02%) zerfällt unter β_3^- -Emission (513 keV) in einen angeregten Zustand des ^{90}Zr und nachfolgend unter γ -Emission (1761 keV) in dessen Grundzustand.

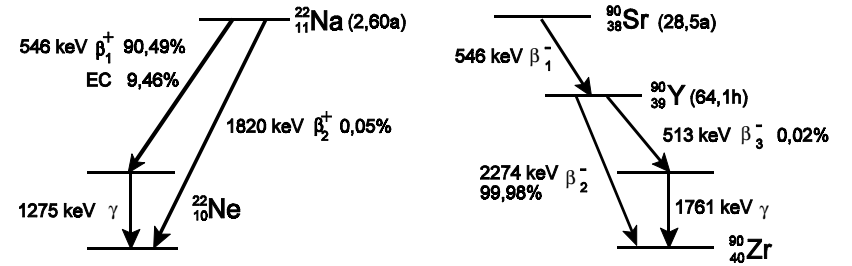


Abb.4: links: β^+ -Zerfallsschema von ^{22}Na , rechts: β^- -Zerfallsschema von ^{90}Sr

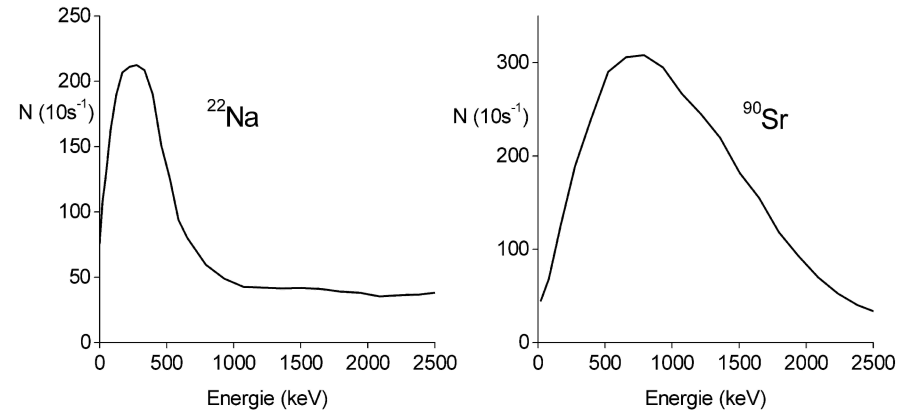


Abb.5: β -Spektren von ^{22}Na und ^{90}Sr , schematisch

Abb. 5 zeigt schematisch die Energiespektren der beiden im Versuch benutzten Radionuklide. Das ^{22}Na -Spektrum hat ein Maximum bei ca. 250 keV entsprechend einer maximalen kinetischen Energie von ca. 750 keV, etwas größer als die im Zerfallsschema maximale Energie des β_1^+ -Teilchens. Der energieunabhängige Untergrund des Spektrums rührt von der γ -Strahlung her, zum einen von der 1275 keV-Linie, zum anderen von der Vernichtungsstrahlung (511 keV), welche emittiert wird, wenn das Positron auf ein Elektron trifft.

Das Spektrum von ^{90}Sr hat ein Maximum bei ca. 750 keV, entsprechend einer maximalen kinetischen Energie von ca. 2250 keV, in Übereinstimmung mit der

Maximalenergie des β_2 -Teilchens. Ein weiteres Maximum im Energiespektrum des ^{90}Sr infolge des β_1 -Teilchens ist nicht zu erkennen. Da die Emission des β_3 -Teilchens und der 1761 keV γ -Strahlung sehr unwahrscheinlich ist, stellt das Nuklid ^{90}Sr einen praktisch reinen β -Strahler dar.

3. Aufgabenstellung

1. **Aufgabe:** Bestimmen Sie mit dem β -Spektrometer die Impulsrate N infolge der von dem Nuklid ^{90}Sr emittierten Strahlung als Funktion des Magnetfeldes B .
2. **Aufgabe:** Bestimmen Sie mit dem β -Spektrometer die Impulsrate N infolge der von dem Nuklid ^{22}Na emittierten Strahlung als Funktion des Magnetfeldes B .
3. **Aufgabe:** Bestimmen Sie aus den in der 1. und 2. Aufgabe ermittelten Zählraten $N(B)$ die Zählraten $N(E)$ als Funktion der kinetischen Energie (Energiespektren)

4. Versuchsaufbau

Abb.6 zeigt den Versuchsaufbau schematisch. Das Spektrometer SP besteht aus zwei flachen vertikal gegenüberliegenden Polschuhen, die oben und unten über einen Transformator-Eisenkern mit aufgesteckter Spule magnetisch verbunden

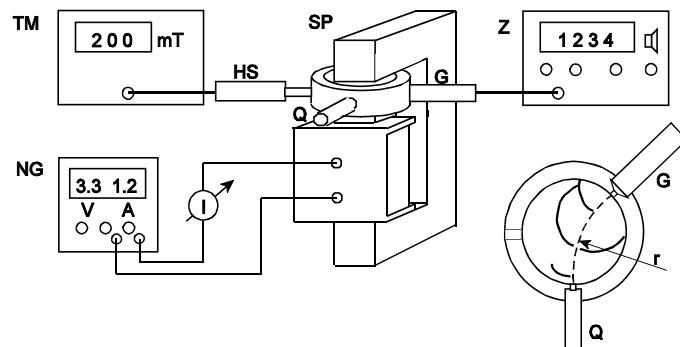


Abb.6: Versuchsaufbau schematisch, mit β -Spektrometer SP, Strahlungsquelle Q, Geiger-Müller-Zählrohr G, Zählgerät Z, Hallsonde HS, Teslameter TM, Netzgerät NG, Amperemeter I; rechts das Spektrometer im Schnitt auf Teilchenbahnhöhe (Radius r)

sind. Die Anordnung stellt einen Elektromagneten mit Luftspalt dar. Das nahezu homogene Magnetfeld B im Spalt zwischen den Polschuhen kann durch Verändern des Spulenstroms I , welchen das Netzgerät NG liefert, verändert werden. Es wird mit einer in den Spalt hineinragenden Hallsonde HS gemessen und vom Teslameter angezeigt. Am Rande des Spaltes sind mittels eines nichtmagnetischen Metallrings die Strahlungsquelle Q und das Geiger-Müller-Zählrohr so gegenüber angebracht, dass die von Q emittierten β -Teilchen nur über eine Kreisbogenbahn mit Radius r ($= 5\text{cm}$) in das Zählrohr gelangen und vom Zählgerät registriert werden. Im Spalt angebrachte Blenden begrenzen die Kreisbahn auf einen Radiusbereich $\Delta r \ll r$ und damit den Durchlassbereich $\Delta p \ll p$ des Teilchenimpulses, s. Gl. (5).

5. Versuchsdurchführung

5.1 Zählrate von ^{22}Na

Nach Anschließen und Einschalten aller Geräte ist zunächst die vom Zählrohr registrierte Untergrundstrahlung N_0 zu bestimmen. Das Zeitfenster des Zählgerätes ist auf 10 s einzustellen. Gegebenenfalls kann der Lautsprecher eingeschaltet werden, um die registrierten Impulse hörbar zu machen. Nach Drücken der Start/Stopptaste des Zählers werden die Impulse im Zeitfenster von 10 s gezählt, danach bleibt die Anzeige stehen. Durch Drücken der Reset-Taste und erneutes Starten kann die Messung wiederholt werden.

Bestimmen Sie die Rate N_0 jeweils fünfmal bei eingestellten Magnetfeldern von ca. 10, 100 und 200 mT. Der Mittelwert von N_0 ist später in der Auswertung von allen Raten der Präparate abzuziehen.

Danach ist das ^{22}Na -Präparat **nur vom studentischen Betreuer** aus dem Aufbewahrungsschrank zu holen, aus der Abschirmung zu nehmen und in das Spektrometer einzubauen. Variieren Sie darauf bei eingeschaltetem Lautsprecher den Spulenstrom und damit das Magnetfeld zwischen ca. 10 und 200 mT und ermitteln Sie probeweise bei einigen Magnetfeldern die Zählrate. Gegebenenfalls ist das Magnetfeld durch Vertauschen der Spulenzuleitungen umzupolen.

Bei der Durchführung der eigentlichen Messungen ist das Magnetfeld B von 10 mT bis 200 mT in Schritten von 10 mT zu erhöhen und für jedes Feld die Zählrate N jeweils fünfmal zu bestimmen. Danach ist das Präparat sofort **vom Betreuer** aus dem Spektrometer herauszunehmen, in die Abschirmung zu stecken und in den Schrank zurückzulegen.

5.2 Zählrate von ^{90}Sr

Nach Umpolen der Spulenanschlüsse (warum?) und Einbau des ^{90}Sr -Präparats

durch den Betreuer ist die Messung analog zur der von ^{22}Na durchzuführen, nach der Messung das Präparat unverzüglich **vom Betreuer** in den Schrank zurückzulegen.

6. Versuchsauswertung und Diskussion

In der Auswertung der Messungen ist für jedes Feld B jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung s von N zu berechnen, ebenso mit Gl. (7a) die dem Feld entsprechende kinetische Energie E_k . Tragen Sie $N - N_0$ mit Fehlerbalken $\pm s$ über der kinetischen Energie E_k für die Nuklide ^{22}Na und ^{90}Sr auf.

Diskutieren Sie Ihr Ergebnis im Zusammenhang mit den Zerfallsschemata für ^{22}Na und ^{90}Sr . Bestimmen Sie dazu die Energie des Maximums der Zählrate des jeweiligen Nuklids und den Fehler anhand der Fehlerbalken der Raten und vergleichen Sie diese Energie mit der ermittelten maximalen kinetischen Energie bzw. den in den Zerfallsschemata aufgeführten maximalen Energien der β -Teilchen.

Anmerkungen zu Korrekturen:

Bei einer genaueren, kritischen Betrachtung der in diesem Versuch ermittelten Zählraten $N(E_k)$ ist für eine weiterführende Diskussion im Vergleich mit Literaturdaten zur Wahrscheinlichkeit $w(E_k)$ der im jeweiligen β^\pm -Zerfall auftretenden Energien der emittierten β -Teilchen u. a. Folgendes zu berücksichtigen:

a) Das hier zur Bestimmung der Zählrate $N(B)$ bzw. $N(p)$ benutzte Messintervall ΔB bzw. Δp ist bei einem durch die Konstruktion des Spektrometers vorgegebenen Radiusbereich Δr bzw. bei einer im Bereich der Teilchenbahnen vorgegebenen Feldinhomogenität $\Delta B/B$ nicht für alle Felder konstant sondern steigt \sim mit B an (s. Gl. (5)). Zur Korrektur der Zählrate bezogen auf ein jeweils konstantes Messintervall ΔB wäre entsprechend numerisch eine Division der Zählrate durch eine Zahl $\sim B$ nötig.

b) Das Intervall ΔE_k der berechneten Zählrate $N(E_k(B))$ ist - bezogen auf die Intervalle ΔB bzw. Δp - ebenfalls nicht konstant, sondern ändert sich mit Gl. (7), s. Abb.3, wesentlich bei geringer Energie $E_k \leq E_0$. Zur Korrektur wäre eine weitere Division der Rate $N(E_k)$ durch eine Zahl $\sim dE_k/dB$ nötig.

c) Die Ansprechwahrscheinlichkeit des verwendeten Zählrohrs bezüglich β -Strahlen verschiedener Energien ist a priori nicht bekannt. Sie müsste durch Eichstrahler bestimmt werden. β -Teilchen erzeugen in Luft bei geringer Energie eine größere Ionisationsrate als bei hoher Energie. Es kann daher vermutet

werden, dass das Verhältnis der im vorliegenden Versuch ermittelte Zählraten bei geringer Energie zu denen bei höherer Energie ermittelten größer ist als das der Anzahlraten der β -Teilchen entsprechende.

Während Korrekturen aufgrund a) u. b) eine Erhöhung der in diesem Versuch ermittelten Zählrate der β -Teilchen bei geringer kinetischer Energie bewirken, hat die Korrektur aufgrund c) einen gegenteiligen Effekt. Die Summe der Korrekturen ist ohne Eichmessungen nicht genau zu quantifizieren. Es ist jedoch zu erwarten, dass - bezüglich der wahren Energieverteilung der β -Teilchen - die in diesem Versuch vor allem im Bereich kleiner Energien ($E_k < E_0$) erzielten Messraten verglichen mit denen höherer Energie zu gering sind. Dies könnte bewirken, dass insbesondere das Maximum des Spektrums $N(E_k)$ für ^{22}Na nach Korrektur bei merklich kleinerer Energie liegt und damit in besserer Übereinstimmung mit Literaturdaten steht.

7. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Was wird mit dem Begriff *Radioaktiver Zerfall* beschrieben?
- 2) Welche Arten der Umwandlungen von Atomkernen unterscheidet man beim radioaktiven Zerfall?
- 3) Beschreiben Sie den α -, β - und γ -Zerfall anhand der jeweils emittierten Teilchen.
- 4) Was bewirken die α -, β - bzw. γ -Teilchen in Materie?
- 5) Wie kann man α -, β - und γ -Teilchen nachweisen?
- 6) Beschreiben Sie anhand von Reaktionsgleichungen ($X + \dots \rightarrow Y + \dots$) den β^\pm -Zerfall und K-Einfang hinsichtlich der Kernladungs- und Massenzahl der Nuklide X und Y sowie der jeweils absorbierten bzw. emittierten Teilchen.
- 7) Wie unterscheidet sich das Spektrum der kinetischen Energie der beim α -Zerfall emittierten α -Teilchen von dem der beim β^- - und β^+ Zerfall emittierten β - Teilchen?
- 8) Was bedeutet K-Elektronen-Einfang? Welche Strahlung wird dabei emittiert?
- 9) Beschreiben Sie, wie im vorliegenden Versuch die Verteilung von Impuls p bzw. kinetischer Energie E_k der β -Teilchen ermittelt wird. Was ist daraus zur Bestimmung der Anzahlverteilung der beim β -Zerfall emittierten Teilchen u.a. zu beachten?