Schüler Labor

Gesellschaft für Schwerionenforschung

Station 5

γ-Spektroskopie mit NaI- und Ge-Detektoren

Inhalt

Inhalt 1
Gamma-Spektroskopie mit NaI- und Ge-Detektoren 2
Worum es geht 2
V.1. Der Experimentierplatz 2
V.2. Inbetriebnahme des Messaufbaus 4
V.2.1. Inbetriebnahme der Elektronik 4
V.2.2. Inbetriebnahme des Ge-Detektors 5
V.3. Messung eines Gamma-Spektrums 9
V.3.1. Inbetriebnahme des Impulshöhen-Analysators (MCA) 10
V.3.2. Darstellung eines Spektrums in Excel 11
V.3.3. Energiekalibrierung 13
V.4. Elementanalyse mit hochauflösender Gammaspektroskopie 14
V.4.1. Das Spektrum von Ra-226 14
V.4.2. Identifizierung radioaktiver Isotope 15
V.4.3. Beenden des Versuchs 17
V.5. Zerfallsreihen natürlicher Radionuklide 18
V.5.1. Thorium-232-Zerfallsreihe 19
V.5.2. Uran-235-Zerfallsreihe 20
V.5.3. Uran-238-Zerfallsreihe 21
V.6. Vergleich der Detektoreigenschaften von NaI und Ge (optional) 22
V.6.1. Inbetriebnahme des NaI-Detektors 22
V.6.2. Die Energie-Auflösung 23
V.6.3. Die Nachweis-Effizienz 24
V.6.4. Beenden des Versuchs 24
Hintergrundwissen 25
H.1. Radioaktivität und Strahlungsarten 25
Alpha-Strahler 25
Beta-Strahler 25
Gamma-Strahler 25
H.2. Natürliche Radionuklide ohne Zerfallsreihen 26
H.3. Kosmische Strahlung und die Erzeugung neuer Radionuklide 27
H.4. Die Ionisationswirkung der radioaktiven Strahlungsarten 28
H.5. Schwächung von Gamma-Strahlen 29
H.6. Nachweis von Gamma-Strahlen mit einem NaI-Szintillationszähler 29
H.7. Nachweis von Gamma-Strahlen mit einem Ge-Detektor 31
H.8. Verstärkung und Formung der Detektorimpulse 33
Vorverstärker 33
Hauptverstärker 33
H.9. Impulshöhenanalyse (MCA) 34

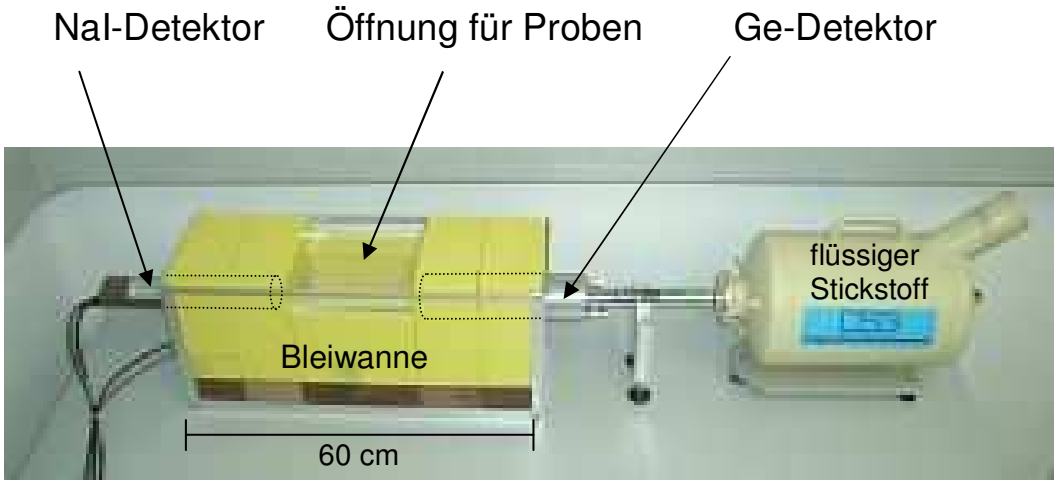
Gamma-Spektroskopie mit NaI- und Ge-Detektoren

Worum es geht

Gamma-(γ)-Strahlung entsteht bei fast allen radioaktiven Zerfällen, aber auch in Beschleunigerexperimenten, wie sie an der GSI von Forschern aus aller Welt durchgeführt werden. Die Messung und Auswertung von γ-Strahlung liefert den Forschern grundlegende Einblicke über den Aufbau und die Eigenschaften der kleinsten Bausteine der Materie, vor allem der Atomkerne.

In diesem Versuch messen Sie die γ-Strahlung natürlicher radioaktiver Substanzen mit einem Germanium-Detektor (Ge) (optional mit einem Natriumiodid-Detektor (NaI)). Dies sind zwei hochleistungsfähige Messgeräte, die an der GSI in riesigen Experimentaufbauten zu hunderten miteinander kombiniert und für die moderne Grundlagenforschung eingesetzt werden.

V.1. Der Experimentierplatz



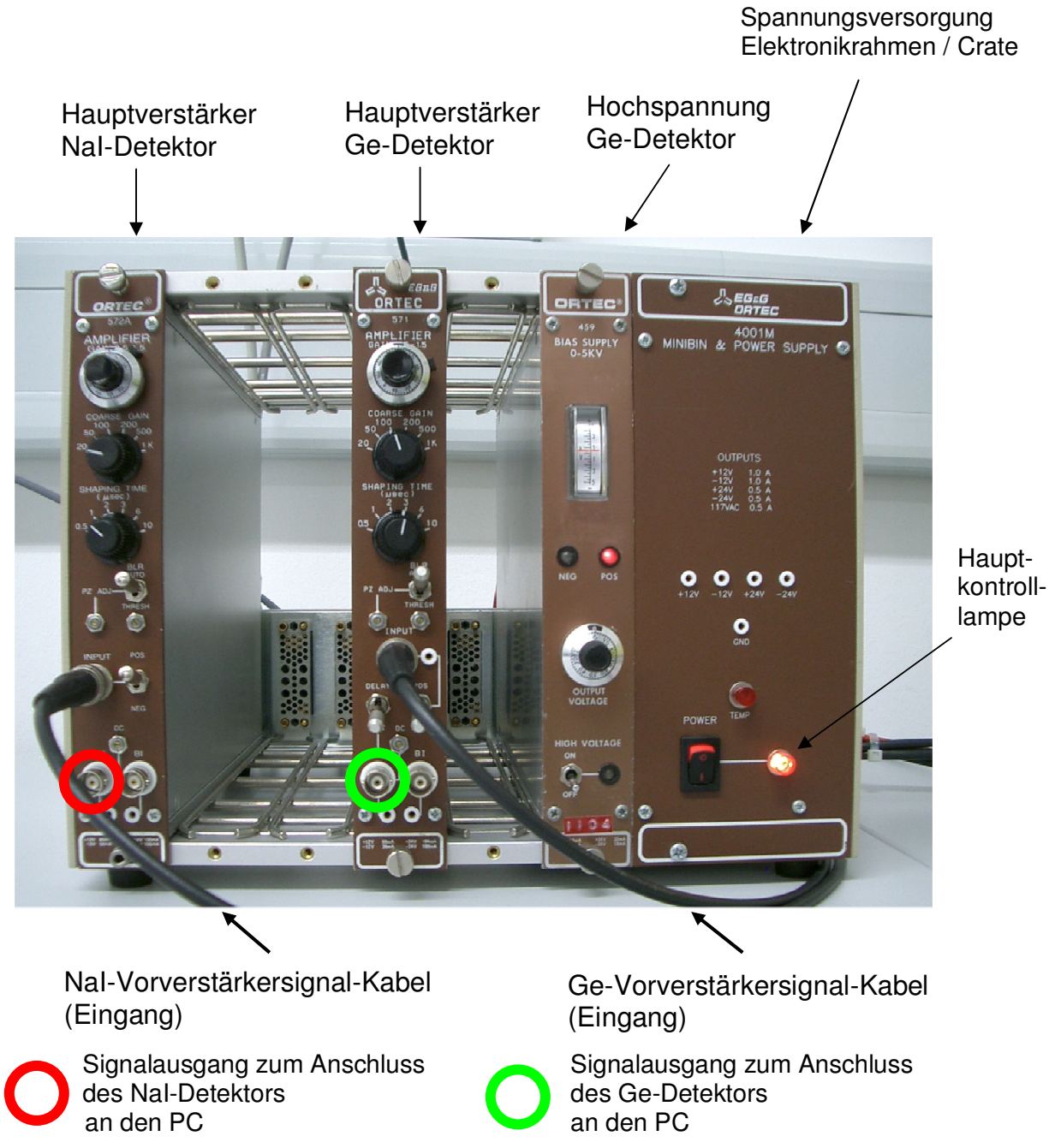
Für die Messung der Gammastrahlung steht hier ein Messaufbau mit zwei verschiedenen Detektortypen zur Verfügung. Mit einer Ausleseelektronik werden die Messsignale weiterverarbeitet. Über einen speziellen PC können die Messwerte ausgelesen, grafisch dargestellt und ausgewertet werden.

Die Detektoranordnung besteht aus zwei Detektoren, einem Germanium-Detektor (Ge), der mit flüssigem Stickstoff gekühlt wird (Abbildung oben rechts) und einem Natriumiodid-Detektor (NaI).
Die Messköpfe sind gegenüber voneinander in einer Bleiwanne angeordnet. In der Mitte der Bleiwanne befindet sich eine mit Plexiglas abgedeckte Öffnung, durch die verschiedene Proben eingebracht werden können. Die Bleiwanne dient zur Abschirmung der Detektoren vor der natürlichen Umgebungsstrahlung.

Im NaI-Detektor sind die Spannungsversorgung und der Vorverstärker, im Ge-Detektor der Vorverstärker bereits integriert. Kabel führen die jeweiligen Vorverstärker-Messsignale zur Ausleseelektronik.

V.1.2. Die Ausleseelektronik

Beide Detektoren sind an einen Elektronik-Überrahmen (Crate) angeschlossen. Er enthält jeweils einen Hauptverstärker für jeden Detektor, der die Vorverstärkersignale weiter verstärkt, sowie die Hochspannungsversorgung für den Ge-Detektor (in der Abbildung von links nach rechts). Ganz rechts ist die Spannungsversorgung für das Crate. Dort lässt sich die gesamte Elektronik ein- und ausschalten, was aber erst nach den im nächsten Abschnitt beschriebenen Überprüfungen geschehen darf.



V.2. Inbetriebnahme des Messaufbaus

V.2.1. Inbetriebnahme der Elektronik

☞ Überprüfen Sie zuerst genau die folgenden Voreinstellungen:

Hauptverstärker NaI

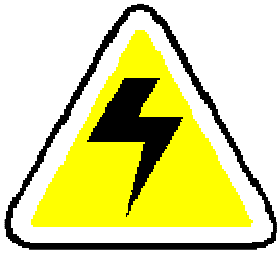
Drehregler "Gain 0,5-1,5".....	13 / 26
Drehschalter "Coarse Gain"....	20
Drehschalter "Shaping Time"..	1
Schalter "PZ ADJ".....	BLR AUTO
Schalter "INPUT".....	POS

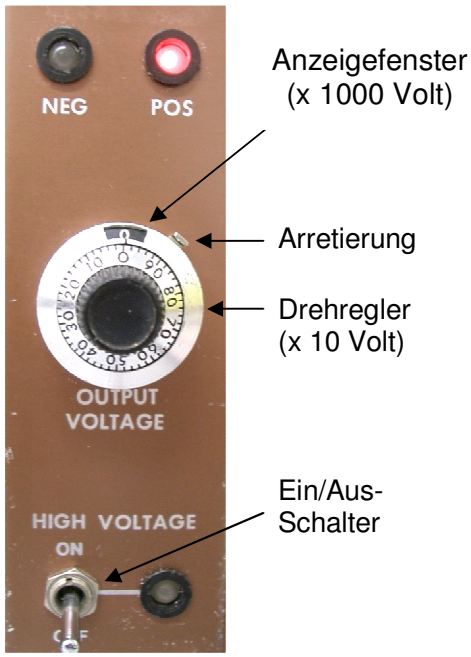
Hauptverstärker Ge

Drehregler "Gain 0,5-1,5".....	7 / 80
Drehschalter "Coarse Gain".....	100
Drehschalter "Shaping Time"...	3
Schalter "PZ ADJ".....	BLR AUTO
Schalter "INPUT".....	NEG
Schalter "UNI".....	OUT

Hochspannung Ge (Bild rechts):

Drehregler „OUTPUT VOLTAGE“ ..... „0 / 0“
Schalter „HIGH VOLTAGE“.....“OFF“



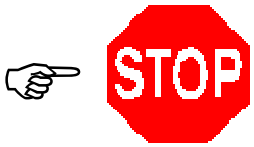


☞ Überprüfen Sie, ob der Elektronikrahmen ausgeschaltet ist. Die Hauptkontrollampe sollte nicht leuchten. Wenn der Elektronikrahme bereits eingeschaltet ist, sollten sie unbedingt Rücksprache mit einem Betreuer halten!

☞ Überprüfen Sie noch einmal, ob alle obigen Einstellungen richtig sind. (Besonders wichtig: Die Hochspannung des Ge-Detektors muss unbedingt ausgeschaltet sein!)

☞ Schalten Sie jetzt den Elektronikrahmen (Crate) ein, indem Sie den Schalter "Power" (ganz rechts) auf "I" stellen. Die Hauptkontrolllampe sollte nun leuchten. Die Mess-Elektronik ist nun aktiviert!

V.2.2. Inbetriebnahme des Ge-Detektors



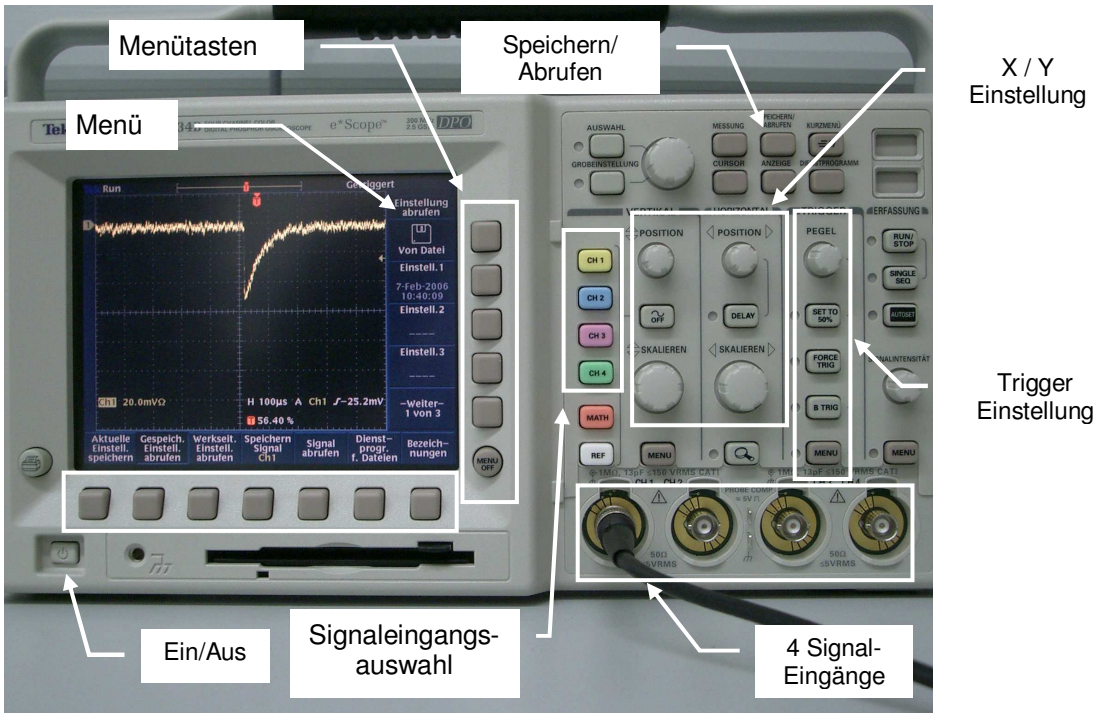
Wichtiger Hinweis!
Die Inbetriebnahme des Ge-Detektors ist aufwendig und muss in allen Teilen sorgfältig durchgeführt werden, um Schäden an diesem hochwertigen Detektor zu vermeiden!

Das Anlegen der Hochspannung muss langsam und unter ständiger Beobachtung der Messsignale am Oszilloskop (s.u.) geschehen. Dies dauert etwa 10 min und erfordert Ihre ständige Aufmerksamkeit!

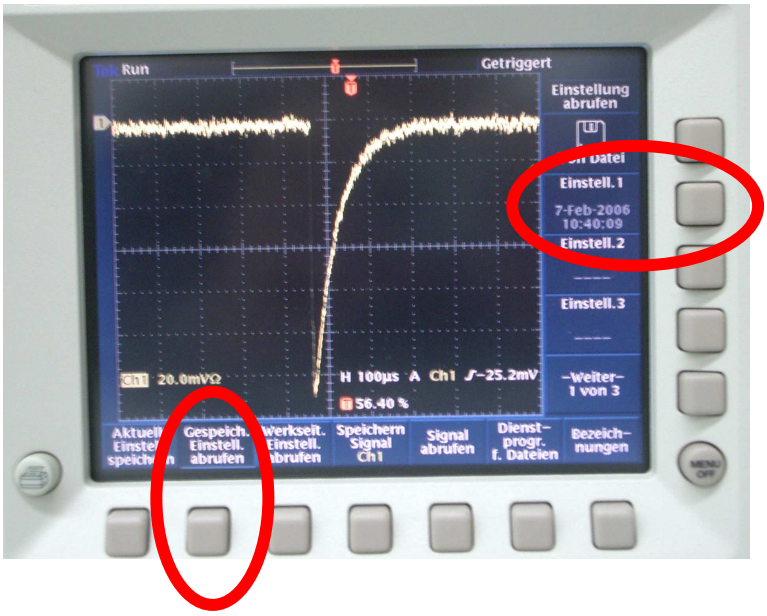
Auf keinen Fall darf später die Hochspannungsversorgung einfach ausgeschaltet werden! Diese muss nach Versuchsende ebenso langsam wieder heruntergeregelt werden, bevor die Geräte ausgeschaltet werden!

☞ Schließen Sie das Signalkabel ("Ge-Detektor") an den Oszilloskopeingang CH1 an. Es liegt ein Verlängerungskabel mit Zwischenstück bereit (Abbildung rechts).

☞ Schalten Sie das Oszilloskop ein (Taste ganz links unten) und warten Sie auf die Bestätigung, dass alle Selbsttests erfolgreich ausgeführt wurden.



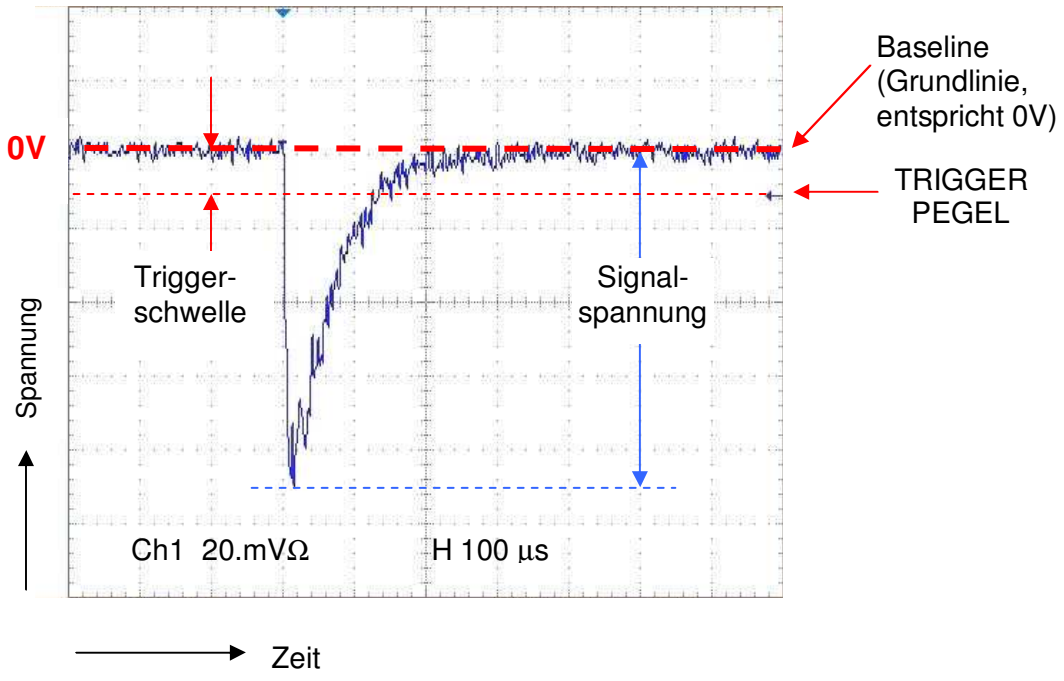
☞ Um eine Voreinstellung auszuwählen, drücken Sie nun die Taste „SPEICHERN/ ABRUFEN“ (braune Taste oben rechts). Daraufhin sollte das folgende Bildschirmmenü angezeigt werden:



☞ Drücken Sie die Menü-Tasten in der Reihenfolge:
- „gesp. Einstell.abrufen“
- „Einstell. 1“ (das Datum ist unerheblich)

☞ Sollte diese Voreinstellung überschrieben worden sein, können Sie die Oszilloskopeinstellungen auch von der beiliegenden 3.5“-Diskette abrufen:
- <Von Datei> drücken
- TEK00000.SET mit dem Auswahl-Drehknopf (über dem Wort VERTIKAL) auswählen
- <Von gewählter Datei abrufen> drücken

☞ Nun sollten Sie auch ohne radioaktive Quelle elektrische Impulse sehen, die von γ-Quanten der natürlichen Untergrundstrahlung ausgelöst werden. Wenn diese negativen Impulse (Abbildung unten) nicht sichtbar sind, müssen Sie wahrscheinlich den Triggerpegel (Drehknopf am Oszilloskop mit der Bezeichnung „TRIGGER PEGEL“) verändern. Der Triggerpegel ist eine Art einstellbarer, elektronischer „Schwelle“, die von einem Impuls am Signaleingang des Oszilloskops erst überschritten werden muss, damit er am Bildschirm dargestellt wird. Spielen Sie ein wenig mit den Einstellungen, um sich mit der Arbeitsweise des Triggers vertraut zu machen.



Machen Sie sich klar, was Sie auf dem Oszilloskop sehen: Immer, wenn ein γ-Quant in den Detektor einfällt, sieht man am Oszilloskop ein kurzzeitiges Absinken der elektrischen Spannung am Signaleingang (deswegen spricht man auch von einem kurzen elektrischen Spannungs*impuls*).
Die maximale Höhe der Signalspannung ist proportional der Energie des eingefallenen γ-Quants (vgl. *Hintergrundwissen*).
Man kann die Signalspannung direkt an den 1cm x 1cm - Kästchen am Oszilloskop ablesen:
1cm in y-Richtung entspricht der neben „Ch1" eingeblendeten Spannung (in unserem Beispiel 20.0 mV, das angehängte Ω-Zeichen hat in diesem Zusammenhang keine Bedeutung).
1 cm in x-Richtung entspricht der neben „H" eingeblendeten Zeit (in unserem Beispiel 100µs).
In unserem Beispiel hat ein γ-Quant also kurzzeitig einen Spannungsimpuls von ca. 85 mV erzeugt, der nach rund 200µs wieder abgeklungen ist. Die Baseline selbst schwankt um etwa ± 4mV um die Nulllage herum.

☞ Wenn die elektrischen Impulsformen zufriedenstellend sind, **stellen Sie am Oszilloskop für die vertikale Skalierung einen Wert von 20 mV pro cm ein. Schalten Sie erst dann die Hochspannungsversorgung des Ge-Detektors ein und beobachten Sie dabei die elektrischen Signale am Oszilloskop:**

- Drehregler „OUTPUT VOLTAGE" weiterhin auf „0"
- „HIGH VOLTAGE" auf „ON"

Die Baseline verschwindet möglicherweise für einen kurzen Moment aus dem Bildschirmbereich und kommt nach kurzer Zeit wieder.

☞ Lösen Sie die Arretierung (kleines Hebelchen am Drehregler („OUTPUT VOLTAGE") nach oben schieben) und erhöhen Sie mit dem Drehregler ganz langsam die Hochspannung. Beobachten Sie dabei weiterhin das Signal auf dem Oszilloskop ohne dessen Einstellungen zu verändern. Sie erkennen das „Absacken" und langsame Wiederherstellen der Baseline.

Sie müssen die Hochspannung so langsam erhöhen, dass Sie die Baseline immer auf dem Oszilloskop sehen können. Empfohlene Einstellung für die Vertikale Skalierung: 20mV pro cm.
Stellen Sie auf diese Weise eine Detektorspannung zwischen 2700 und 3000 Volt ein. Im nebenstehende Bild ist z.B. die Spannung 2740 V eingestellt: ein 10er Schritt auf dem Drehregler entspricht 100 Volt, im Anzeigefenster unmittelbar über dem Drehregler werden 1000 Volt Schritte angezeigt.

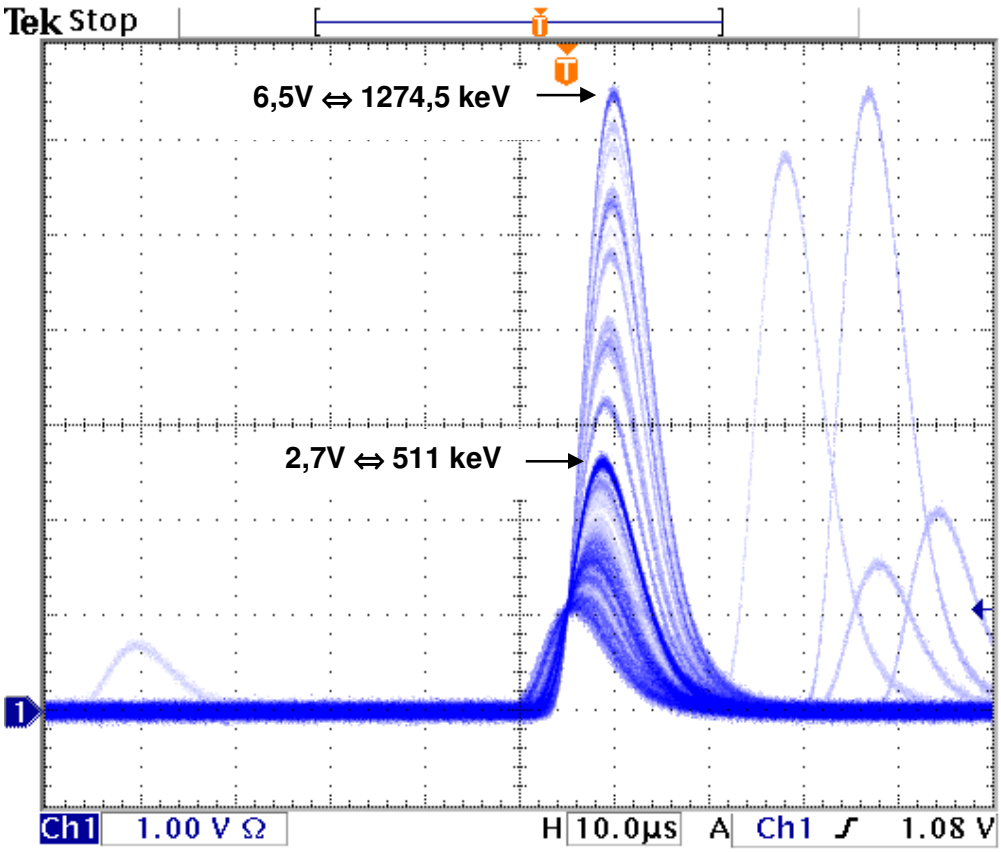
Diese Prozedur dauert etwa 10 Minuten! Bitte stellen Sie nach Einstellung der Hochspannung den Drehregler durch Verschieben des Arretierhebels (im Bild oben rechts) im Uhrzeigersinn fest.

☞ Sie sollten nun große, negative Impulse und eine deutlich geringere Schwankung der Baseline erkennen können.

☞ Schließen Sie nun das vom Vorverstärker kommende Signalkabel direkt an den Ge-Hauptverstärker an (Anschluss "INPUT"). Der Oszilloskopeingang CH1 wird nun mit dem Ausgang (Anschluss „UNI") des Ge-Hauptverstärkers verbunden.

☞ Bitten Sie den Betreuer um die Eichquelle Na-22 und legen Sie diese vor den Ge-Detektor in die Bleiwanne.

☞ Um die Signale *nach* dem Verstärker im Oszilloskop betrachten zu können, müssen Sie sowohl die vertikale wie die horizontale Skalierung mit den Drehreglern ändern, denn die Signalspannungen sind nun positiv und wesentlich höher. Sie können hierzu am Oszilloskop auch die „Einstellung 2“ abrufen.



☞ Wenn Sie genau hinsehen, dann bemerken Sie, dass häufig γ-Quanten einfallen, die zu Signalspannungen von 2,7V oder 6,5V führen. Dies kommt daher, dass unsere Eichquelle γ-Quanten mit zwei unterschiedlichen Energien aussendet: 511,0034 keV sowie 1274,5 keV.

Die Einheit **„keV“ (Kiloelektronenvolt)** und „eV“ (1 keV = 1000eV) ist eine in der Atom- und Kernphysik gebräuchliche, sehr kleine **Energieeinheit**. Man kann sie in die sonst übliche Energieeinheit Joule umrechnen, wobei gilt: $1J = 6{,}242 \cdot 10^{18}$ eV.
Prinzipiell können wir nun jeder Signalspannung die zugehörige γ-Energie zuordnen und können somit für jedes einfallende γ-Quant seine Energie in keV angeben. Allerdings ist die Ablesung der Signalspannung mit dem Oszilloskop nicht sehr genau. Deshalb werden wir im nächsten Kapitel die Signalspannungen mit dem PC messen.

☞ Verbinden Sie nun den Ausgang „UNI“ des Ge-Hauptverstärkers über das Kabel („PC/MCA“) mit dem PC. Ziehen Sie alle Signalkabel aus dem Oszilloskop und schalten Sie dieses aus.

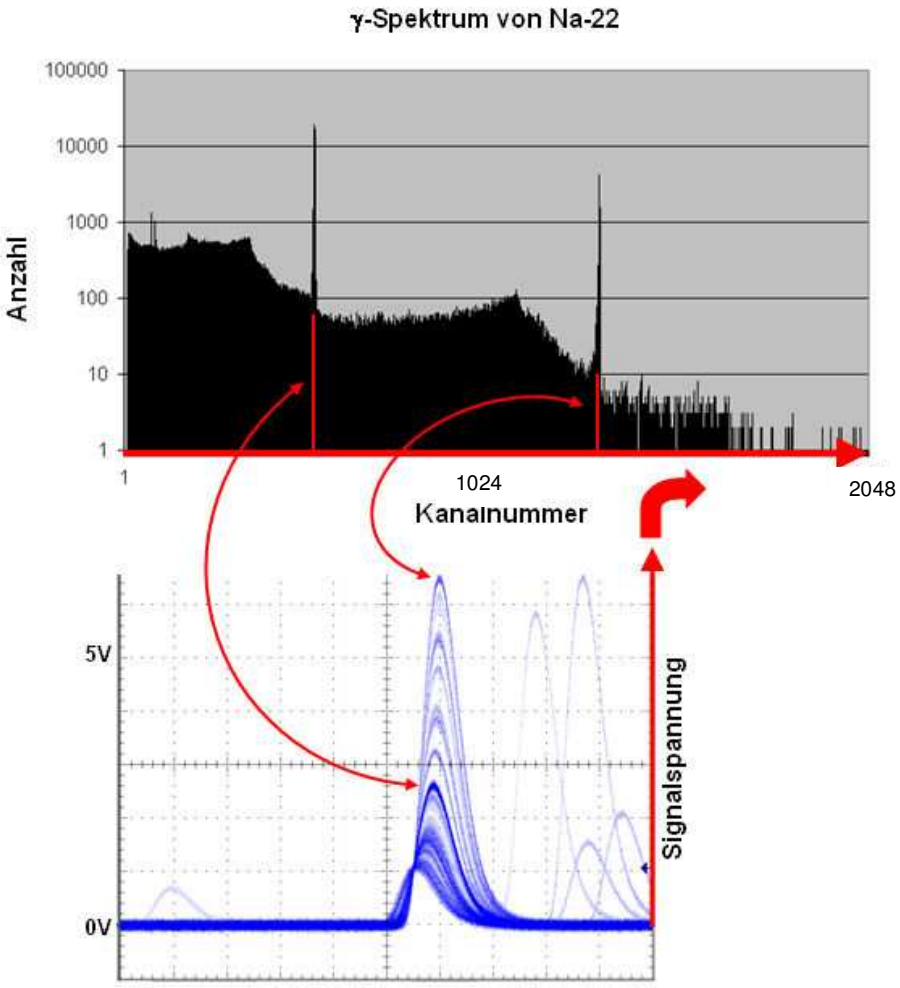
V.3. Messung eines Gamma-Spektrums

Zur Messung der Signalspannungen ist in dem PC eine so genannte **Analog-Digital-Konverter**-Karte eingebaut. Mit ihr werden die unterschiedlichen Signalspannungen digitalisiert, d.h. jeder Signalspannung wird eine **natürliche Zahl** zugeordnet, die man traditionellerweise **„Kanalnummer“** oder auch kurz **„Kanal“** nennt**.** In unserem Experiment wird der Signalspannungsbereich von **0 bis 10V** auf die **Kanäle 1 bis 2048** verteilt.

γ-Quant im Detektor:		am Oszilloskop:		im PC:
geringe γ-Energie	⇔	kleine Signalspannung	⇔	niedrige Kanalnummer
hohe γ-Energie	⇔	hohe Signalspannung	⇔	hohe Kanalnummer

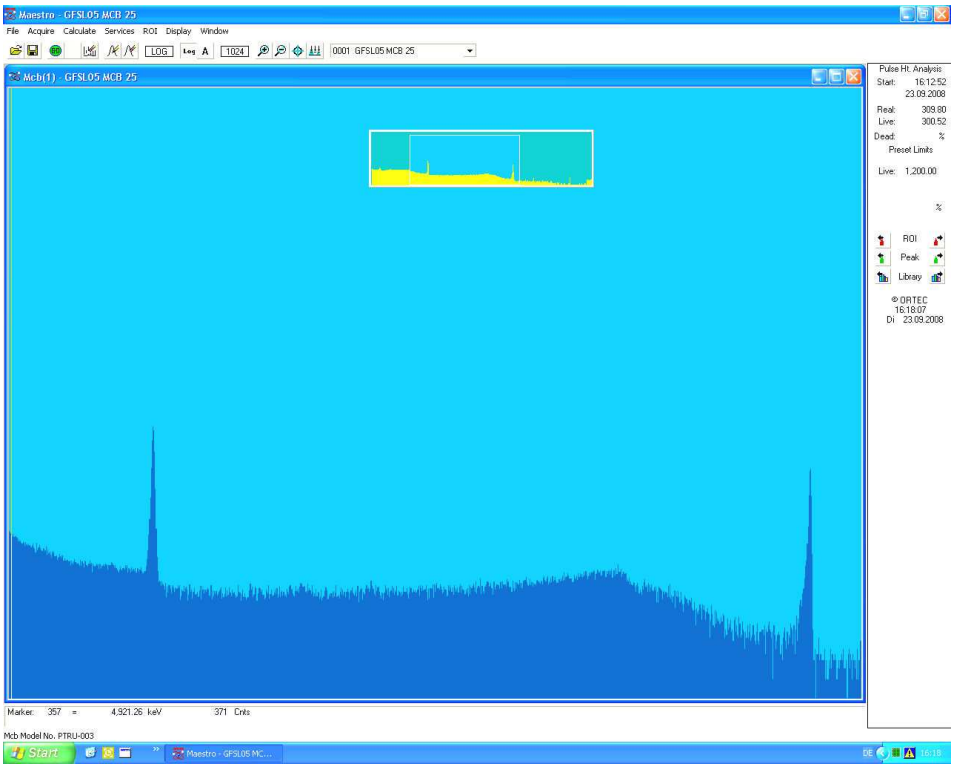
Die Energieinformationen über die nachgewiesenen γ-Quanten „steckt“ also nach der Digitalisierung in den Kanalnummern.

Die gemessenen Signalspannungen werden nun in einem so genannten **Spektrum** dargestellt (Abbildung unten): auf der x-Achse die Kanalnummern und auf der y-Achse die Anzahl der nachgewiesenen γ-Quanten.
Ein Spektrum ist also ein Histogramm, aus dem man ablesen kann, **wie viele γ-Quanten** (y-Achse) mit **welcher Energie** (x-Achse in der Einheit „Kanalnummer“) in dem Detektor nachgewiesen wurden.



V.3.1. Inbetriebnahme des Impulshöhen-Analysators (MCA)

☞ PC einschalten und anmelden. Am Desktop das Programm "MAESTRO for Windows" durch Doppelklick starten. Daraufhin erscheint der MAESTRO-Hauptbildschirm. Dort sehen Sie in der Hauptansicht evtl. noch ein altes Spektrum.



☞ Wählen Sie im Menü „Display“ unter „Detector“ die Zeile: „GFSL05 MCB 25“.

☞ Löschen Sie im Menü „Acquire“ mit „Clear“ eventuell noch vorhandene alte Spektren.

☞ Löschen Sie nun eine eventuell noch vorhandene alte Eichung: Menü „Calculate“ → “Calibration…” → “Destroy Calibration”.

☞ Starten Sie die Aufnahme des Spektrums durch Anklicken des grünen „GO“-Buttons in der Symbolleiste (oder durch „Acquire“ und „Start“).

☞ Lassen Sie die Messung 300 Sekunden laufen und stoppen Sie die Datenaufnahme mit dem roten „Stop“-Button in der Symbolleiste. Im Fenster oben rechts wird Ihnen die Messzeit in Sekunden angezeigt. Richten Sie sich nach der "Live“-time.

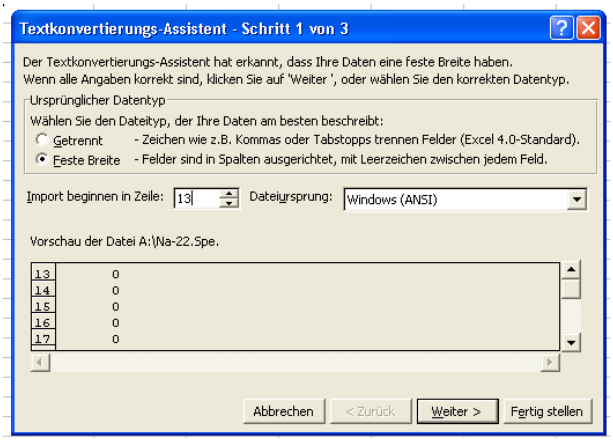
☞ Speichern Sie das Spektrum mit "File" → "Save as..." unter Eigene Dateien/AAAExperimente/Station 5. Wählen Sie dabei als Dateityp "ASCII SPE", damit Sie es später in Excel darstellen können.

V.3.2. Darstellung eines Spektrums in Excel

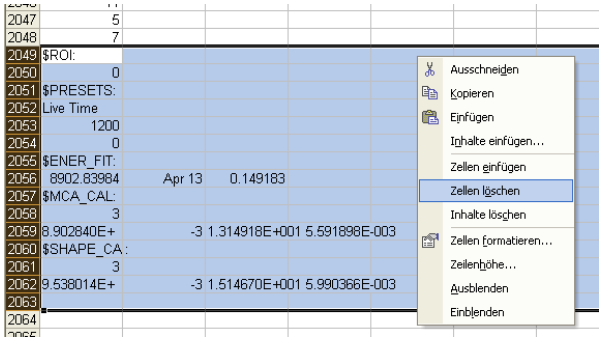
Das mit dem Programm MAESTRO aufgenommene Spektrum sollen Sie nun in Excel darstellen und auswerten.

☞ Starten Sie das Programm EXCEL und öffnen Sie die Datei mit dem zuvor gespeicherten Spektrum.

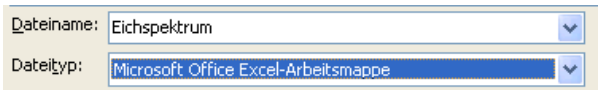
Es werden einige Abfragen zur Datenkonvertierung gestellt: Wählen Sie im Schritt 1 : „**Import beginnen in Zeile 13**“ und ändern Sie ansonsten die vorgegebenen Standardeinstellungen nicht.



☞ Sie erhalten nun in Excel eine Spalte mit 2048 Zahlen. Hinter der Zahlenkolonne (ab Spalte 2049) befinden sich außerdem zusätzliche Dateiinformationen. Diese müssen Sie löschen:



☞ Speichern Sie diese bereinigte Tabelle sicherheitshalber sofort unter einem neuen Namen **als EXCEL-Arbeitsmappe!**

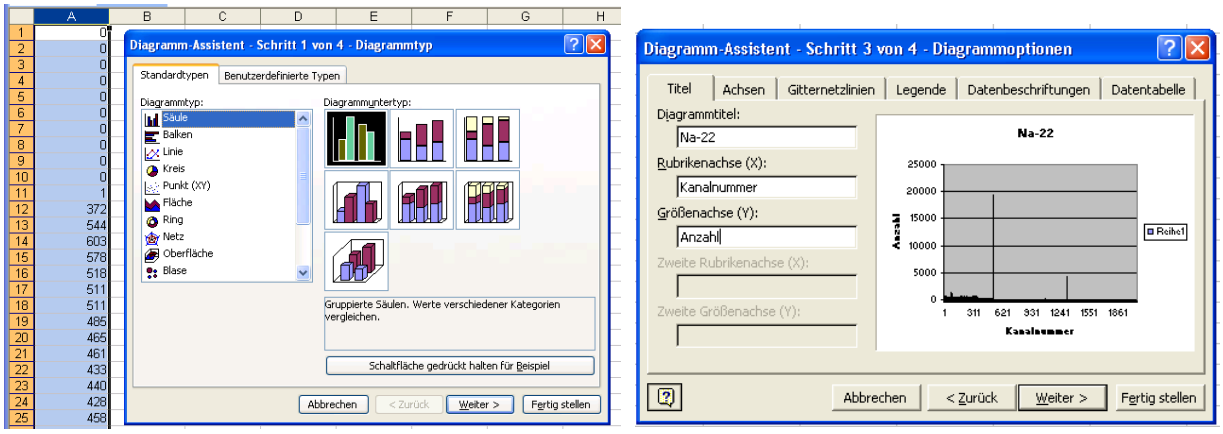


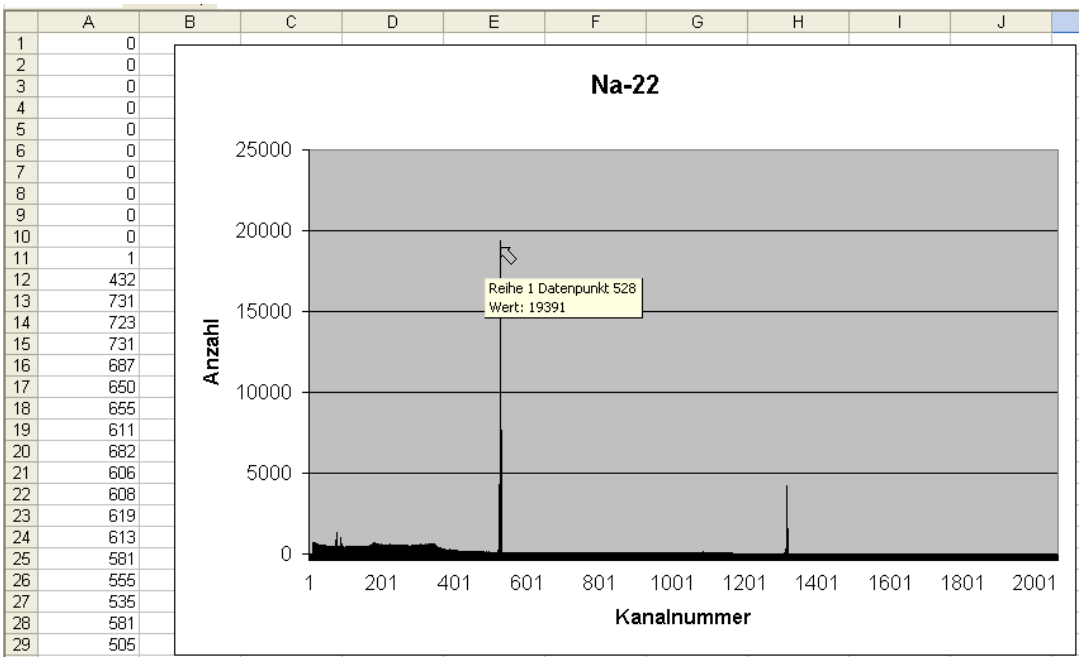
Betrachten wir nun die Tabelle genauer: Die Zeilennummern von 1 bis 2048 entsprechen den „Kanalnummern“ und man kann in der Spalte A direkt ablesen, wie viele γ-Quanten während der Messzeit in jedem dieser Kanäle gezählt wurden. In der Abbildung oben gab es z.B. während der Messzeit 7 γ-Quanten, die im Kanal 2048 (höchste nachweisbare Energie) gezählt wurden. Die Anzahlen bei Kanalnummern < 100 sollten Sie nicht beachten, da sie durch sog. elektronisches Rauschen entstehen und nicht als γ-Quanten interpretiert werden dürfen.

☞ Bestimmen Sie durch Scrollen in der Tabelle die Nummern der Kanäle, in denen die meisten γ-Quanten gezählt wurden und ordnen Sie diese Werte den beiden γ - Energieen von Na-22 in einer Tabelle wie dieser zu:

Kanalnummer	γ - Energie (in keV)
	511.0034
	1274.5

☞ Mit dem EXCEL-Diagrammassistenten können Sie sich das Spektrum auch grafisch darstellen lassen.
Diagrammassistent starten:





Man erkennt im Bereich zwischen Kanal 400 und 1400 zwei sehr deutliche Maxima. Diese Maxima werden oft auch als „Linien“ oder „Peaks“ bezeichnet. Ihre Lage innerhalb des Spektrums ist dabei charakteristisch für die radioaktiven Isotope.

☞ Wenn Sie den Mauszeiger (ohne zu Klicken) auf das Spektrum führen, können Sie sich darin einzelne Datenpunkte anzeigen lassen (Abbildung oben). Machen Sie sich anhand dieses Bildes noch einmal in Ruhe klar, was die angezeigten Punktkoordinaten des Spektrum aussagen: **Während der Messzeit wurden im Kanal 528 insgesamt 19391 γ-Quanten nachgewiesen, d.h. alle diese γ-Quanten hatten (annähernd) die gleiche Energie.**

V.3.3. Energiekalibrierung

So wie im letzten Abschnitt für die Na-22-Quelle beschrieben, können wir nun auch bei allen anderen radioaktiven Stoffen die Energie der ausgesandten γ-Quanten messen. Allerdings erhalten wir aus den Spektren immer nur die Kanalnummer!
Uns fehlt also noch eine Zuordnungsvorschrift **Kanalnummer** → **γ - Energie in keV**, mit der wir die Kanalnummern in die übliche Energieeinheit „keV" umrechnen können.
Glücklicherweise ist unsere gesamte Nachweiselektronik in guter Näherung „linear" (deswegen ist sie auch so teuer), so dass wir auch einen linearen Zusammenhang zwischen γ-Energie und Kanalnummer voraussetzen können:

Bezeichnen wir die **γ-Energie** mit **y** und die **Kanalnummer** mit **x,** dann läßt sich dieser lineare Zusammenhang mathematisch in Form einer **linearen Funktion** (Geradengleichung) ausdrücken:

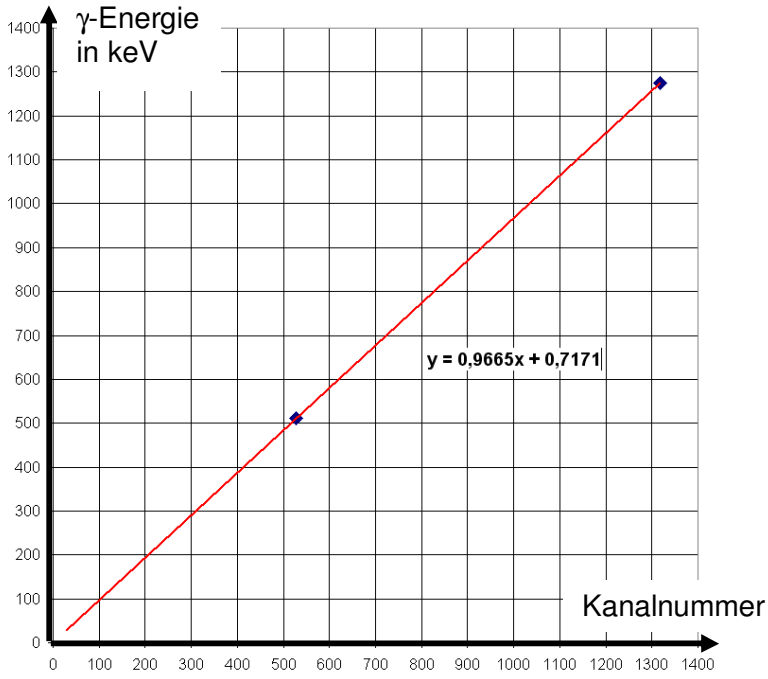
$$y = m \cdot x + b$$

Da wir im vorigen Abschnitt zu den beiden γ-Energien der Na-22-Quelle die zugehörigen Kanalnummern ermittelt haben, können wir diese beiden Wertepaare benutzen, um die Parameter **m (Steigung)** und **b (y-Achsenabschnitt)** in dieser Gleichung zu bestimmen (Achtung: die Werte der vorgestellten Beispielmessung stimmen in der Regel nicht mit den Werten in Ihrem Experiment überein!):

Kanalnummer **X**	γ - Energie (in keV) **Y**
528	511.0034
1318	1274.5

Mit etwas elementarer Mathematik erhält man aus diesen beiden x-y-Wertepaaren mit Hilfe der Geradengleichung die Parameterwerte m (hier: 0.97) und b (hier: 0.72).

☞ Berechnen Sie für Ihre Messung die Parameterwerte für m und b und stellen Sie die Zuordnungsvorschrift **Kanalnummer** → **γ - Energie in keV** in der Form **y = m·x + b** auf.

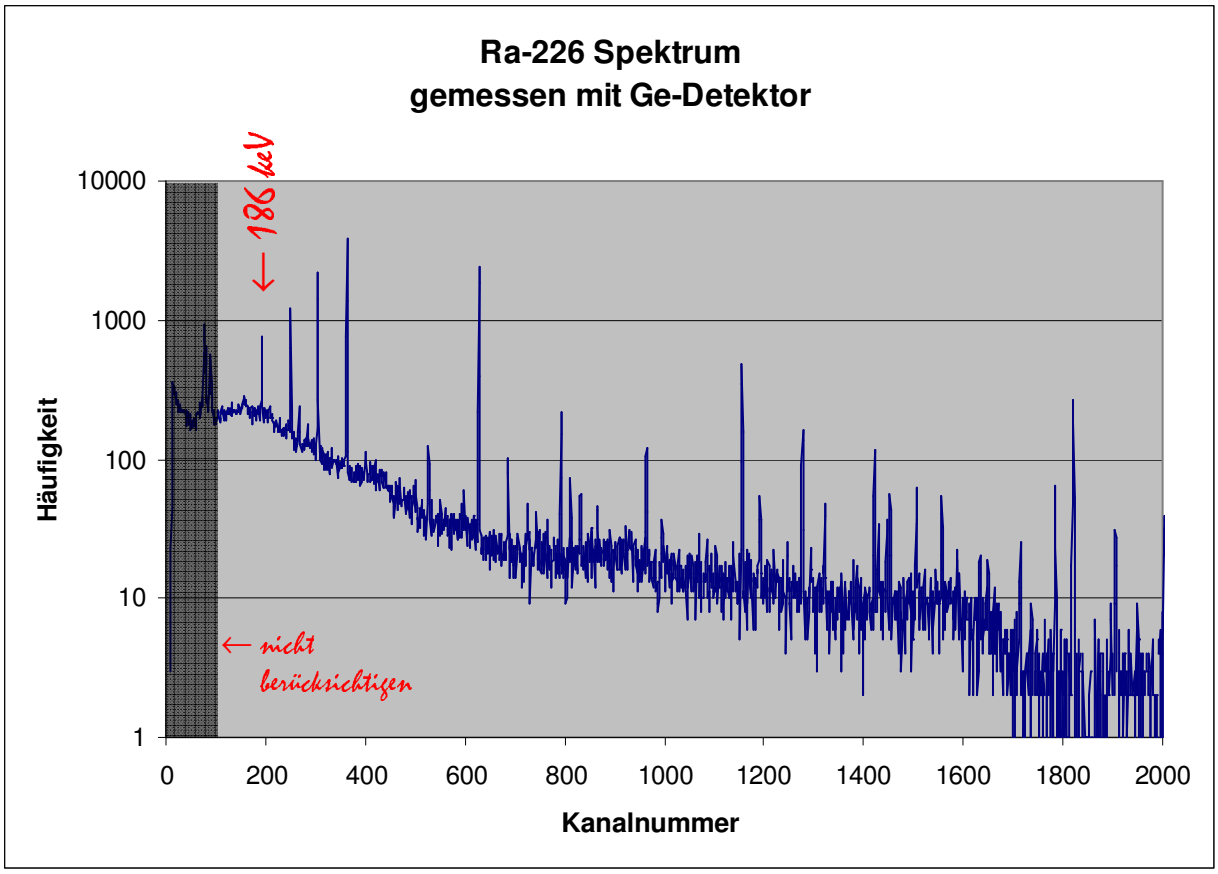


Wem die Rechnung zu schwierig erscheint, der kann die beiden Punkte auch in ein Koordinatensystem eintragen (Millimeterpapier liegt beim Experiment): Kanalnummer auf der x-Achse, γ-Energie in keV auf der y-Achse und anschließend durch die beiden Punkte eine Gerade legen (linkes Bild).
Damit hat man eine sog. „Eichgerade", mit deren Hilfe man nun auch bei jeder künftigen Messung aus der Kanalnummer die γ-Energie in keV entnehmen kann.

V.4. Elementanalyse mit hochauflösender Gammaspektroskopie

V.4.1. Das Spektrum von Ra-226

☞ Bitten Sie den Betreuer um die Ra-226-Quelle, nehmen Sie das Gamma-Spektrum mit einer Messzeit von 300 Sekunden auf und stellen Sie es genau wie in V3.2 beschrieben in EXCEL dar. Vergleichen Sie es mit dem Na-22-Spektrum.



Hatte das Na-22 nur zwei γ-Linien, so gibt es im Ra-226-Spektrum eine Vielzahl solcher Linien. Beachten Sie, dass in der Abbildung die Häufigkeiten auf der y-Achse in dem abgebildeten Ra-226-Spektrum logarithmisch dargestellt sind, um die Linien gegenüber dem Untergrund besser hervortreten zu lassen. Mit dem Mauszeiger (ohne zu Klicken) können Sie die Kanalnummern einzelner Linien bestimmen.

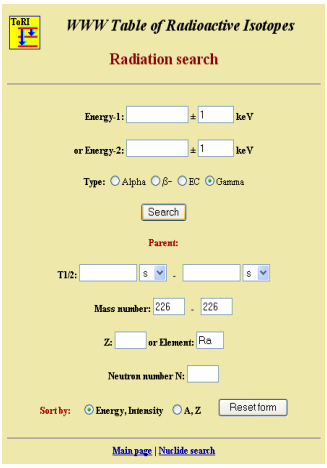
☞ Berechnen Sie mit Hilfe der Eichung in V.3.3 möglichst viele der von Ra-226 emittierten γ-Energien in keV (Kanalnummern < 100 bleiben unberücksichtigt).

☞ Drucken Sie das Spektrum aus und schreiben Sie die γ-Energien wie in der Abbildung oben einfach per Hand an den zugeörigen „Peak“.

Warum das Ra-226-Spektrum im Vergleich zu Na-22 so viele γ-Linien aufweist, soll im nächsten Abschnitt untersucht werden.

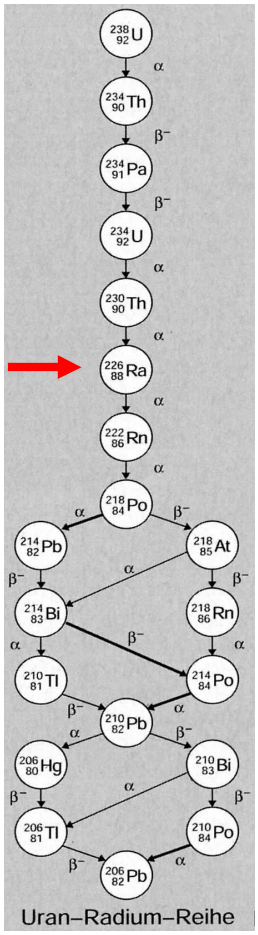
V.4.2. Identifizierung radioaktiver Isotope

Sucht man in einer Datenbank (z.B. bei http://ie.lbl.gov/toi/radSearch.asp (Abbildung) nach den Gammaenergien des Isotops Ra-226, dann stellt man fest, dass dieses Isotop mit nennenswerter Intensität (3,59%) nur Gamma-Quanten mit der Energie 186,211 keV abstrahlt.



Die vielen weiteren Linien im Spektrum der Radium-226-Quelle stammen gar nicht von dem Ra-226-Isotop, sondern von den radioaktiven Tochternukliden, die beim Zerfall von Ra-226 entstehen, und die sich im Laufe der Lebensdauer der Quelle in dem Strahlerstift angereichert haben.

Ra-226 gehört zu der Uran-Radium-Zerfallsreihe, die ihren Ursprung in dem Uranisotop U-238 hat.



Durch aufeinanderfolgende α- und β-Zerfälle entstehen nacheinander viele weitere radioaktive Nuklide (sog. „Töchter“), die im rechten Bild aufgeführt sind. Am Ende dieser Reihe entsteht das stabile Pb-206-Isotop, das nicht mehr weiter zerfällt und daher den Abschluss der Uran-Radium-Reihe bildet.

Nach jedem α- bzw. β-Zerfall befindet sich das neuentstandene Nuklid zunächst in einem „angeregten“ Zustand und gibt seine „Anregungsenergie“ in Form von Gammastrahlung ab, um in den Grundzustand zu gelangen.

Auf der nächsten Seite sind alle Nuklide der Uran-Radium-Zerfallsreihe (Uran-238-Zerfallsreihe) mit ihren Zerfallsarten (α- oder β-Zerfall in den Spalten 3 und 4) zusammengestellt.
In der rechten Spalte sind nur die am häufigsten ausgesendeten γ-Energien in keV aufgeführt (die sog. „Emissionswahrscheinlichkeit“ der jeweiligen γ-Strahlung in Prozent ist in einer Klammer nachgestellt). Insbesondere bei Verzweigungen der Zerfallsketten muss man auf die richtige Zuordnung der Gammaenergie zu der angegebenen Zerfallsart achten.

☞ Ordnen Sie möglichst viele der von Ihnen im vorigen Abschnitt gemessenen γ-Energien den Nukliden der Uran-Radium-Zerfallsreihe zu.
Welche von Ihnen gemessenen γ-Energien kommen in der Zerfallsreihe nicht vor?

Uran-Radium-Zerfallsreihe (U-238-Zerfallsreihe)

half life $t_{1/2}$	isotope decay branch, %	α-decay energy, MeV (intensity, %)**	β-decay energy, MeV (intensity, %)**	γ-emission energy, keV; (intensity, %)*
$4.470*10^9$y	$^{238}_{92}$U 100 ↓ α	α: 4.198 (79.0) α: 4.151 (20.9)		γ: 49.55 (0.063) γ: 113.5 (0.0102)
24.10 d	$^{234}_{90}$Th 100 ↓ β		β: 0.199 (70.3) β: 0.104 (19.2) β: 0.103 (7.6)	γ: 63.28 (4.1) γ: 92.37 (2.42) γ: 92.79 (2.39)
1.17 m	$^{234m}_{91}$Pa 0.16 99.84 IT ↙ ↘ β		IT: β: 2.290 (98.2) β: 1.228 (1.007)	γ: 1001.03 (0.837) γ: 766.38 (0.294)
6.70 h $2.455*10^5$y	$^{234}_{91}$Pa $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{234}_{92}$U 100 ↙ α 100	α: 4.7746 (71.38) α: 4.7224 (28.42)	β: 0.472 (31)	γ: 945.91 (0.034) γ: 53.20 (0.123)
$7.538*10^4$y	$^{230}_{90}$Th 100 ↓ α	α: 4.6870 (76.3) α: 4.6205 (23.4)		γ: 67.67 (0.373)
1600 y	$^{226}_{88}$Ra 100 ↓ α	α: 4.7843 (94.45) α: 4.6017 (5.55)		γ: 186.21 (3.59)
3.8235 d	$^{222}_{86}$Rn 100 ↓ α	α: 5.4895 (99.92) α: 4.986 (0.078)		γ: 511 (0.076)
3.10 m	$^{218}_{84}$Po 0.020 99.980 β ↙ ↘ α	α: 6.0024 (100)	β: NO DATA	NO γ-RAYS
1.6 s 26.8 m	$^{218}_{85}$At $^{214}_{82}$Pb 99.9 100 α ↘ ↙ β	α: 6.694 (90)	β: 0.728 (42.2) β: 0.670 (48.9) β: 1.030 (6.3)	γ: 351.93 (35.1/37.6) γ: 295.22 (18.2/19.3) γ: 242.00 (7.12/7.43)
19.9 m	$^{214}_{83}$Bi 0.021 99.979 α ↙ ↘ β	α: 5.452 (53.9) α: 5.516 (39.2)	β: 3.275 (18.2) β: 1.542 (17.8) β: 1.508 (17.02) β: 1.425 (8.18) β: 1.894 (7.43)	γ: 609.31 (44.6/46.1) γ: 1764.49 (15.1/15.4) γ: 1120.29 (14.7/15.1) γ: 1238.11 (5.78/5.79) γ: 2204.21 (4.98/5.08)
1.3 m 164.3 μs	$^{210}_{81}$Tl $^{214}_{84}$Po 100 100 β ↘ ↙ α	α: 7.6868 (99.99)	β: 4.209 (30) β: 1.863 (24)	γ: 799.7 (0.0104) γ: 799.7 (0.021)
22.3 y 5.013 d	$^{210}_{82}$Pb 100 ↓ β $^{210}_{83}$Bi 100 ↓ β		β: 0.017 (80) β: 0.063 (20) β: 1.162 (99)	γ: 46.54 (4.25) NO γ-RAYS
138.376 d	$^{210}_{84}$Po 100 ↓ α	α: 5.3043 (99.99)		γ: 803.10 ($1.22*10^{-3}$)
stable	$^{206}_{82}$Pb			

*γ-emission: intensity per 100 decays in equilibrium/absolute;

**α-, β-decay: absolute intensity $\Sigma \approx 100\%$; for intensity per 100 decays multiply by branch

☞ Messen Sie bei weiteren Proben die Energie der Gammastrahlung und stellen Sie diese in einem Spektrum grafisch dar. Identifizieren Sie die entsprechenden radioaktiven Isotope anhand der Angaben unten und im Tabellenteil auf den nächsten Seiten:

- Glühstrumpf im Plastikbeutel (NICHT AUSPACKEN!)
- Armbanduhr (vom Betreuer anfordern)
- Steine vom Hohentwiel
- Diätsalz bzw. Kaliumchlorid
- Kakao, Paranüsse ...

Beachten bei Ihrer Auswertung, dass es neben den Nukliden der natürlichen Zerfallsreihen in der Natur zahlreiche weitere radioaktive Nuklide gibt (vgl. „Hintergrundwissen“).
Die wichtigsten dieser Radioisotope sind:

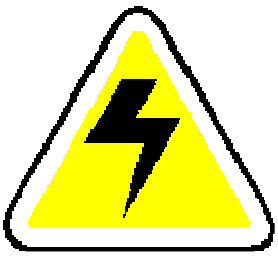
Halbwertszeit	Isotop	α-Zerfall Energie	β-Zerfall Energie, MeV(%)	γ-Emission Energie, keV(%)
12,33 y	^{3}H		β: 18,59 (100)	
53,12 d	^{7}Be			γ : 477,59 (10,5)
5730 y	^{14}C		β : 156,48 (100)	
2,6 y	^{22}Na		β : 0,546 (90,5)	γ : 1274,53 (99,9) γ : 511 (von $β^+$)
$1,277*10^{9}$ y	^{40}K		β : 44,0 (10,7) β : 1504,9 (0,047) β : 1311 (89)	γ : 1460,83 (11)

☞ Während der **Mittagspause** sollten Sie das Spektrum des Raumuntergrunds, d.h. ohne Probe, aufnehmen. Treten auch ohne Proben Linien im Spektrum auf, und wenn ja, können Sie diese interpretieren? Woher könnte der Raumuntergrund, d.h. die natürliche uns umgebende Radioaktivität, stammen?

V.4.3. Beenden des Versuchs

☞ Sofern Sie nicht mit der Untersuchung der Nachweiseigenschaften eines NaI-Detektors weitermachen möchten (mit dem Betreuer absprechen!), beenden Sie den Versuch bitte sehr sorgfältig:

- Speichern aller Dateien unter "Eigene Dateien/Experimente/Station 5".
- Schließen aller geöffneten Dateien bzw. Programme auf dem PC.
- Abschalten des PC.

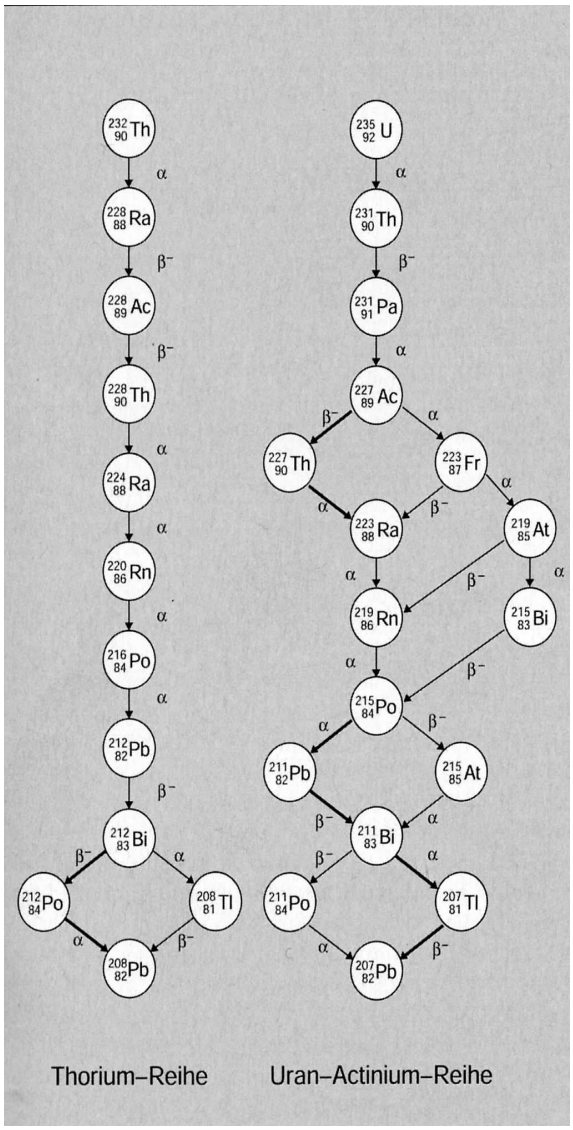


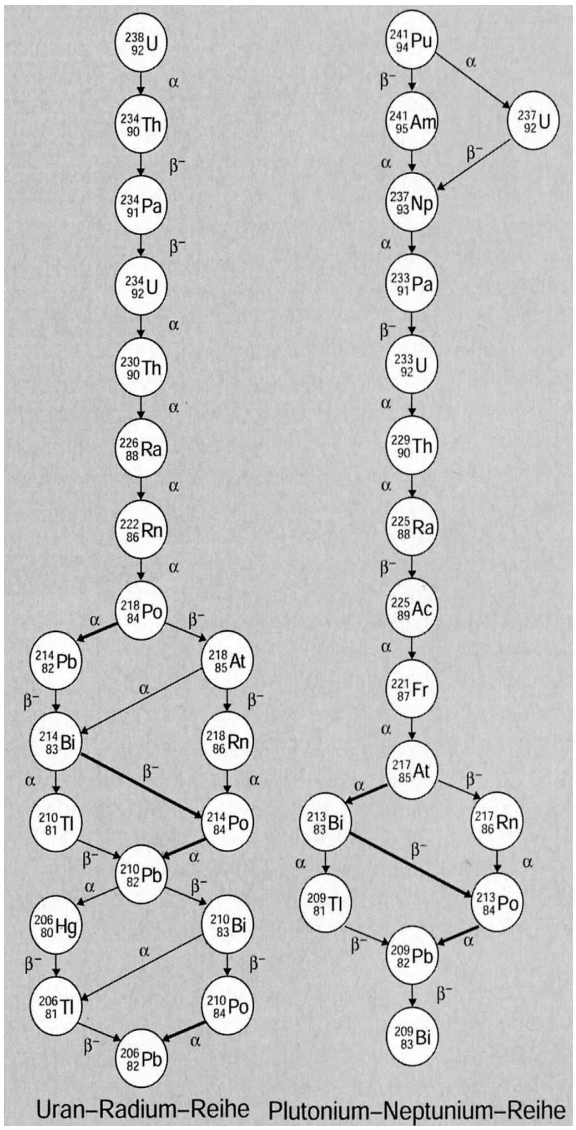
- **Herunterfahren der Hochspannung des Ge-Detektors. Gehen Sie in umgekehrter Reihenfolge und genauso behutsam vor wie in V.2.2. beschrieben.**
- Ausschalten des NaI-Detektors.
- Ausschalten der Elektronik.
- Ausschalten des Oszilloskops.
- Rückgabe radioaktiver Quellen an die Betreuer.

Vielen Dank!

V.5. Zerfallsreihen natürlicher Radionuklide

In der Erdmaterie existieren seit der Entstehung der Erde die natürlichen Radionuklide Thorium-238 und Uran-235 und Uran-238 mit sehr langer Halbwertszeit, die über viele Stufen in so genannten Zerfallsreihen zerfallen.
Dabei werden ständig Radionuklide mit zum Teil sehr kurzen Halbwertszeiten neu gebildet. Ihre wesentlichen Strahlungseigenschaften sind auf den Tabellen der folgenden Seiten zusammengestellt.





In den frühen Zeiten der Erdgeschichte existierte eine weitere Zerfallsreihe, die Plutonium-Neptunium-Reihe. Das Ausgangsglied war Pu-241, das Endglied Bi-209. Diese Zerfallsreihe ist „ausgestorben" weil Np-237 als das langlebigste Glied dieser Reihe eine - verglichen mit dem Alter der Erde - geringe Halbwertszeit von 2,144 x 10^6 Jahren hat. Nachdem aber die Transurane und damit auch Pu-241 künstlich hergestellt worden sind, existiert damit diese Zerfallsreihe im Prinzip wieder.

V.5.1. Thorium-232-Zerfallsreihe

ISuS© THORIUM-232 DECAY CHAIN

half-life $t_{1/2}$	isotope decay branch, %	α-decay energy, MeV (intensity, %)**	β-decay energy, MeV (intensity, %)**	γ-emission energy, keV (intensity, %)*
$1.405*10^{10}$ y	$^{232}_{90}$Th 100 ↓ α	α: 4.0123 (78.2) α: 3.9472 (21.7)		γ: 63.81 (0.263) γ: 140.88 (0.021)
5.75 y	$^{228}_{88}$Ra 100 ↓ β		β: 0.039 (40) β: 0.013 (30)	γ: 13.42 (1.6) γ: 16.2 (0.72)
6.15 h	$^{228}_{89}$Ac 100 ↓ β		β: 1.158 (29.9) β: 1.731 (11.66) β: 2.069 (8.6) β: 0.596 (8.0) β: 1.004 (5.92) β: 0.974 (5.1)	γ: 911.20 (25.8) γ: 968.97 (15.8) γ: 338.32 (11.27) γ: 964.77 (4.99) γ: 463.00 (4.40) γ: 794.95 (4.25)
1.9131 y	$^{228}_{90}$Th 100 ↓ α	α: 5.4232 (72.2) α: 5.3404 (27.2) α: 5.221 (0.420)		γ: 84.37 (1.22) γ: 215.98 (0.254) γ: 131.63 (0.130)
3.66 d	$^{224}_{88}$Ra 100 ↓ α	α: 5.6854 (94.92) α: 5.4486 (5.06)		γ: 240.99 (4.10) γ: 292.70 (0.0062)
55.6 s	$^{220}_{86}$Rn 100 ↓ α	α: 6.2881 (99.89) α: 5.747 (0.114)		γ: 549.73 (0.114)
0.145 s	$^{216}_{84}$Po 100 ↓ α	α: 6.7783 (100)		γ: 804.9 (0.0019)
10.64 h	$^{212}_{82}$Pb 100 ↓ β		β: 0.335 (82.5) β: 0.574 (12.3) β: 0.159 (5.17)	γ: 238.63 (43.3) γ: 300.09 (3.28) γ: 115.18 (0.592)
60.55 m	$^{212}_{83}$Bi 35.94 64.06 α ↙ ↘ β	α: 6.0508 (70.2) α: 6.0899 (26.8)	 β: 2.248 (55.46) β: 1.521 (4.36)	γ: 39.86 (27.7) γ: 288.07 (0.45) γ: 727.33 (6.67) γ: 1620.50 (1.50)
3.053 m 0.298 μs	$^{208}_{81}$Tl 100 β ↘ $^{212}_{84}$Po 100 ↙ α	α: 8.785 (100)	 β: 1.80 (48.7) β: 1.29 (24.5) β: 1.52 (21.8) β: 1.04 (3.9)	no γ-rays observed γ: 2614.53 (35.64) γ: 583.19 (30.72) γ: 510.77 (8.13) γ: 860.56 (4.465)
stable	$^{208}_{82}$Pb			

Ref.: End of '00; Version: 3.7, August 2001

V.5.2. Uran-235-Zerfallsreihe

ISuS© URANIUM-235 DECAY CHAIN

half-life $t_{1/2}$	isotope decay branch, %	α-decay energy, MeV (intensity, %)**	β-decay energy, MeV (intensity, %)**	γ-emission energy, keV (intensity, %)*
$7.038*10^8$ y	$^{235}_{92}$U 100 ↓ α	α: 4.3987 (55) α: 4.3661 (17) α: 4.2147 (5.7) α: 4.5964 (5.0)		γ: 185.72 (57.2) γ: 143.76 (10.96) γ: 163.33 (5.08) γ: 205.31 (5.01)
25.52 h	$^{231}_{90}$Th 100 ↓ β		β: 0.288 (37) β: 0.305 (35) β: 0.206 (12.8) β: 0.287 (12)	γ: 25.64 (14.5) γ: 84.21 (6.6) γ: 89.95 (0.94) γ: 81.23 (0.89)
$3.276*10^4$ y	$^{231}_{91}$Pa 100 ↓ α	α: 5.0138 (25.4) α: 4.9513 (22.8) α: 5.0284 (20.0) α: 5.0586 (11.0) α: 4.7360 (8.4)		γ: 27.36 (10.3) γ: 300.07 (2.47) γ: 302.65 (2.19) γ: 283.69 (1.70) γ: 330.05 (1.40)
21.773 y	$^{227}_{89}$Ac 1.380 98.620 α ↙ ↘ β	α: 4.9533 (47.7) α: 4.9407 (39.6)	β: 0.046 (54)	no γ-rays observed γ: 100 (0.0092)
21.8 m 18.72 d	$^{223}_{87}$Fr 99.994 β ↘ $^{227}_{90}$Th 100 ↙ α	α: 6.0380 (24.2) α: 5.9971 (23.5) α: 5.7569 (20.4)	β: 1.13 (67)	γ: 235.97 (12.2) γ: 50.13 (7.9) γ: 256.25 (6.9)
11.435 d	$^{223}_{88}$Ra 100 ↓ α	α: 5.7162 (52.6) α: 5.6067 (25.7) α: 5.7470 (9.2) α: 5.5398 (9.2)		γ: 269.46 (13.7) γ: 154.21 (5.6) γ: 323.87 (3.93) γ: 144.23 (3.22)
3.96 s	$^{219}_{86}$Rn 100 ↓ α	α: 6.8191 (79.4) α: 6.5526 (12.9)		γ: 271.23 (10.8) γ: 401.81 (6.4)
1.781 ms	$^{215}_{84}$Po 100 ↓ α	α: 7.3862 (99.95)		γ: 438.8 (0.04)
36.1 m	$^{211}_{82}$Pb 100 ↓ β		β: 1.378 (91.30) β: 0.525 (6.32)	γ: 404.85 (3.78) γ: 832.01 (3.52)
2.14 m	$^{211}_{83}$Bi 0.276 99.724 β ↙ ↘ α	α: 6.6229 (83.77) α: 6.2782 (16.23)	β: 0.584 (100)	γ: 351.06 (12.92) no γ-rays observed
0.516 s 4.77 m	$^{211}_{84}$Po 100 α ↘ $^{207}_{81}$Tl 100 ↙ β	α: 7.4503 (98.89)	β: 1.436 (99.73)	γ: 897.77 (0.260) γ: 897.8 ($1.55*10^{-3}$)
stable	$^{207}_{82}$Pb		Ref.: End of '00	Version: 3.7, August 2001

V.5.3. Uran-238-Zerfallsreihe

ISuS© URANIUM-238 DECAY CHAIN

half-life $t_{1/2}$	isotopes decay branch, %	α-decay energy, MeV (intensity, %)**	β-decay energy, MeV (intensity, %)**	γ-emission energy, keV (intensity, %)*
$4.468*10^9$ y	$^{238}_{92}$U 100 ↓ α	α: 4.198 (79.0) α: 4.151 (20.9)		γ: 49.55 (0.062) γ: 113.5 (0.0102)
24.10 d	$^{234}_{90}$Th 100 ↓ β		β: 0.199 (70.3) β: 0.104 (19.2) β: 0.103 (7.6)	γ: 63.29 (4.11) γ: 92.37 (2.42) γ: 92.79 (2.39)
1.17 m	$^{234m}_{91}$Pa 0.16 99.84 IT ↙ ↘ β		IT β: 2.290 (98.2) β: 1.228 (1.007)	γ: 73.92 γ: 1001.03 (0.838) γ: 766.36 (0.317)
6.70 h $2.455*10^5$ y	$^{234}_{91}$Pa $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{234}_{92}$U 100 ↙ α 100	α: 4.7746 (71.38) α: 4.7224 (28.42)	β: 0.472 (31)	γ: 131.30 (0.0286) γ: 53.20 (0.123)
$7.538*10^4$ y	$^{230}_{90}$Th 100 ↓ α	α: 4.6877 (76.3) α: 4.6205 (23.4)		γ: 67.67 (0.38)
1600 y	$^{226}_{88}$Ra 100 ↓ α	α: 4.7843 (94.45) α: 4.601 (5.55)		γ: 186.21 (3.59)
3.8235 d	$^{222}_{86}$Rn 100 ↓ α	α: 5.4895 (99.92) α: 4.986 (0.078)		γ: 510 (0.076)
3.10 m	$^{218}_{84}$Po 0.020 99.980 β ↙ ↘ α	α: 6.0024 (100)	β: no data	no γ-rays observed
1.6 s 26.8 m	$^{218}_{85}$At 99.9 α ↘ $^{214}_{82}$Pb 100 ↙ β	α: 6.694 (90)	β: 0.728 (42.2) β: 0.670 (48.9) β: 1.030 (6.3)	γ: 351.93 (35.1/37.6) γ: 295.22 (18.15/19.3) γ: 242.00 (7.12/7.43)
19.9 m	$^{214}_{83}$Bi 0.021 99.979 α ↙ ↘ β	α: 5.450 (53.9) α: 5.513 (39.2)	β: 3.275 (18.2) β: 1.542 (17.8) β: 1.508 (17.02) β: 1.425 (8.18) β: 1.894 (7.43)	γ: 609.31 (44.6/46.1) γ: 1764.49 (15.1/15.4) γ: 1120.28 (14.7/15.1) γ: 1238.11 (5.78/5.79) γ: 2204.21 (4.98/5.08)
1.3 m 164.3 μs	$^{210}_{81}$Tl 100 β ↘ $^{214}_{84}$Po 100 ↙ α	α: 7.6869 (99.99)	β: 4.209 (30) β: 1.863 (24)	γ: 799.7 (0.0104) γ: 799.7 (0.021)
22.3 y 5.013 d	$^{210}_{82}$Pb 100 ↓ β $^{210}_{83}$Bi 100 ↓ β		β: 0.017 (80) β: 0.063 (20) β: 1.162 (99)	γ: 46.54 (4.25) no γ-rays observed
138.376 d	$^{210}_{84}$Po 100 ↓ α	α: 5.3043 (100)		γ: 803.10 ($1.21*10^{-3}$)
stable	$^{206}_{82}$Pb		Ref.: End of '00	Version: 3.7, August 2001

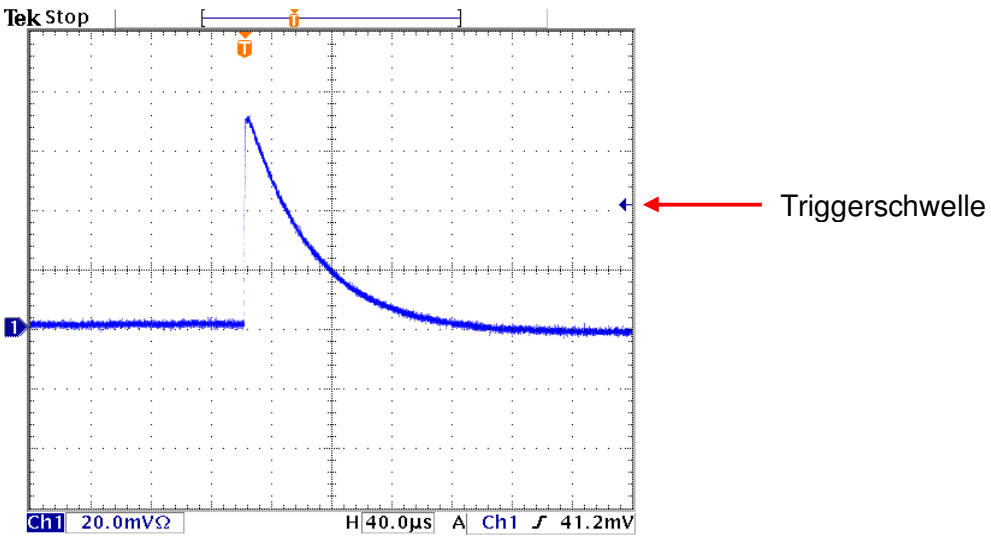
V.6. Vergleich der Detektoreigenschaften von NaI und Ge (optional)

Der Experimentaufbau enthält noch einen sogenannten Natriumiodid-Detektor (NaI). Dieser Detektortyp ist weit verbreitet und wird in vielen Experimenten in der GSI eingesetzt.

V.6.1. Inbetriebnahme des NaI-Detektors

☞ Schalten Sie die Versorgungsspannung an der Rückseite des NaI-Detektors ein (Abbildung). Der NaI-Detektor ist nun in Betrieb.

☞ Überprüfen Sie die Messsignale des NaI-Detektors am Oszilloskop. Schließen Sie dazu das Signalkabel ("NaI-Detektor") an den Oszilloskopeingang Channel 1 (CH1) an. Günstige Einstellungen für das Oszilloskop sind für die x-Richtung eine Ablenkgeschwindigkeit von 40 µs (pro cm) und für die y-Richtung eine Verstärkung von 20 mV (pro cm). Man beobachtet positive Signale mit einer sehr steilen Anstiegsflanke und einer im Verhältnis dazu langen abfallenden Flanke wie in dem folgenden Bild. Falls keine Signale sichtbar sind, sollten Sie die Triggerschwelle verändern.



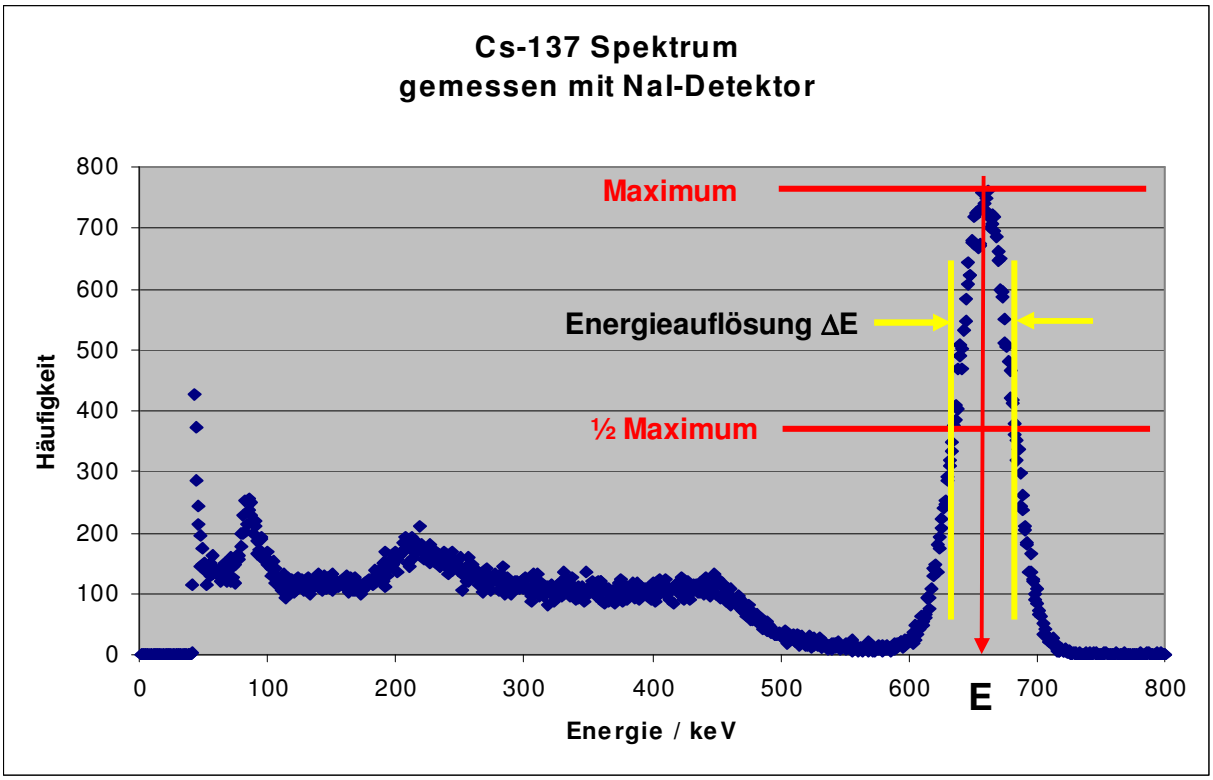
☞ Wenn die Messsignale des NaI-Detektors zufriedenstellend aussehen, können Sie das Signalkabel nun mit dem NaI-Hauptverstärker verbinden (Anschluss "INPUT") und den Ausgang „UNI“ über das Kabel ("PC/MCA") mit dem PC verbinden. Bitten Sie den Betreuer noch einmal um die Cs-137-Quelle, stellen Sie diese genau in die Mitte zwischen NaI- und Ge-Detektor und nehmen Sie mit jedem Detektor ein Spektrum auf.

V.6.2. Die Energie-Auflösung

Zur Beurteilung der Eigenschaften von Detektoren gibt es zwei wichtige Kenngrößen: die Energie-Auflösung und die Nachweis-Effizienz. Die Auflösung eines Detektors schlägt sich in der Breite einer Linie im Spektrum nieder. Üblicherweise wird dazu die „Breite“ der Linie beim halben Maximum gemessen.

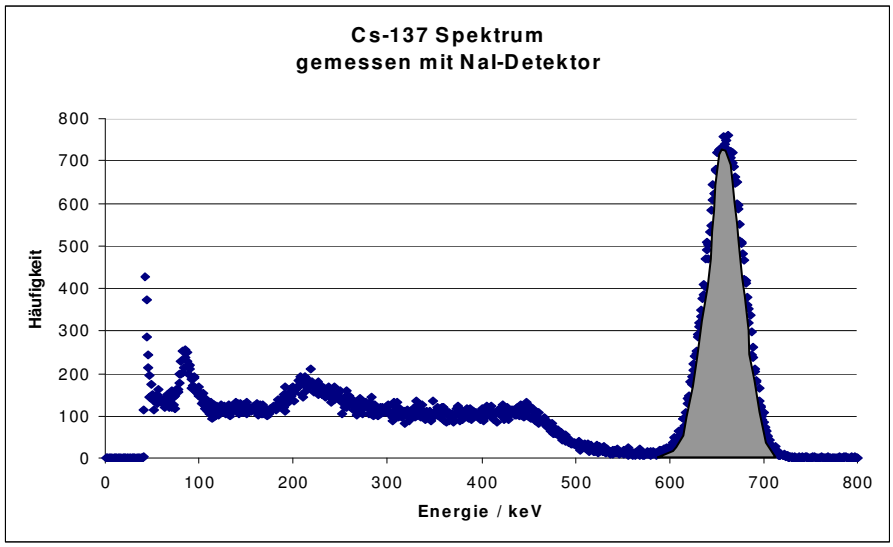
In einem geeichten Spektrum ist dies dann ein Energiebereich ΔE, der angibt, wie stark „verschmiert“ die eingestrahlte Gamma-Energie E von dem Detektor nachgewiesen wird. Meist wird die relative Energie-Auflösung ΔE/E angegeben: je kleiner diese Zahl, desto besser ist die Energieauflösung des Detektors.

☞ Um die Eigenschaften des NaI-Detektors mit denen des Ge-Detektors zu vergleichen, bietet sich die 661,7-keV-Linie im Cs-137-Spektrum an. Stellen Sie für jeden Detektor jeweils einen Ausschnitt der Cs-137-Spektren mit dieser Linie in Excel dar und bestimmen Sie die relative Energieauflösung des NaI- und des Ge-Detektors. Für die Bestimmung der Energie-Auflösung des NaI-Detektors genügt es, als Eichgerade eine Ursprungsgerade durch den 661,7-keV-Punkt anzunehmen.



V.6.3. Die Nachweis-Effizienz

Unter Nachweis-Effizienz versteht man den Prozentsatz, mit dem die in einen Detektor einfallenden Gammaquanten dort auch nachgewiesen werden. Fallen z.B. 1000 Gammaquanten in einen Zähler ein, der davon nur 500 nachweist, so beträgt die Nachweis-Effizienz 50%.



☞ Summieren Sie alle zu der 661,7-Linie gehörenden Häufigkeiten auf und vergleichen Sie damit die Nachweis-Effizient von NaI- und Ge-Detektor. Was fällt Ihnen auf?

Die Bestimmung der Effizienz von Detektoren ist eine äußerst schwierige Aufgabe, da sehr viele Faktoren darauf Einfluss nehmen. Die in diesem Versuch ermittelten Werte können Ihnen lediglich einen Eindruck über die Eigenschaften der beiden Detektortypen vermitteln. Dabei sollten Sie vor allem darauf achten, dass bei der Messung die Quelle in der Mitte der beiden Detektoren gestanden hat und dass die Messzeit ("Live"-time) für die beiden Spektren gleich gewesen ist. Beachten Sie außerdem, dass der NaI-Detektor (5,5 cm Durchmesser) kleiner ist als der Ge-Detektor (8 cm Durchmesser).

☞ Welchen Vorteil hat eine hohe Energieauflösung, welchen eine hohe Effizienz?

V.6.4. Beenden des Versuchs

☞ Beenden Sie den Versuch bitte sehr sorgfältig:

- Speichern aller Dateien unter "Eigene Dateien/AAAExperimente/Station 5".
- Schließen aller geöffneten Dateien bzw. Programme auf dem PC.
- Abschalten des PC.
- **Herunterfahren der Hochspannung des Ge-Detektors. Gehen Sie in umgekehrter Reihenfolge und genauso behutsam vor wie in Abschnitt 2.2 beschrieben.**
- Ausschalten des NaI-Detektors.
- Ausschalten der Elektronik.
- Ausschalten des Oszilloskops.
- Rückgabe radioaktiver Quellen an die Betreuer.

Vielen Dank!

Hintergrundwissen

H.1. Radioaktivität und Strahlungsarten

Antoine-Henri Becquerel entdeckte Ende des vorigen Jahrhunderts, dass Verbindungen des Urans spontan, also ohne äußeren Einfluss, unsichtbare Strahlen aussenden. Auch bei Radium und anderen Elementen kann man diese Strahlung nachweisen. Diesen Effekt nennt man Radioaktivität. Die Strahlen können unter anderem

- Materie durchdringen
- Fotoplatten schwärzen
- Fluoreszenz hervorrufen
- Gase ionisieren, d.h. elektrisch leitend machen,

weshalb man auch von ionisierender Strahlung spricht. Radioaktivität ist eine Eigenschaft der Atomkerne. Radioaktive Atomkerne – man nennt sie Radionuklide – sind nicht stabil. Sie zerfallen ohne äußere Einwirkung und wandeln sich dabei um, oft in ein anderes wiederum radioaktives Nuklid. Erst am Ende einer solchen Zerfallsreihe steht dann ein stabiles Element. Dabei wird Energie als Strahlung in Form von Teilchen (α- oder β-Strahlung) oder elektromagnetischen Wellen (γ-Strahlung) abgegeben.

Alpha-Strahler

- α-Strahler senden Heliumkerne aus.
- Viele natürliche Radionuklide sind α-Strahler
- Die Energien der α-Strahler liegen üblicherweise zwischen 4 und 6 MeV.
- Aufgrund der großen Masse ist das Ionisierungsvermögen sehr hoch (etwa 50.000 bis 60.000 Ionen je cm Weglänge). Demzufolge ist die Abschirmung sehr einfach (ein Blatt Papier, Kleidung).

Beta-Strahler

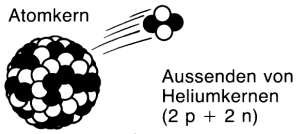
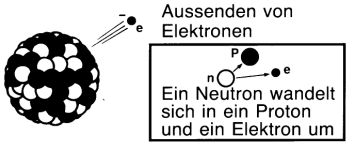
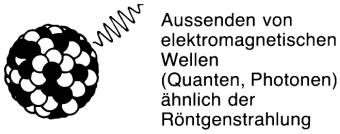
- Man unterscheidet β^-- (Elektronen-) und β^+-(Positronen-) Strahler.
- β-strahlende Radionuklide emittieren meistens auch γ-Strahlen.
- Ausnahme: reiner β-Strahler ist z. B. Strontium-90.
- Das Ionisierungsvermögen ist gering (etwa 50 Ionen je cm Weglänge). Zur Abschirmung sind einige Millimeter Plexiglas ausreichend.
- β-Teilchen weisen, im Unterschied zu α- und γ-Strahlen, ein kontinuierliches Energiespektrum auf: Zur Charakterisierung eines β-Strahlers wird die häufigste und größte β-Energie angegeben.

Gamma-Strahler

- γ-Strahlung ist hochenergetische, kurzwellige elektromagnetische Strahlung.
- γ-Strahlung tritt stets gekoppelt mit einer anderen Zerfallsart auf.
- Das Ionisierungsvermögen ist äußerst gering.
- γ-Strahlung lässt nie vollständig abschirmen sondern nur abschwächen. Die Schwächung der Strahlung folgt einer Exponentialfunktion. Zur Abschwächung einer 1MeV-γ-Strahlung auf 1% der ursprünglichen Intensität sind 10 cm Blei oder 1,5 m Wasser erforderlich.
- Jedes γ-strahlende Radionuklid emittiert ein charakteristisches γ-Spektrum. Auf diese Weise ist jedes Nuklid eindeutig identifizierbar.

- Röntgenstrahlung ist wie γ-Strahlung elektromagnetische Strahlung. Sie besitzt aber geringere Energie und entsteht im Unterschied zu γ-Strahlung in der Atom*hülle* (durch Quantensprünge von Elektronen).

Eine zusammenfassende Übersicht über die Strahlungsarten gibt die folgende Tabelle.

Strahlungsarten	typische Energie	Reichweite in Luft	Abschirmung	Beispiele
Alpha-(α-)Strahler 	**5 MeV**	**4 cm**	**1 Blatt Papier**	**Radon 222 Radium 226 Plutonium-isotope**
Beta-(β-)Strahler 	**1 MeV**	**3 m**	**0,5 cm Plexiglas**	**Kalium 40 Cäsium 137 Strontium 90**
Gamma-(γ-)Strahler 	**1 MeV**	**Abnahme mit dem Quadrat der Entfernung**	**10 cm Blei**	**nahezu alle Radionuklide**

H.2. Natürliche Radionuklide ohne Zerfallsreihen

In der Natur existieren viele Radionuklide mit extrem langer Halbwertszeit, die nur über einen einzigen Schritt zerfallen. Sie sind in der Tabelle aufgeführt. Man kann annehmen, dass es sich dabei um Radionuklide aus der Entstehungszeit der irdischen Materie handelt. Durch die sehr lange Halbwertszeit ist ihre Aktivität seit ihrer Entstehung kaum abgeklungen. Die langen Halbwertszeiten und der zum Teil geringe Anteil dieser Nuklide an der Isotopenzusammensetzung des jeweiligen Elements bedingt nur eine geringe spezifische Aktivität und damit eine vernachlässigbare Strahlenexposition.

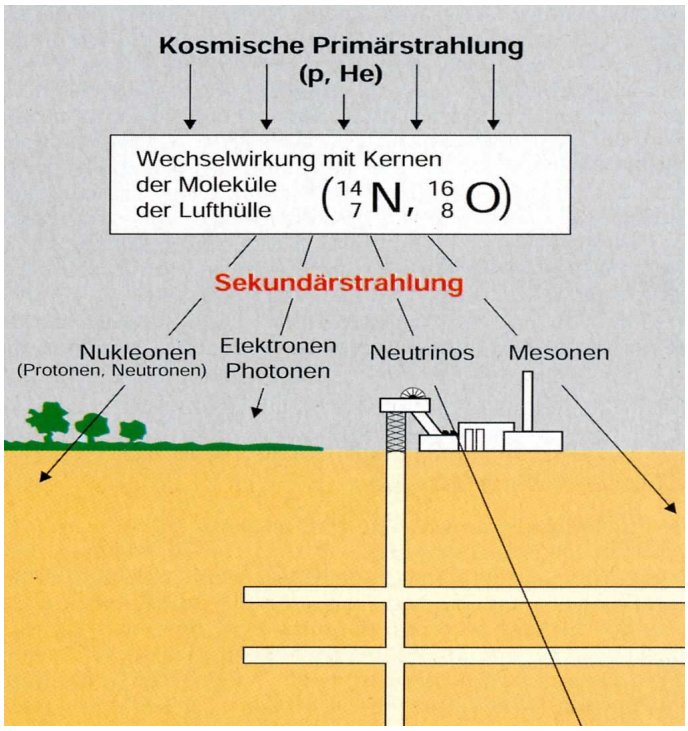
Eine Ausnahme in dieser Hinsicht stellt das Kalium-40 dar. Es hat im Vergleich zu den anderen Nukliden eine deutlich geringere Halbwertszeit und einen höheren Anteil an der Isotopenzusammensetzung. Dies führt zu einer merklichen natürlichen Strahlenexposition. Da das K-40 mit einem gewissen Anteil (0,0117%) in jeder Kaliumverbindung vertreten ist, sind auch alle Kaliumverbindungen radioaktiv. Auch der menschliche Körper enthält Kalium. Beim erwachsenen Menschen beträgt der Kaliumanteil etwa 2 g pro Kilogramm Körpergewicht; das entspricht bei einem Menschen im Durchschnitt einer Kalium-40-Aktivität im Körper von 4200 Bq.

Nuklid	Halbwertszeit in Jahren	Nuklid	Halbwertszeit in Jahren
K-40	$1{,}28 \times 10^{9}$	La-138	$1{,}05 \times 10^{11}$
V-50	$1{,}4 \times 10^{17}$	Nd-144	$2{,}29 \times 10^{15}$
Ge-76	$1{,}53 \times 10^{21}$	Nd-150	$1{,}7 \times 10^{19}$
Se-82	$1{,}08 \times 10^{20}$	Sm-147	$1{,}06 \times 10^{11}$
Rb-87	$4{,}8 \times 10^{10}$	Sm-148	7×10^{15}
Zr-96	$3{,}9 \times 10^{19}$	Gd-152	$1{,}1 \times 10^{14}$
Mo-100	$1{,}15 \times 10^{19}$	Lu-176	$3{,}8 \times 10^{10}$
Cd-113	9×10^{15}	Hf-174	$2{,}0 \times 10^{15}$
Cd-116	$2{,}6 \times 10^{19}$	Ta-180	$1{,}2 \times 10^{15}$
In-115	$4{,}4 \times 10^{14}$	Re-187	5×10^{10}
Te-123	$1{,}24 \times 10^{13}$	Os-186	2×10^{15}
Te-128	$7{,}2 \times 10^{24}$	Pt-190	$6{,}5 \times 10^{11}$
Te-130	$2{,}7 \times 10^{21}$		

H.3. Kosmische Strahlung und die Erzeugung neuer Radionuklide

Von der Sonne und anderen Sternen trifft eine energiereiche Teilchenstrahlung auf die Lufthülle unserer Erde. Diese Strahlung besteht im Wesentlichen aus Protonen, also aus Wasserstoffkernen. Sie wird *primäre kosmische Strahlung* genannt (93% Protonen, 6% Heliumkerne, 1% schwere Kerne).

Die Energie kosmischer Protonen kann mehr als 10^{14} MeV betragen. Beim Zusammenprall mit den Molekülen der Lufthülle werden Atomkerne zertrümmert. Dabei entstehen neue Kerne und Teilchen, die weiterfliegen und z. T. weitere Kerne zertrümmern, bis ihre ursprüngliche Energie aufgebraucht ist. Am Erdboden ist fast nur die Strahlung zu beobachten, die durch vielfältige Sekundärprozesse entsteht. Sie wird *sekundäre kosmische Strahlung* genannt (Abbildung).



Die wichtigsten auf diese Weise sekundär erzeugten Radionuklide sind H-3, Be-7, C-14 und Na-22. Das Radionuklid C-14 spielt z.B. bei der Altersbestimmung (mittels der sog. „Radiocarbonmethode“) eine wichtige Rolle:

Entstehung: $^{14}_{7}\mathrm{N} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \Rightarrow ^{14}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{1}\mathrm{p}$

radioaktiver Zerfall: $^{14}_{6}\mathrm{C} \xrightarrow{t_{1/2}=5730\,Jahre} ^{14}_{7}\mathrm{N} + ^{0}_{-1}\mathrm{e}$

Die gesamte natürliche C-14-Aktivität beträgt 8,5 x 10^{18} Bq. Die spezifische natürliche Aktivität von C-14 des Kohlenstoffs, der aus Bäumen gewonnen wurde, beträgt 227 Bq/kg.

Elektronen und Gammaquanten der sekundären kosmischen Strahlung besitzen nur ein geringes Durchdringungsvermögen. Sie werden bereits durch die Luft teilweise absorbiert. Die praktisch völlige Abschirmung kann durch 15 cm Blei erreicht werden.

Der Anteil von **Neutronen** an der sekundären kosmischen Strahlung ist in Meereshöhe gering, er nimmt aber mit der Höhe stark zu und bewirkt in einer Höhe von 15 km bereits rund 50 % der gesamten kosmischen Strahlenexposition in dieser Höhe.

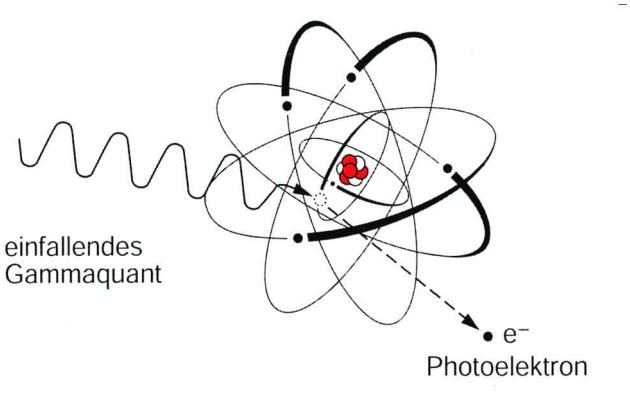
Mesonen sind Elementarteilchen, deren Masse zwischen der des Elektrons und des Protons liegt. In Meereshöhe besteht die kosmische Strahlung zu etwa 90% aus Mesonen. Sie haben eine außerordentlich kurze Lebensdauer in der Größenordnung von Sekundenbruchteilen und zerfallen - je nach ihrer Ladung - in ein Elektron oder Positron sowie zwei Neutrinos. Die Intensität der Mesonenstrahlung wird durch eine 1 m dicke Bleiplatte erst auf die Hälfte herabgesetzt. Mesonen sind deshalb noch in Bergwerken und auf dem Grund tiefer Seen nachgewiesen worden.

Die Wechselwirkungen zwischen **Neutrinos** und Materie sind außerordentlich schwach. So wird z. B. von 1 Million Neutrinos, die durch die Erdkugel fliegen, nur eines absorbiert. Sie tragen deshalb auch nicht zur Strahlenexposition bei.

H.4. Die Ionisationswirkung der radioaktiven Strahlungsarten

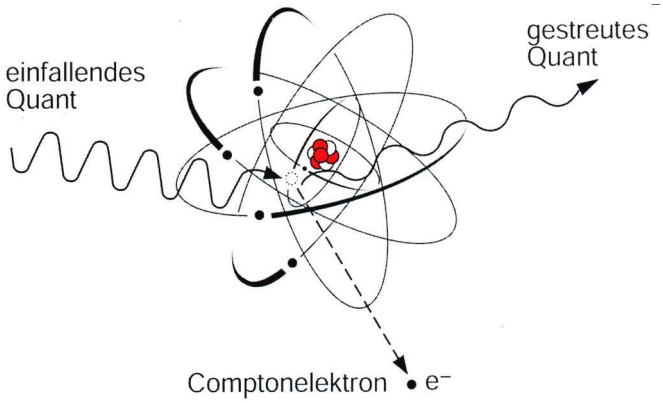
Die Ionisationswirkung dieser Strahlungsarten ist unterschiedlich. Die elektrisch geladenen α- und β- Teilchen werden, z.B. in einem Gas oder einem Festkörper, durch viele Stöße mit dortigen Atomen abgebremst, wobei sie sehr viele dieser Atome ionisieren. Sie hinterlassen so eine Spur von Elektron-Ionen-Paaren, die z.B. in der Nebelkammer als eindrucksvolle Bahnspur sichtbar gemacht werden können.

Bei der Wechselwirkung von γ-Strahlen (man spricht auch oft von γ-Quanten) mit der Materie treten verschiedene Prozesse auf, die alle zur Freisetzung von Elektronen führen:



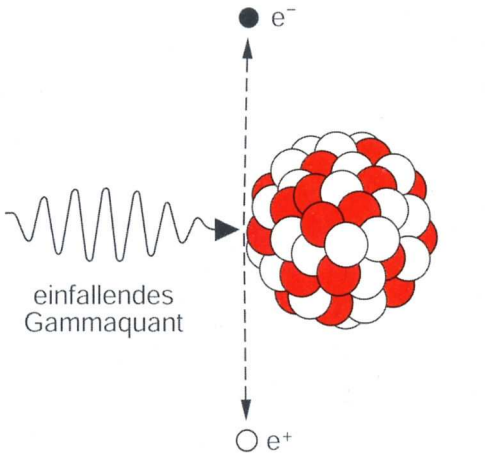
Beim **Photoeffekt** wird die gesamte Energie des einfallenden γ-Quants vom Atom absorbiert und auf ein in der Hülle des Atoms gebundenes Elektron übertragen. Das Elektron wird dadurch aus der Bindung der Atomhülle gelöst;

es entsteht ein freies Elektron und ein Ion.



Beim **Comptoneffekt** wird, ähnlich wie beim Photoeffekt, ein Elektron aus der Atomhülle freigesetzt. Es wird hierbei jedoch nicht die gesamte Energie des einfallenden γ-Quants an das Elektron übertragen und somit absorbiert, sondern nur ein Teil davon. Der andere Teil verbleibt in einem energieärmeren gestreuten γ-Quant.

Die **Paarbildung** führt zur Erzeugung eines Elektron-Positron-Paares. Das einfallende γ-Quant wird im Feld des Atomkerns in ein Teilchenpaar umgewandelt (gemäß der Einsteinschen Äquivalenz von Energie und Masse). Das Positron wird in einer anschließenden Paarvernichtung (beim Zusammentreffen mit einem anderen Elektron) wieder in Strahlung umgewandelt.



Bei allen beschriebenen Wechselwirkungen entstehen also sekundäre Elektronen, die man nachweisen kann.

H.5. Schwächung von Gamma-Strahlen

Die Abschirmung von γ-Strahlen ist wegen ihrer Wechselwirkungsmechanismen mit Materie im Vergleich zu α- und β- Teilchen verhältnismäßig schwierig. Schickt man einen Strahl γ-Quanten der Anzahl n mit der gleichen Energie („monoenergetisch“) durch Materie (z.B. Blei), so wird deren Zahl in Abhängigkeit von der Eindringtiefe immer kleiner, da ja diejenigen Quanten, die eine Wechselwirkung erfahren, aus dem Strahl ausscheiden. Die Abnahme folgt einer Exponentialfunktion. Deshalb gibt es eine für jedes Material charakteristische Schichtdicke (so genannte Halbwertsdicke) nach der nur noch die Hälfte der ursprünglich eingestrahlten γ-Quanten vorhanden ist.

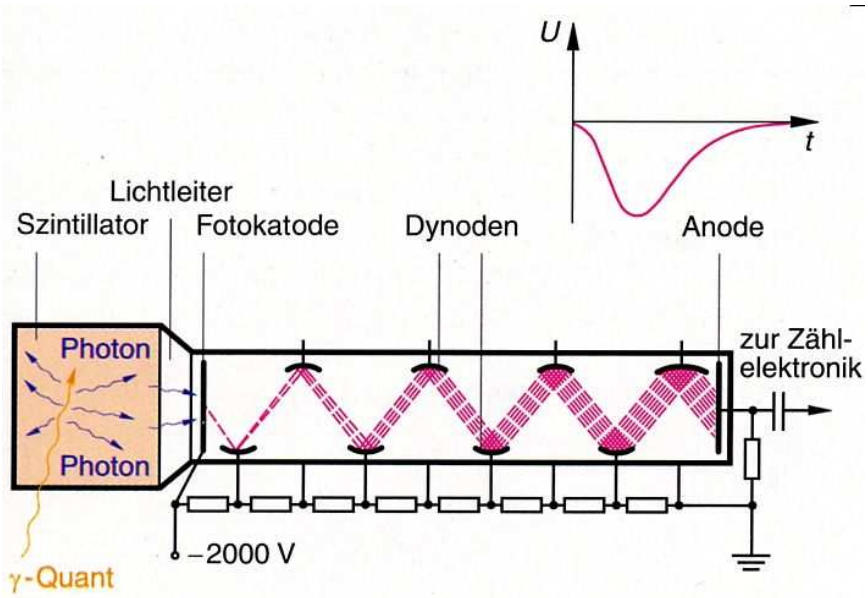
Absorbermaterial	Halbwertsdicke in cm
Blei	1,2
Eisen	1,7
Aluminium	5,2
Beton	ca. 5
Wasser	12

H.6. Nachweis von Gamma-Strahlen mit einem NaI-Szintillationszähler

Die ersten Szintillationszähler bestanden aus einem Zinksulfidschirm und einem Mikroskop. Treffen zum Beispiel α-Teilchen auf den Zinksulfidschirm, so erzeugen sie kurze Lichtblitze, die man mit einem Mikroskop beobachten kann. Mit dieser Methode untersuchte Rutherford die Streuung von α-Teilchen an Atomkernen. Da das menschliche Auge diese kurzen Lichtblitze nur unzuverlässig registriert, wurde dieses Messprinzip bald nicht mehr benutzt

und erst wieder verwendet, als es möglich wurde, die Lichtblitze mit einem Fotomultiplier (Sekundärelektronenvervielfacher) elektronisch zu verarbeiten.

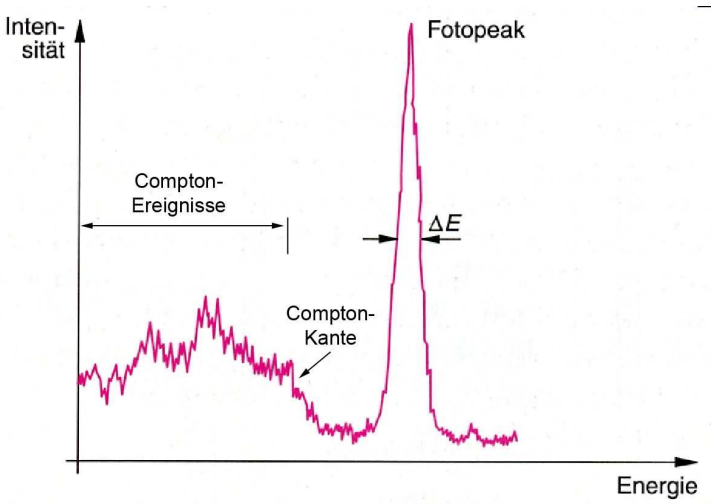
Den grundlegenden Aufbau eines Szintillationszählers zeigt die nächste Abbildung. Als Szintillatoren sind zahlreiche feste, flüssige, anorganische oder organische Stoffe geeignet. Häufig werden Natriumiodidkristalle (NaI) verwendet, die mit Thallium dotiert sind (NaI(Tl)). Die Thalliumatome dienen dabei als Leuchtzentren. Der Vorteil von Szintillationsdetektoren besteht in der von ihnen erreichbaren Größe: Kristallszintillatoren können Rauminhalte in der Größenordnung einiger Liter haben; die Rauminhalte von Plastik- oder Flüssigkeitsdetektoren sind unbegrenzt. Daher besitzen sie eine hohe Nachweiseffektivität für γ-Strahlung.



Ein γ-Quant kann im Szintillatormaterial seine gesamte Energie oder einen Teil davon auf ein Elektron übertragen. Dieses Elektron wiederum verliert seine Energie, indem es im Szintillator entlang seiner Bahn andere Elektronen in energetisch höhere Energiezustände hebt. Diese Anregungen werden durch Emission von Photonen wieder abgebaut. Ein Teil der Photonen gelangt durch einen Lichtleiter auf die Fotokatode des Fotomultipliers und löst dort Elektronen aus. Diese Elektronen werden in einer Kette von Elektroden, den so genannten Dynoden, beschleunigt, sodass ein Elektron auf jeder Dynode zwei bis fünf weitere Elektronen auslöst. Die Elektronen werden von der Anode aufgefangen und erzeugen an einem Widerstand einen Spannungsimpuls. So erreicht man Gesamtverstärkungen bis zu 10^9, das bedeutet, dass ein einzelnes Elektron in dem Fotomultiplier bis zu 1 Milliarde Sekundärelektronen erzeugt. Eine geringe Anzahl Photonen, die im Szintillator entstehen, erzeugt also am Ausgang des Multipliers einen messbaren elektrischen Impuls. Die Höhe dieses Impulses ist proportional zur Energie, die das einfallende y-Quant im Szintillator an das Elektron abgegeben hat.

Die Spannungsimpulse werden durch eine Zählerelektronik verarbeitet. Der zur Energie des registrierten γ-Quants proportionale Ausgangsimpuls des Multipliers wird von der Elektronik verstärkt und geformt. Seiner Größe entsprechend wird dem Impuls eine digitale Zahl zugeordnet, die dann registriert wird. Auf diese Weise können die Impulse gezählt oder nach Umwandlung in eine zur Anzahl proportionale Spannung angezeigt werden. So ist es möglich, ein Energiespektrum der γ -Strahlung eines radioaktiven Präparates aufzunehmen.

Die Abbildung zeigt ein Spektrum, das man durch die monoenergetische γ-Strahlung eines Natrium-22-Präparats erhält. Die nach rechts abgetragene Energie ist der Höhe der regist-



rierten Primärimpulse proportional, die Anzahl der in einem Zeitintervall registrierten Impulse einer bestimmten Höhe entspricht der Intensität. Man erkennt ein relativ scharfes Maximum, den so genannten Fotopeak, der dadurch zustande kommt, dass das γ-Quant in einem einzigen Prozess, dem Fotoeffekt, seine gesamte Energie an ein Elektron abgibt. Das Elektron erzeugt dann im Kristall die Anregungen und bei deren Abbau die als Lichtblitze registrierten Photonen. Außer dem Fotopeak wird offenbar noch Strahlung geringerer Energie registriert. Hierfür ist der mit den Elektronen im Kristall stattfindende Comptoneffekt verantwortlich. Das γ-Quant gibt dabei nur einen Teil seiner Energie an ein Elektron ab. Der Betrag der abgegebenen Energie hängt vom Streuwinkel ab und hat seinen höchsten Wert für eine Rückwärtsstreuung des γ-Quants. Auch die Energie der an diesem Prozess beteiligten Elektronen wird wie oben als ein Lichtblitz bestimmter Intensität registriert. Die Compton-Kante im Spektrum entsteht also durch die Elektronen, die ihre Energie bei einer Rückwärtsstreuung erhalten haben. Ferner wird Strahlung mit einer Energie registriert, die kleiner ist als die Energie der Compton-Kante. Hierfür sind die Streuprozesse mit Winkeln kleiner als 180° verantwortlich.

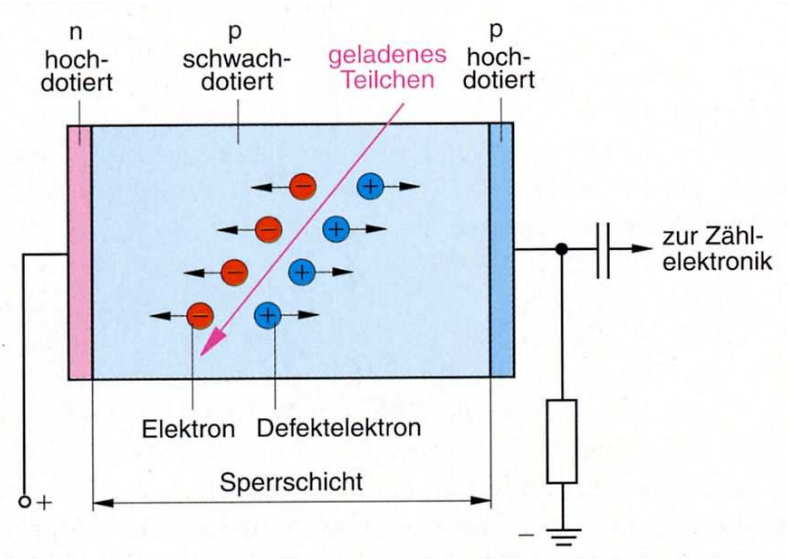
Der Fotopeak des Szintillationsspektrums hat in halber Höhe eine Breite ΔE. Diese Breite kommt durch stochastische Schwankungen beim Prozess der Registrierung der Strahlung zustande: Das γ-Quant erzeugt ein Fotoelektron, das auf seinem Weg durch den Szintillator eine große Anzahl von Lichtquanten hervorruft. Die Zahl der Lichtquanten ist der Energie des γ-Quants proportional. Von diesen Lichtquanten trifft jedoch nur ein Teil auf die Fotokathode; ein anderer Teil wird im Szintillator und im Lichtleiter zwischen Szintillator und Fotokathode absorbiert. Die auf die Fotokathode des Multipliers auftreffenden Lichtquanten lösen aus dieser mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,05 bis 0,1 Elektronen aus. Man erkennt, dass die Zahl der im Multiplier erzeugten Elektronen um Größenordnungen geringer ist als die Zahl der im Szintillator erzeugten Lichtquanten. Die Schwankungen der Zahl der primär im Multiplier erzeugten Elektronen bestimmt also die Breite ΔE des Fotopeaks und damit die Energieauflösung ΔE/E. Da es γ-Spektren gibt, deren Energiewerte dicht zusammenliegen, können diese von einem Szintillationszähler nicht mehr getrennt werden.

Zusammenfassung: In Szintillationsdetektoren übertragen γ-Quanten ihre Energie an Elektronen, die im Material Lichtquanten auslösen. Szintillationszähler besitzen eine hohe Nachweiseffektivität für γ-Strahlung. Ihr Nachteil besteht in der relativ geringen Energieauflösung ΔE/E von nur etwa 10%.

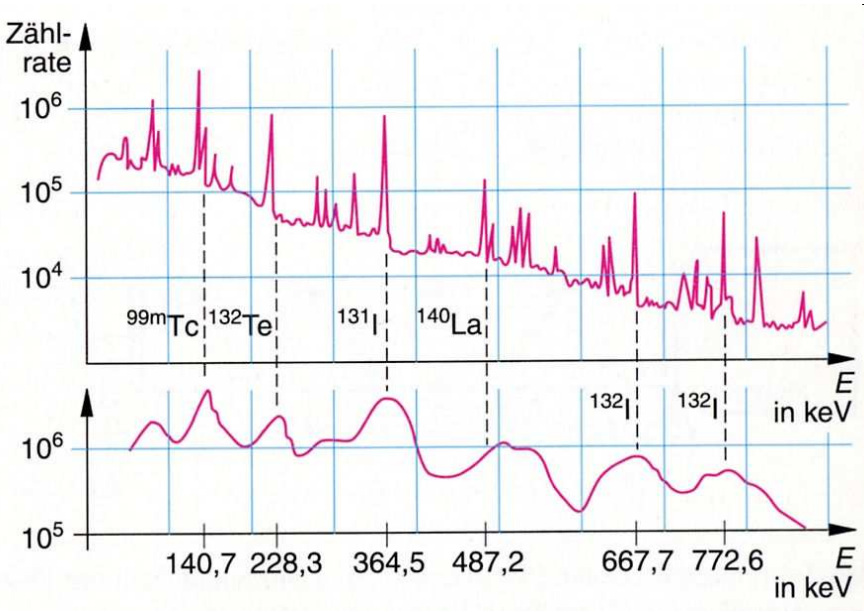
H.7. Nachweis von Gamma-Strahlen mit einem Ge-Detektor

Die Funktionsweise von Halbleiterdetektoren beruht auf der Ausnutzung der Eigenschaften des Grenzbereiches zwischen zwei unterschiedlich dotierten Bereichen eines Halbleiters. Da aus dem n-dotierten Bereich Elektronen in den p-Bereich wandern und aus dem p-dotierten Bereich Defektelektronen in den n-Bereich und sich die Ladungen gegenseitig kompensieren, entsteht eine schmale ladungsträgerfreie Zone, die so genannte Sperrschicht. Wird der n-Bereich mit dem Pluspol und der p-Bereich mit dem Minuspol einer Spannungsquelle

verbunden, so verbreitert sich die Sperrschicht. Wenn nun in dieser Sperrschicht durch den Durchgang eines Elektrons oder eines anderen Ladung tragenden Teilchens Elektronen und Defektelektronen gebildet werden, so fließen sie im elektrischen Feld zu den Elektroden ab und es kommt zu einem kurzzeitigen Strom, der mit einer nachgeschalteten Elektronik registriert wird (vgl. Abbildung). Zur Erzeugung eines Ladungspaares Elektron-Defektelektron werden bei Germanium ca. 2,9 eV und bei Silizium ca. 3,75 eV benötigt.



Ein Halbleiterdetektor funktioniert also ähnlich wie eine Ionisationskammer, jedoch ist die Dichte der Materie im Halbleiter wesentlich höher. Der entscheidende Vorteil der Halbleiterdetektoren gegenüber anderen ist seine hohe Energieauflösung: Das Bild unten zeigt ein γ-Spektrum, einmal aufgenommen mit einem Germaniumdetektor und darunter aufgenommen mit einem Szintillationszähler. Das erheblich bessere Energieauflösungsvermögen des Halbleiterdetektors kommt dadurch zustande, dass wegen des geringen Energieverlustes pro erzeugtem Ladungsträgerpaar sehr viele Ladungsträger entstehen und diese auch alle zu dem registrierten Spannungsimpuls beitragen.



Der Nachteil von Halbleiterdetektoren ist ihre Temperaturempfindlichkeit. So werden in der Sperrschicht mit zunehmender Temperatur immer mehr Ladungsträgerpaare erzeugt, wodurch ein ständiger Ladungsträgerfluss entsteht, der den Ladungsträgerfluss durch die Registrierung eines Teilchens überlagert und so die Auswertung erschwert. Aus diesem Grund wird auch der im Experiment verwendete Reinstgermanium-Detektor auf die Temperatur von flüssigem Stickstoff (-196 °C) gekühlt.

H.8. Verstärkung und Formung der Detektorimpulse

Vorverstärker

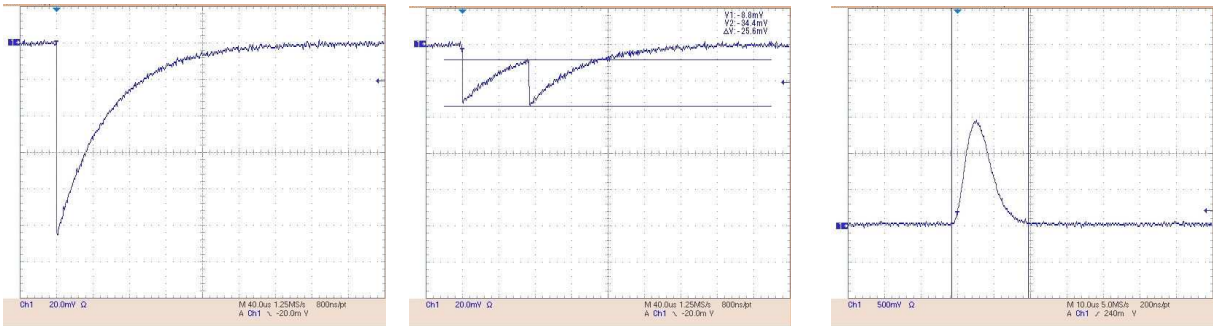
Die Hauptaufgabe eines Vorverstärkers ist es, die schwachen Signale eines Detektors zu verstärken und durch ein Kabel zu treiben, das den Vorverstärker mit der restlichen Elektronik verbindet. Gleichzeitig darf er nur so wenig Rauschen wie möglich hinzufügen. Bei Detektoren, die über eine interne Verstärkung verfügen (z.B. Fotomultiplier), ist das Rauschen des Vorverstärkers weniger kritisch. Hier ist wichtigste Aufgabe des Vorverstärkers, eine Impedanzanpassung zwischen Detektor (großer Arbeitswiderstand), Kabel und Elektronik (kleiner Endwiderstand) durchzuführen.

Hauptverstärker

Ein Hauptverstärker hat die folgenden zwei Aufgaben:

- Verstärkung des Signals des Vorverstärkers
- Impulsformung zur weiteren elektronischen Signalverarbeitung

In beiden Fällen darf der Hauptverstärker die gewünschte Information nicht verändern. So ist für Zeitmessung ein schnelles Ansprechvermögen und für Impulshöhenmessung eine strenge Proportionalität zwischen Ein- und Ausgangssignal gefordert. Bei den meisten Hauptverstärkern lässt sich die Verstärkung über einen weiten Bereich einstellen. Einer der wichtigsten Eigenschaften für Spektroskopie-Verstärker ist die Impulsformung. Hier ist das Eingangssignal üblicherweise ein exponentielles mit einer Länge von etwa 10µs und einer zur Energie proportionalen Amplitude.



Trifft nun innerhalb dieser Zeit ein zweites Signal ein, summieren sich die Amplituden und die Signale werden deformiert („pile-up"). Um diesen Effekt zu vermeiden, werden die Impulse durch Formung verkürzt. Ein zweiter Grund für die Impulsformung ist eine Optimierung des Signal-Rausch-Verhältnis. Die exponentielle Form der Impulse ist in dieser Hinsicht ungeeignet. Deshalb versucht man das Signal durch mehrere Differentiationen und Integrationen in ein gauss- oder dreiecksförmiges Signal zu verwandeln. Die Oszillogramme zeigen diese Pulsformen: links sieht man das exponentiell abklingende Signal des Ge-Detektors nach dem Vorverstärker, in der Mitte erkennt man ein „pile-up"-Ereignis: auf die exponentiell abfallende Flanke eines Signals wird ein zweites, zeitlich sehr rasch

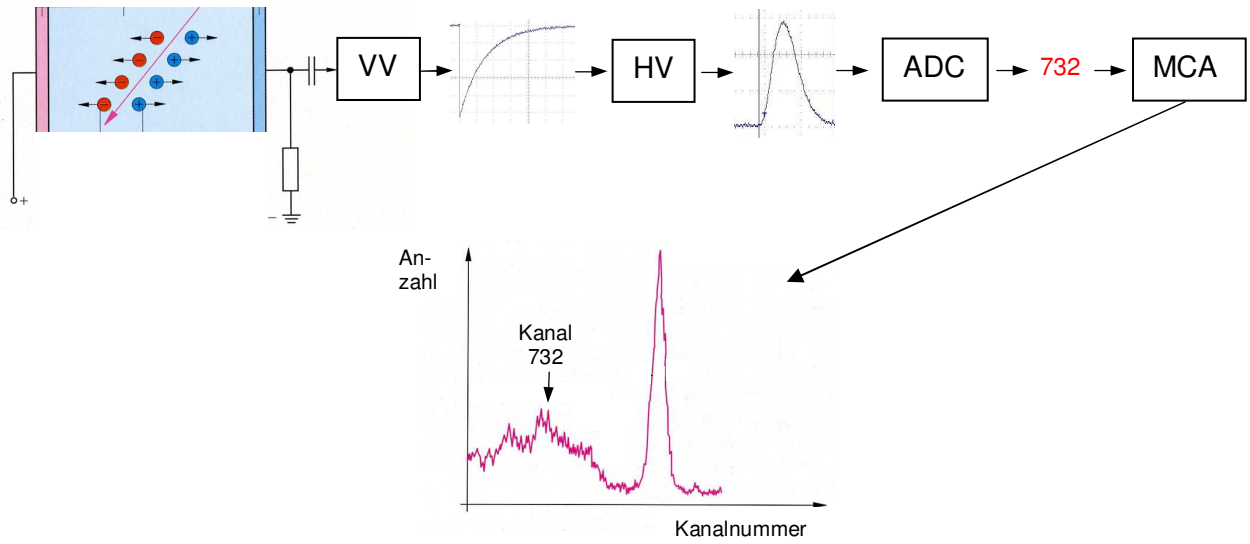
nachfolgendes Signal addiert. Im rechten Oszillogramm schließlich erkennt man die „Glockenform“ des Signals nach dem Hauptverstärker.

H.9. Impulshöhenanalyse (MCA)

Vielkanalanalysator (Multi-Channel-Analyser)

Vielkanalanalysatoren sind Geräte, die Eingangssignale nach deren Pulshöhen in Kanäle einsortieren. In einem Speicher zählen sie die Anzahl der Pulse in jedem Kanal. Ein Vielkanalanalysator funktioniert, indem er die Amplitude eines analogen Eingangssignals mit einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert und den Speicher, dessen Adresse dem digitalisierten Signal entspricht, um Eins erhöht. Die Auflösung eines Vielkanalanalysators ist also durch die Anzahl der einzelnen Kanäle gegeben. Kommerzielle Vielkanalanalysatoren haben zwischen 128 bis 8192 Kanäle.

Betrachten wir zusammenfassend den gesamten Informationsverlauf eines in den Ge-Detektor eingefallenen γ-Quants. Das γ-Quant erzeugt über einen Primärprozess (Photoeffekt, Comptoneffekt oder Paarbildung) ein energiereiches Elektron, das innerhalb des Nachweisvolumens abgebremst wird und dabei weitere Ladungsträgerpaare freisetzt. Die Ladungen werden gesammelt und über einen Kondensator an den Vorverstärker (VV) weitergeleitet. Es entsteht der bereits beschriebene exponentiell abfallende Spannungsimpuls, der im Hauptverstärker (HV) in einen glockenförmigen Impuls umgewandelt wird, dessen Amplitude der Anzahl der sekundär gebildeten Ladungen proportional ist. In einem Analog-Digital-Wandler wird dieser Amplitude eine natürliche Zahl zugeordnet (in diesem Fall die „732“). Der Vielkanalanalysator (MCA) addiert nun zu den bereits gezählten Ereignissen in dem Kanal Nr. 732 eine „1“. Auf diese Weise werden die einfallenden γ-Quanten je nach ihrer Energie in diese unterschiedlichen Kanäle einsortiert und man erhält nach einiger Zeit ein sog. Energiespektrum:



Von den abgebildeten Elektronikmodulen sind im Experiment nur die beiden Hauptverstärker zu sehen. Der ADC und der MCA sind in Form einer Einbaukarte im PC integriert und über eine spezielle Software zu bedienen.

\\Familyspeich\share\Für Axel\GSI\Station 5#\Anleitung_5#n.doc

Erstelldatum 21.10.2008 00:04:00

Zuletzt gespeichert von Gruppe

Zuletzt gedruckt 21.10.2008 00:21:00

Lessing

Zuletzt gespeichert 10/21/2008 12:07