

P525 Nukleare Elektronik und Lebensdauermessung

P525.1 Versuchsziel

Ziel dieses Versuches ist die Bestimmung der Lebensdauer eines angeregten Zustandes eines Cäsium-Isotops. Das Lernziel ist die Übung im Umgang mit nuklearer Elektronik und deren Anwendung zur Lebensdauermessung.

P525.2 Notwendige Vorkenntnisse

- Szintillationsspektrometer
 - Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materie
 - Funktionsweise
 - Impulsformen
 - Energieauflösung
 - Zeitauflösung
 - Energiespektrum
- Funktionsweise von ...
 - Signal-Verteiler (Splitter)
 - Verstärker
 - Einkanalanalysator (SCA)
 - Vielkanalanalysator (MCA)
 - Constant Fraction Diskriminator (CFD)
 - Koinzidenzeinheit
 - Gate-Delay-Generator (GDG)
 - Zeit-Pulshöhen-Konverter (TAC)
- Messung von Zerfallszeiten
 - Fast-Slow-Koinzidenzprinzip
 - Prompt- und Zerfallskurven
 - zufällige Koinzidenzen
- Zerfallsschema von ^{22}Na und ^{133}Ba (siehe Abbildung P525.3 auf Seite 9)

P525.3 Literatur

- Aktualisierungen zu dieser Anleitung finden Sie auf der eCampus-Seite zu diesem Versuch unter „Versuchsanleitung“verlinkt.
- Leo: „Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments“
- Hertz: „Lehrbuch der Kernphysik“ (2. Aufl., Hanau, 1966) Bd. 1, S. 559–567, 573–575, 578–579, 582–583
- Schmidt: „Meßelektronik in der Kernphysik“
- Abend/Vogelsang: „Nukleare Elektronik“
- Riezler/Kopitzki: „Kernphysikalisches Praktikum“, S. 75–78
- Siegbahn: „ α -, β - and γ -ray Spectroscopy“ Bd. 1, S. 253–262, 295–302 und Bd. 2, S. 905–921
- Schatz/Weidinger: „Nukleare Festkörperphysik“, S. 98–104

P525.4 Aufgaben

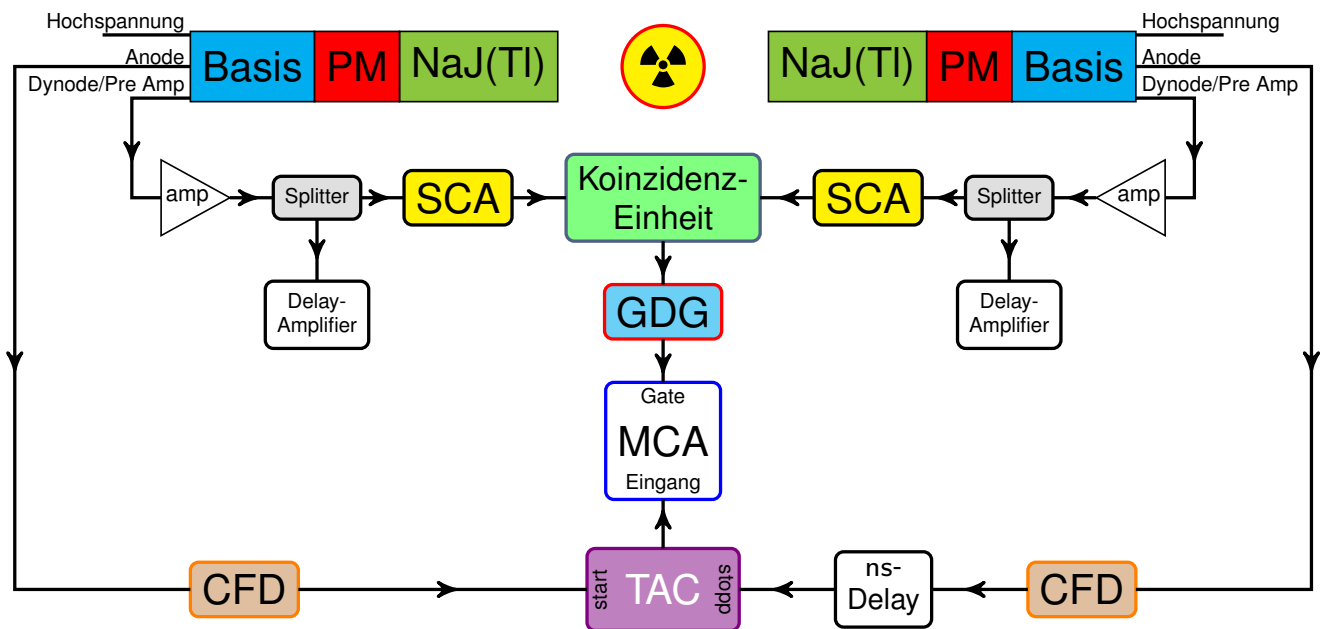


Abbildung P525.1: Schaltplan des Fast-Slow-Koinzidenzkreis

Nach dem in Abbildung P525.1 skizzierten Schaltplan soll eine Versuchsanordnung für Koinzidenzmessungen aufgebaut und optimal eingestellt werden. **Dazu sollen die Signale bei jedem Schritt mit dem Oszilloskop betrachtet, gespeichert und im Versuchsbericht dokumentiert und diskutiert werden.** Eine Anleitung zum Oszilloskop liegt aus. Zudem ist zu **jedem Schritt ein Schaltplan** anzufertigen.

Zur Einstellung und Kalibration des Aufbaus und zur Messung der Zeitauflösung dient ein ^{22}Na -Präparat. Im anschließenden Teil des Versuchs soll die Lebensdauer des $\frac{5}{2}^+$ -Niveaus bei 81 keV im ^{133}Cs bestimmt werden. Schließlich soll die Energieauflösung beider Detektoren bestimmt werden. Die während des Versuchs aufgenommenen Spektren sollen auf einen USB-Stick o.Ä. kopiert und mitgenommen werden. **Bitte ein USB-Speichermedium mitbringen.**

Wichtiger Hinweis: Lassen Sie den USB-Stick während des Versuchs im Oszilloskop stecken und überprüfen Sie am Ende des Tages, ob alle Aufnahmen vorhanden sind. Speichern Sie die Messwerte des Computers auf der Festplatte und **kopieren** Sie diese auf den USB-Stick (belassen Sie die Originaldaten als Sicherungskopie auf dem Computer).

Ein häufiger Wechsel zwischen Oszilloskop und Rechner kann zum Verlust von Daten führen!

Sollten dennoch einzelne Dateien oder Bilder nicht lesbar sein oder fehlen, wenden Sie sich bitte an die Assistentin/den Assistenten! Sollten Probleme oder Unklarheiten bei der Durchführung oder Fragestellung vorliegen, kontaktieren Sie den/die Assistenten/-in.

Lesen Sie die Anleitung vor Versuchsantritt sorgfältig durch, um die Vollständigkeit sicherzustellen. Hier **in der Anleitung gestellte Fragen sind im Versuchsbericht zu beantworten.**

P525.5 Durchführung und Analyse

P525.5.1 Slow-Koinzidenzkreis einstellen

Hochspannung an die Szintillationsspektrometer nur nach Anweisung der Assistentin/des Assistenten anlegen!

Protokollieren Sie die angelegten Hochspannungen und die resultierenden Ströme (Warum?) beider Detektoren in Ihrem Versuchsbericht.

Niedervolt-Versorgungsspannungen kontrollieren

Besprechen Sie mit dem Assistenten/der Assistentin, wie die Niedervolt-Versorgungsspannungen ($\leq \pm 24\text{ V DC}$) der Elektronik-Einschübe an den NIM-Überrahmen kontrolliert werden können.

Welches Messgerät wird hier sinnvollerweise benutzt und warum? Führen Sie die Kontrolle wie besprochen durch und protokollieren Sie die Werte in Ihrem Versuchsbericht. **Führen Sie niemals Messungen an Netzspannungsversorgungen (230 V) durch!**

Slow-Pulse des Photomultipliers kontrollieren

Oszilloskopieren Sie das Slow-Signal des Photomultipliers, sowie das Ausgangssignal des Hauptverstärkers (gleichzeitig). Speichern Sie die Signale und skizzieren Sie deren wesentliche Eigenschaften für die spätere Diskussion. (*Was sind die wesentlichen Eigenschaften und wie unterscheiden sich die Signale?*)

Triggerung mit dem SCA

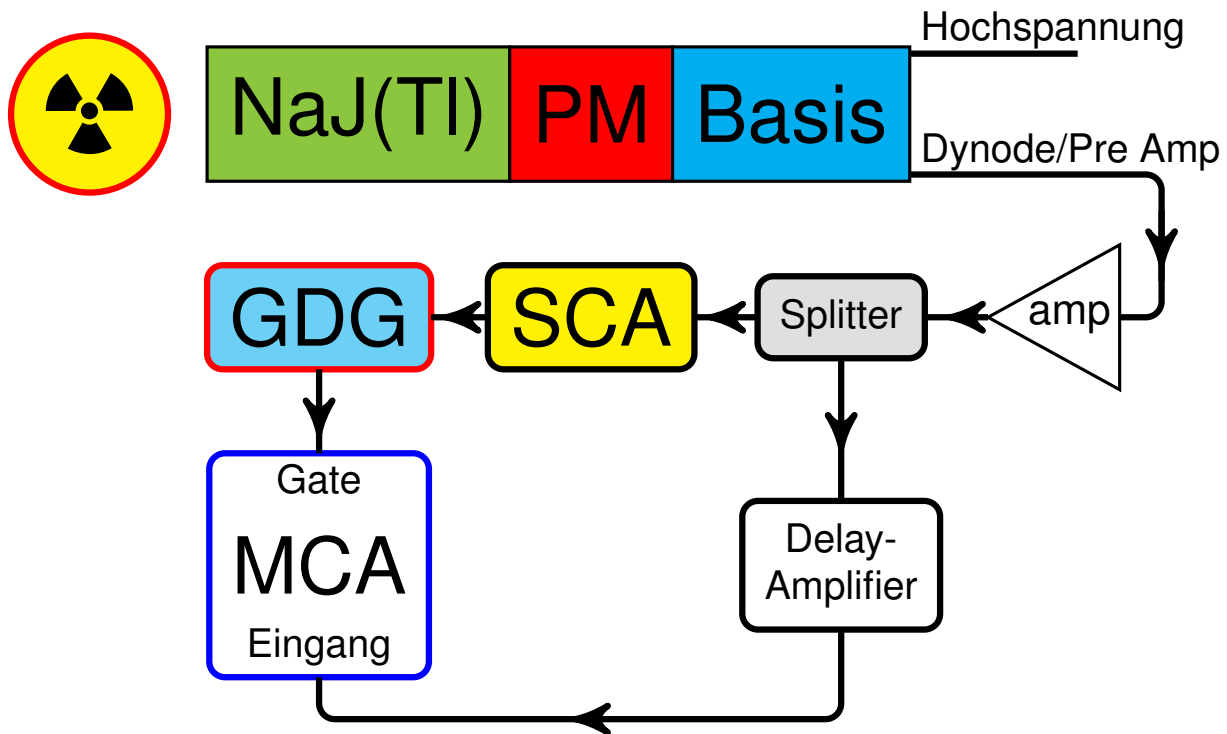


Abbildung P525.2: Schaltplan zum Einstellen der SCAs

Hierzu wird das Hauptverstärkersignal mit dem Signalteiler (*warum damit?*) geteilt und einerseits über den Delay-Amplifier auf Kanal 1 des Oszilloskops gegeben. Andererseits wird der zweite Zweig über den SCA auf Kanal 2 des Oszilloskops gegeben (positives SCA-Ausgangssignal benutzen!). Das SCA Fenster wird hier vollständig geöffnet. Benutzen Sie Kanal 2 zum Triggern.

Woran erkennen Sie auf dem Oszilloskop die 511keV-Linie? Benutzen Sie den Wahlschalter des Hauptverstärkers für die Grobeinstellung der Verstärkung (Coarse Gain) und dem Potentiometer für die Feineinstellung (Fine Gain), um die *Amplitude der 511keV-Linie auf etwa 3–4 V einzustellen und zu dokumentieren.*

Das Hauptverstärkersignal wird mittels Delay-Amplifier solange verzögert, bis das SCA-Signal im Bereich des Analogsignals liegt. Eine vollständige Überdeckung wird dann erreicht, indem das SCA Signal mit Hilfe des Gate-Delay-Generators (GDG) in Breite und Verzögerung angepasst wird (vergleiche Abbildung P525.2). Der GDG wird auch im Folgenden immer zur Erzeugung der Gate-Signale benutzt.

Energiespektrum der ^{22}Na -Quelle identifizieren und Verstärkung einstellen

Hauptverstärkersignal (mit der Verzögerung aus 'Triggerung mit dem SCA') auf den Analog-Eingang des MCA geben und das SCA-Signal über den GDG als Gate für den MCA benutzen. Starten Sie das Datenaufnahmeprogramm MCA3, eine Anleitung hierzu liegt aus. **Beim Speichern der Datensätze ist darauf zu achten, dass das .txt Format und möglichst kurze Dateinamen ohne Sonderzeichen benutzt werden und Sie die Datennahme gestoppt**

haben.

Nehmen Sie das ^{22}Na -Spektrum so lange auf, bis Sie alle Linien im Spektrum eindeutig identifizieren können. Hierfür die Verstärkereinstellung entsprechend anpassen. *Zeichnen Sie das vollständige ^{22}Na -Spektrum auf und diskutieren Sie es im Versuchsbericht.* Wenn Sie ein Spektrum aufgenommen haben, anhand dessen Sie die 511 keV-Linie eindeutig identifizieren können, erhöhen Sie die Verstärkung so weit, dass sich diese am rechten Rand des Spektrums befindet, ohne sie abzuschneiden. Dominiert eine Rausch-Linie das Spektrum, so kann diese durch leichtes Erhöhen der unteren SCA-Schwelle unterdrückt werden. Setzen Sie nun abwechseln die ^{133}Ba - und die ^{22}Na -Quelle in den Aufbau ein und justieren Sie die Verstärkung so, dass sowohl die 511 keV-Linie des ^{22}Na -Präparats, als auch die 81 keV Linie des ^{133}Ba registriert werden können! **Ab jetzt darf die Verstärkung nicht mehr geändert werden (Warum?).**

Energiespektren für die ^{22}Na - und ^{133}Ba -Quelle aufnehmen

Nehmen Sie nun mit dem im vorherigen Abschnitt justierten Aufbau die Energiespektren der ^{22}Na - und ^{133}Ba -Quelle auf. Hierbei sollte so lange gemessen werden, bis die Datenmenge für die spätere Energiekalibration ausreicht.

Einkanalfenster für die ^{22}Na -Quelle einstellen

Hierfür wird die ^{22}Na -Quelle in den obigen Aufbau eingesetzt und das SCA-Fenster mit der unteren und oberen Schwelle so eingestellt, dass die 511 keV-Linie umschlossen ist. Nehmen Sie fortwährend das Spektrum mit dem MCA auf und stellen Sie das Fenster so ein, dass nur noch die 511 keV-Linie wächst.

Das Spektrum mit eingestelltem Fenster sollte gespeichert werden, um bei der späteren Analyse *die Lage der Schwellen (in keV) extrahieren* zu können. Oszilloskopieren Sie anschließend nochmal das Hauptverstärkerausgangssignal gegen den SCA-Ausgang. *Was fällt Ihnen auf? Was sind die Unterschiede und wie hängen die Signale zusammen*

Für alle weiteren Messungen verbleibt der Signalteiler zwischen Hauptverstärker und SCA. Auch der Delay-Amplifier muss mit dem Signalteiler verbunden bleiben. *Warum sollte der Signalteiler nicht entfernt werden?*

Wiederholen Sie die Schritte ‘Slow-Pulse des Photomultipliers kontrollieren’ bis ‘Einkanalfenster für die ^{22}Na -Quelle einstellen’ für den zweiten Detektor! (Die Auswertung und Diskussion der beiden Detektoren kann parallel erfolgen.)

Slow-Koinzidenz herstellen

Um die Slow-Koinzidenz herzustellen schauen Sie sich die SCA-Signale beider Detektoren (ohne GDG) gegeneinander am Oszilloskop an und verzögern ggf. einen Zweig mittels SCA-Delay (unteres Potentiometer im SCA), bis sich die beiden Signale optimal überlappen. *Diskutieren Sie die Form, Dauer und relative Lage der Signale.*

P525.5.2 Fast-Koinzidenzkreis einstellen

Fast-Pulse des Photomultipliers kontrollieren

Oszilloskopieren und vergleichen Sie die Pulse des Fast-Ausgangs des Photomultipliers mit den Slow-Pulsen (Dynodensignale) des Detektors. *Diskutieren Sie die unterschiedlichen Polaritäten und bestimmen und diskutieren Sie die Anstiegszeiten der Signale.*

Machen Sie sich ggf. klar, wie die Anstiegszeiten definiert sind.

CFD-Diskriminatorschwelle einstellen

Zur Einstellung der CFD-Diskriminatorschwelle verwenden Sie den positiven Ausgang des CFD und das **Slow**-Signal desselben Detektors aus dem Hauptverstärker. Stellen Sie, mittels Delay-Amplifier und GDG eine zeitliche Koinzidenz dieser Signale her und regeln Sie die Schwelle des CFD **soweit wie möglich herunter**. *Was fällt Ihnen auf, wenn Sie die CFD-Schwelle langsam verändern (was ändert sich im Oszilloskop)?* Zur Einstellung der Schwelle geben Sie beide Signale auf den MCA. *(Welche Bedingung liefert nun das Gate-Signal für den MCA?)* Stellen Sie nun die CFD-Schwellen **soweit wie möglich herunter**. Nehmen Sie nun erneut ein ^{133}Ba -Spektrum auf. Speichern Sie die Spektren um Ihre Einstellung protokollieren und auswerten zu können.

Ist es sinnvoll in das Spektrum zu schneiden? – Warum?

Fast-Koinzidenz einstellen

Die Koinzidenz im Fast-Kreis wird in einem TAC geprüft, der einem erlaubt, die Zeit zwischen zwei koinzidenten Ereignissen zu messen. *(Wie groß ist hier die Auflösungszeit? Welche Quelle muss nun eingesetzt werden, um die Schaltung in den folgenden Schritten für die Messung zur Zeitkalibration in Abschnitt P525.5.3 justieren zu können?)* Entscheiden Sie anhand der im letzten Abschnitt gemessenen Energiespektren, *welcher Detektor das Start- und welcher das Stopp-Signal liefern sollte. (Woran wird die Entscheidung festgemacht?)*

Verwenden Sie die negativen Signale der CFDs. Leiten Sie das Stopp-Signal über das ns-Delay. Auf dem Oszilloskop können Sie die *relative, zeitliche Lage des Start- und des Stopp-Signals* ermitteln, um diese im Versuchsbericht zu protokollieren und diskutieren. Stellen Sie sicher, dass das Stopp-Signal nach dem Start-Signal am TAC/Oszilloskop ankommt. Dazu können Sie die zwischen geschaltete Verzögerungseinheit nutzen. Stellen Sie nun einen ausreichenden aber möglichst kurzen Zeitabstand ein. *Welchen Abstand haben die beiden Signale nun? Wie lang und hoch sind die Signale?*

Zeitlicher Abgleich von Fast- und Slow-Koinzidenz

Oszilloskopieren Sie den Ausgang der Slow-Koinzidenz und den des TAC gegeneinander. Zum zeitlichen Abgleich muss das Signal der Koinzidenz mit dem GDG so angepasst werden, dass beide Signale ausreichenden überlappen. Zeichnen Sie wiederum die *Form, Dauer und relative zeitliche Lage der beiden Signale* auf.

P525.5.3 Zeitkalibration des TAC

Aufnahme der Prompt-Kurve

Geben Sie das TAC-Signal mit der Slow-Koinzidenz als Gate auf den MCA. *Wieso zeigt das entstehende Zeitspektrum die Form der sogenannten „Promptkurve“? Wieso funktioniert das nur mit der ^{22}Na -Quelle?* Nehmen Sie so lange Daten auf, bis das entstehende Spektrum genügend Ereignisse für die spätere Auswertung enthält. Variieren Sie anschließend, ohne den MCA zu löschen oder das Display zu wechseln, die Verzögerung zwischen den beiden Fast-Zweigen in 16 ns-Schritten bis sie den gesamten Bereich des Spektrum gut ausgenutzt haben – es sollten **mindestens** 5 Promptkurven dargestellt werden.

Bestimmung der Zeitauflösung und der Zeitkalibration

Speichern Sie das Gesamtspektrum, um daraus die Halbwertsbreiten der Promptkurven und die Zeitkalibration bestimmen zu können. *Bestimmen Sie die Zeitauflösung der Apparatur.*

P525.5.4 Messung der Lebensdauer

Tauschen Sie die ^{22}Na -Quelle gegen die ^{133}Ba -Quelle.

Einkanalfenster für die ^{133}Ba -Quelle einstellen

Öffnen Sie die Fenster der SCAs und nehmen Sie das Energiespektrum für beide Detektoren wie in ‘Energiespektren für die ^{22}Na - und ^{133}Ba -Quelle aufnehmen’ auf. Stellen Sie, wie unter ‘Einkanalfenster für die ^{22}Na -Quelle einstellen’, die Einkanalfenster auf die 81 keV- bzw. die bevölkernde Linie ein, wobei auf eine korrekte Zuordnung der Linien im Spektrum zu achten ist. *Welche γ -Energie sollte der Detektor, der den TAC startet, nachweisen, damit das aufzunehmende Zeitspektrum in positiver x-Richtung verläuft?*

Koinzidenzen kontrollieren

Überprüfen Sie mittels Oszilloskop die Koinzidenz der SCA-Ausgänge sowie den Überlapp von Slow- und Fast-Koinzidenz. Justieren Sie bei Bedarf nach. (***Dokumentieren Sie die Kontrolle und Anpassung.***)

Messung der Lebensdauerkurve

Nehmen Sie nun die Lebensdauerkurve auf. Dabei ist die Fast-Verzögerungszeit so zu wählen, dass ein möglichst großer Teil des Lebensdauerspektrums abgedeckt wird.

P525.5.5 Versuchsbericht und Auswertung

Versuchsbericht

Der Bericht soll eine **vollständige, detaillierte** und in **allen Schritten nachvollziehbare** Beschreibung der Durchführung des Versuchs **einschließlich aller Schaltpläne** und **oszilloskopierten Signale** enthalten.

Ergebnisse sollen dargestellt und diskutiert werden. Verwendete Isotope sind eindeutig zu kennzeichnen und Bild-/Tabellenunterschriften klar, vollständig und verständlich zu formulieren.

Weitere Informationen siehe Abschnitt P525.6.2 ‘Informationen zum Versuchsbericht’.

Energiekalibration

*Erstellen Sie die Energiekalibration mit **mindestens** der K_α , 81 keV und 356 keV Linie der ^{133}Ba -Quelle (Sind alle Linien des Termschemas zu sehen? Sind im Spektrum eventuell weitere Linien vorhanden, als im Termschema angegeben? – Woher könnten diese stammen?) und mit der 511 keV Linie der ^{22}Na -Quelle für **beide Detektoren**. Ferner soll die *Energieauflösung* für die 81 keV-, die 356 keV-, und die 511 keV-Linie *bestimmt und diskutiert werden*. Welcher *Energie* entsprechen die SCA-Schwellen, beziehungsweise welchem *Energieintervall* die jeweils *eingestellten SCA-Fenster*? Welcher *Energie* entsprechen die *eingestellten CFD-Schwellen*? – Überlegen Sie sich eine **sinnvolle** Bedingung und Methode zur Auswertung der SCA- und CFD-Schwelle und *erläutern Sie diese*.*

Auswertung Zeitauflösung und der Lebensdauerermessung

Machen Sie anhand der aufgenommenen Promptkurven die *Zeitkalibration* und nutzen sie diese, um die *Zeitauflösung* und die *Lebensdauer* des $\frac{5}{2}^+$ -Niveaus bei 81 keV in ^{133}Cs zu bestimmen. Führen Sie eine *Fehlerrechnung und -diskussion* durch und *vergleichen Sie Ihren Wert mit dem Literaturwert*. Führen Sie dabei auch eine *Abschätzung der systematischen Fehler* durch und *diskutieren Sie deren Einfluss* auf Ihre Messergebnisse.

Zusätzliche Informationen zur Form der Lebensdauerkurve sind im Anhang (unter Form der Lebensdauerkurve) zu finden.

P525.6 Anhang

P525.6.1 Zerfallsschemata

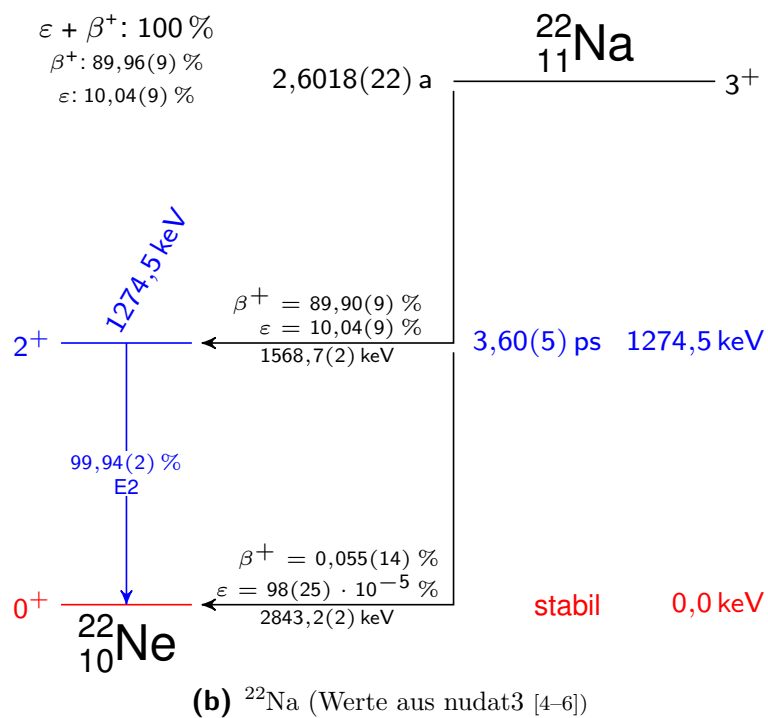
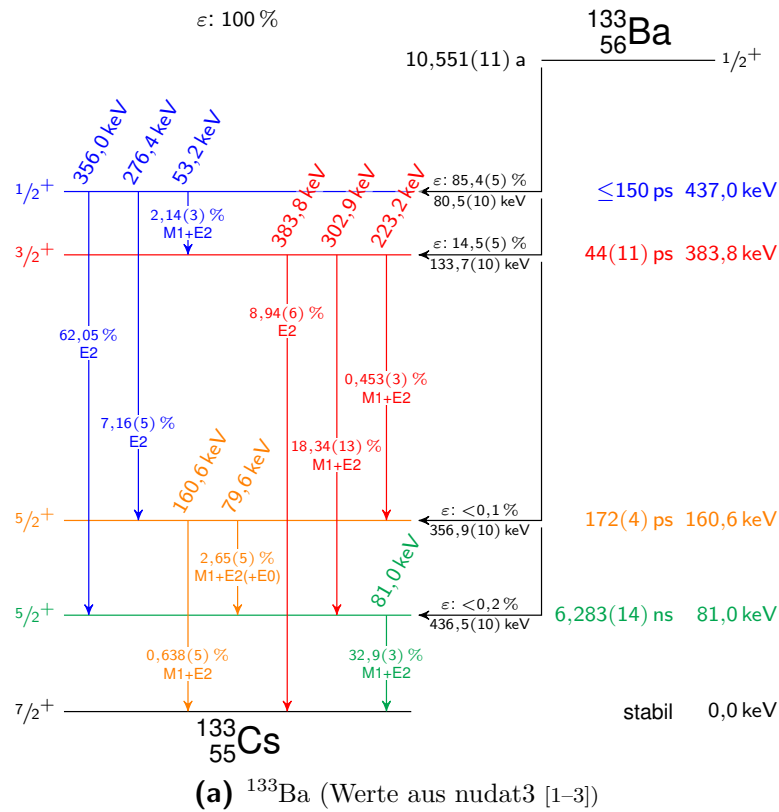


Abbildung P525.3: Zerfallsschemata von ^{133}Ba und ^{22}Na

P525.6.2 Informationen zum Versuchsbericht

- bei Problemen, Unklarheiten oder fehlenden Abbildungen/Messungen kontaktieren Sie die Assistentin/den Assistenten
- zu jedem Schritt ist **ein Schaltplan** und für **jeden Detektor** je min. **ein Oszillogramm** anzugeben und die **Ergebnisse zu diskutieren**.
- Erklären sie die **Funktion der in den Schaltungen verwendeten Bauteile**. Vorzugsweise jeweils an der Stelle im Versuchsbericht in der das Bauteil erstmalig eingeführt wird.

P525.6.3 Vorhandene Elektronik

- 2 Szintillations-Detektoren mit Photomultipliern und integrierten ladungsempfindliche Vorverstärker
- 2 Hochspannungsgeräte (nicht verändern)
- 2 pulsformende Hauptverstärker
- 2 passive Signalteiler
- 2 Einkanaldiskriminatoren (SCA)
- 1 Mehrfach-Koinzidenzeinheit
- 1 Gate-Delay-Generator (GDG)
- 2 Constant Fraction Diskriminatoren (CFD)
- 1 variables Delay (0 – 128 ns)
- 1 Zeit-Analog-Wandler (TAC)
- 2 Verzögerungs-Verstärker (Delay-Amp)
- 1 Oszilloskop
- 1 PC mit MCA-Einschubkarte

P525.6.4 Form der Lebensdauerkurve

Die gemessene Lebensdauerkurve besteht aus zwei Komponenten. Die eine ist das reine Lebensdauerspektrum W des angeregten Zustands und hat die Form

$$W(t) = \frac{I}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (\text{P525.1})$$

hier ist τ die mittlere Lebensdauer und I ist mit der kumulierten Anzahl von Ereignissen korreliert.

Die zweite Komponente wird durch die begrenzte Zeitauflösung des Detektorsystems verursacht und kann durch die Messung von Prompt-Ereignissen beobachtet werden, da jede gemessene Zeitdifferenz t durch diese verschmiert wird:

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_0}{\sigma}\right)^2\right). \quad (\text{P525.2})$$

Das gemessene Spektrum $M(t)$ ist eine Faltung aus dem Lebensdauerspektrum und der verschmierenden Funktion.

$$M(t) = (W * P)(t) = \int_0^\infty W(p) \cdot P(p-t) \, dp \quad (\text{P525.3})$$

Durch einfügen von P525.1 und P525.2 in P525.3 erhält man:

$$M(t) = \frac{I}{2\tau} \cdot \exp\left(\frac{\sigma^2 - 2\tau(t - t_0)}{2\tau^2}\right) \cdot \left[1 + \operatorname{erf}(b(t))\right] \quad (\text{P525.4})$$

wobei

$$b(t) = \frac{\tau(t - t_0) - \sigma^2}{\sqrt{2}\sigma\tau} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{t - t_0}{\sigma} - \frac{\sigma}{\tau} \right)$$

erf ist die Fehlerfunktion:

$$\operatorname{erf}(x) = \int_0^x e^{-y^2} dy \quad (\text{P525.5})$$

Viel Erfolg bei der Durchführung!

Stand: Oktober 2025

Literatur

- [1] Y. Khazov, A. Rodionov und F. Kondev. *NuDat 3.0 – Decay radiation information for ^{133}Ba (Nuclear Data Sheets 112, 855)*. 2011. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/decaysearchdirect.jsp?nuc=133Ba> (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 9).
- [2] Y. Khazov, A. Rodionov und F. Kondev. *NuDat 3.0 – adopted levels, gammas for ^{133}Cs (Nuclear Data Sheets 112, 855)*. 2011. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/getdataset.jsp?nucleus=133Cs> (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 9).
- [3] Y. Khazov, A. Rodionov und F. Kondev. *NuDat 3.0 – ^{133}Cs levels, ε - and γ -radiations of ^{133}Ba ε decay (10.551 y) (Nuclear Data Sheets 112, 855)*. 2011. URL: https://www.nndc.bnl.gov/ensnds/133/Cs/ec_decay_10.551_y.pdf (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 9).
- [4] M. Shamsuzzoha Basunia. *NuDat 3.0 – Decay radiation information for ^{22}Na (Nuclear Data Sheets 127, 69)*. 2015. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/decaysearchdirect.jsp?nuc=22Na> (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 9).
- [5] M. Shamsuzzoha Basunia. *NuDat 3.0 – adopted levels, gammas for ^{22}Ne (Nuclear Data Sheets 127, 69)*. 2015. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/getdataset.jsp?nucleus=22Ne> (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 9).
- [6] M. Shamsuzzoha Basunia. *NuDat 3.0 – ^{22}Ne levels, ε , β^+ - and γ -radiations of ^{22}Na ε decay (Nuclear Data Sheets 127, 69)*. 2015. URL: https://www.nndc.bnl.gov/ensnds/22/Ne/ec_decay.pdf (besucht am 21.04.2022) (siehe S. 9).