

Schüler *Labor*

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

Station 5

γ -Spektroskopie
mit
NaI- und Ge-Detektoren

Inhalt

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. Das Impulshöhen-Analyseprogramm MAESTRO.....	9
V.3.2. Die Impulshöhen-Analyse	10
V.3.3. Darstellung eines Spektrums in Excel.....	11
V.3.3. Energiekalibrierung	13
V.4. Elementanalyse mit hochauflösender Gammaskopie.....	14
V.4.1. Radioaktive Nuklide in Lebensmitteln.....	14
V.4.2. Das Spektrum von Ra-226.....	17
V.5. Zerfallsreihen natürlicher Radionuklide.....	18
V.5.1. Identifizierung radioaktiver Isotope der Zerfallsreihe von Radium	18
V.5.2. Die Uran-238-Zerfallsreihe	19
V.5.3. Die Uran-235-Zerfallsreihe	20
V.5.4. Die Thorium-232-Zerfallsreihe.....	21
V.5.5. Beenden des Versuchs	22
V.6. Vergleich der Detektoreigenschaften von NaI und Ge (optional)	23
V.6.1. Inbetriebnahme des NaI-Detektors	23
V.6.2. Die Energie-Auflösung	24
V.6.3. Die Nachweis-Effizienz	25
V.6.4. Beenden des Versuchs	25
Hintergrundwissen	26
H.1. Radioaktivität und Strahlungsarten.....	26
H.2. Zerfallsreihen	27
H.3. Natürliche Radionuklide ohne Zerfallsreihen	28
H.4. Kosmische Strahlung und die Erzeugung neuer Radionuklide	29
H.5. Die Ionisationswirkung der radioaktiven Strahlungsarten	30
H.6. Schwächung von Gamma-Strahlen	31
H.7. Nachweis von Gamma-Strahlen mit einem Ge-Detektor	31
H.8. Verstärkung und Formung der Detektorimpulse	33
H.9. Nachweis von Gamma-Strahlen mit einem NaI-Szintillationszähler.....	34
H.10. Impulshöhenanalyse (MCA)	36

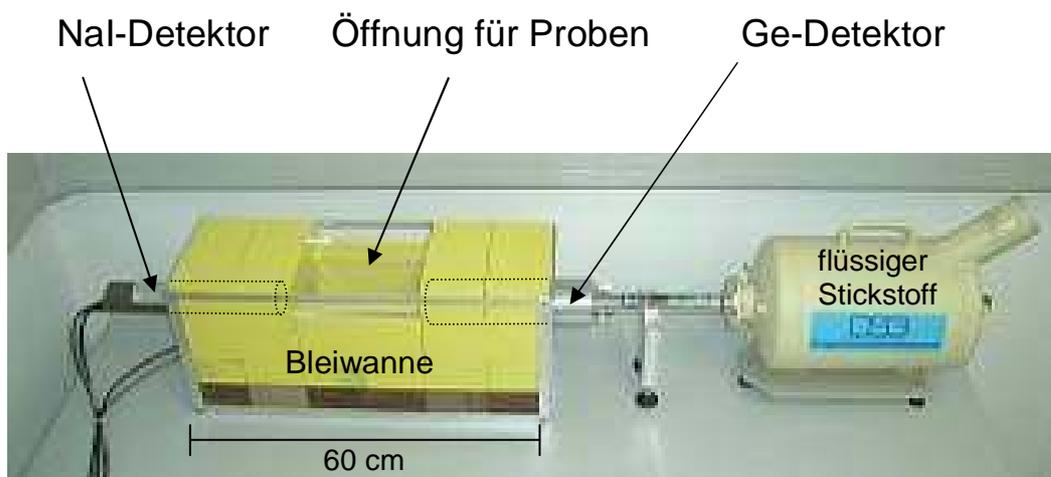
Gamma-Spektroskopie mit NaI- und Ge-Detektoren

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.

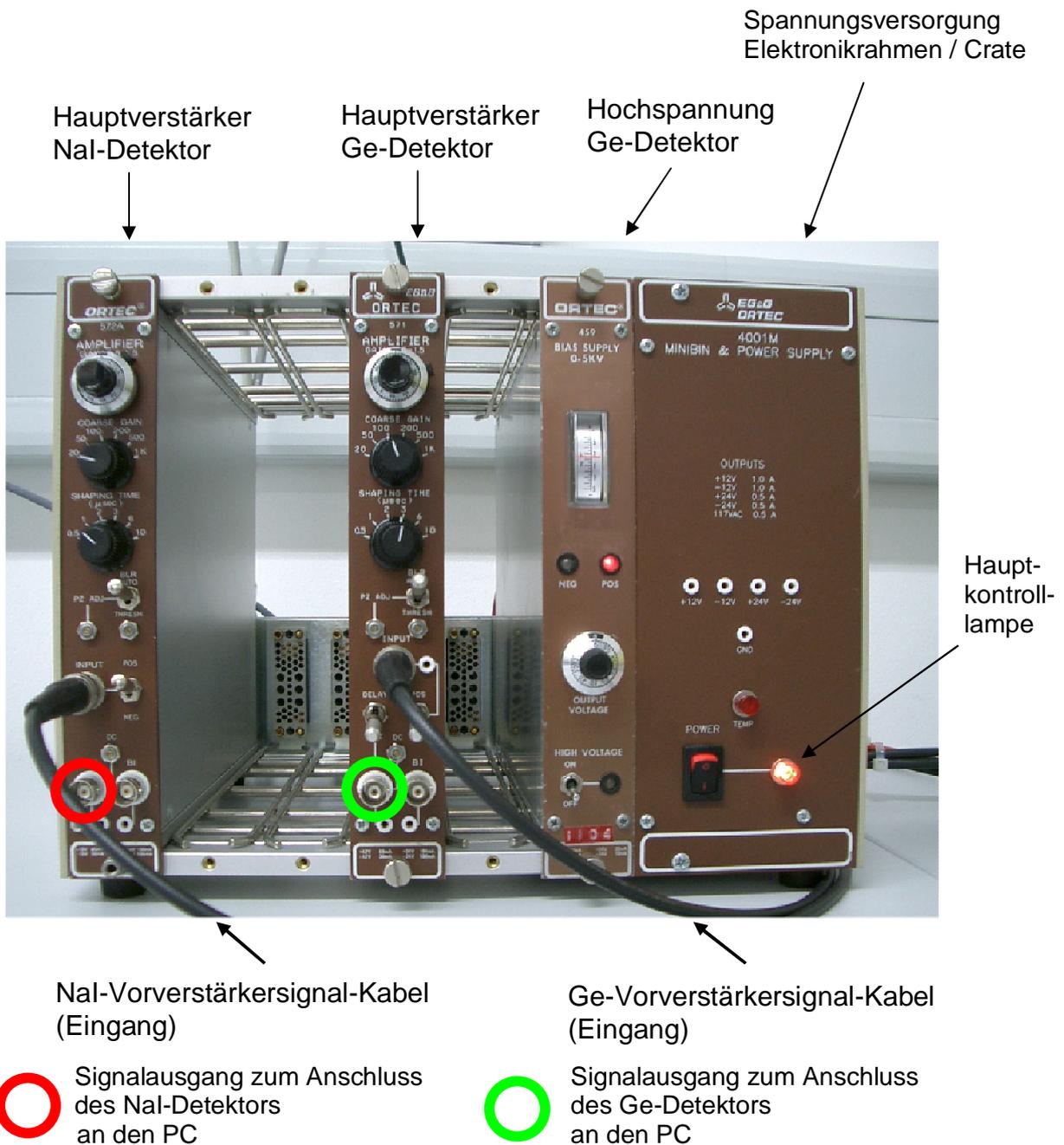
Die Detektoranordnung besteht aus zwei Detektoren, einem Germanium-Detektor (Ge), der mit flüssigem Stickstoff gekühlt wird (Abbildung oben rechts) und einem Natriumiodid-Detektor (NaI).

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.

In beiden Detektoren sind bereits Vorverstärker integriert. Beschriftete 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

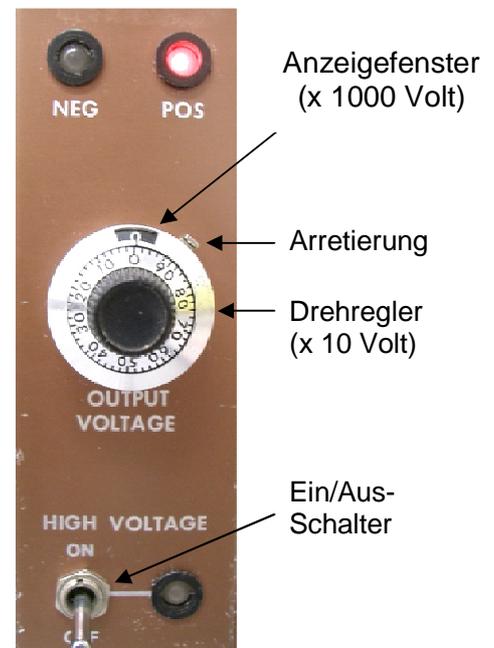
Drehregler "Gain 0,5-1,5".....	13 / 26
Drehschalter "Coarse Gain"....	20
Drehschalter "Shaping Time"..	1
Schalter "PZ ADJ".....	BLR AUTO
Schalter "INPUT".....	POS

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“

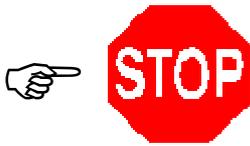


☞ Überprüfen Sie, ob der Elektronikrahmen ausgeschaltet ist. Die Hauptkontrolllampe sollte nicht leuchten. Wenn der Elektronikrahmen bereits eingeschaltet ist, sollten sie unbedingt Rücksprache mit einem Betreuer halten!

☞ 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!

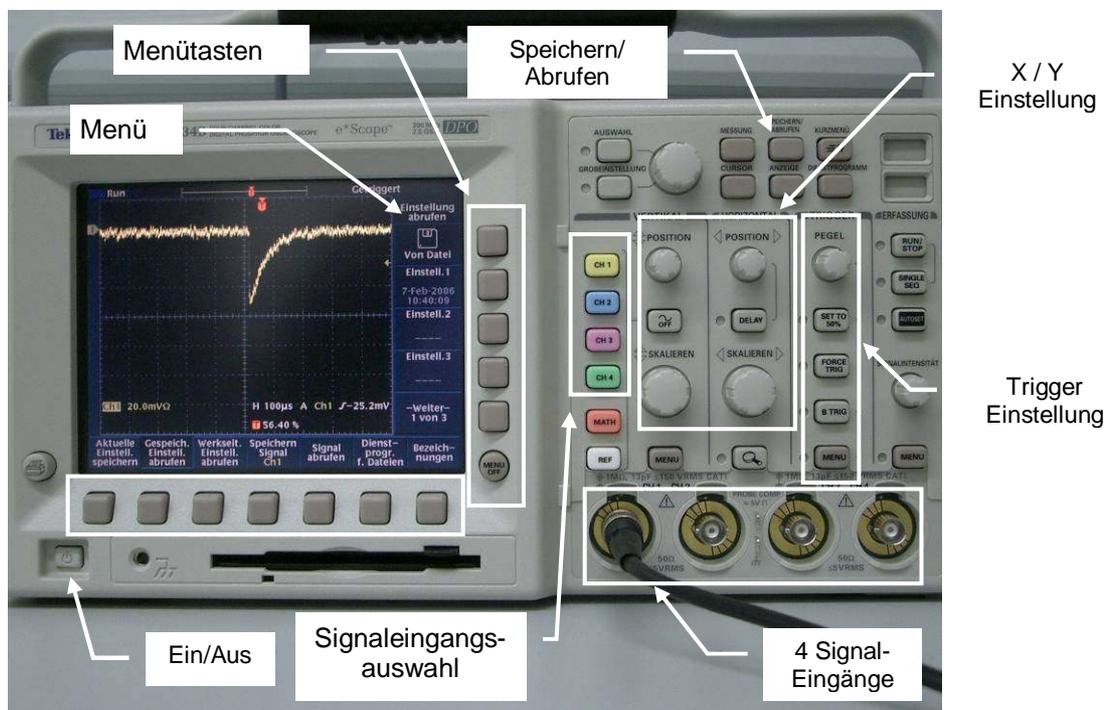
Das Anlegen der Hochspannung muss wie unten beschrieben wird langsam und unter ständiger Beobachtung der Messsignale am Oszilloskop geschehen. Dies dauert etwa 10 min und erfordert Ihre ständige Aufmerksamkeit!

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.



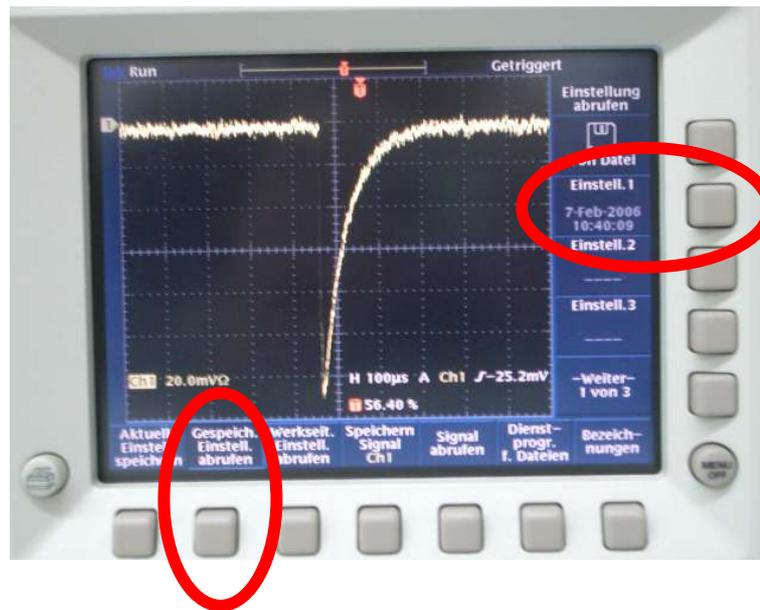
Um eine Voreinstellung auszuwählen, drücken Sie nun die Taste „SPEICHERN/ ABRUFEN“ (braune Taste oben rechts). Daraufhin sollte das folgende Bildschirmmenü angezeigt werden:

Drücken Sie die Menü-Tasten in der Reihenfolge:

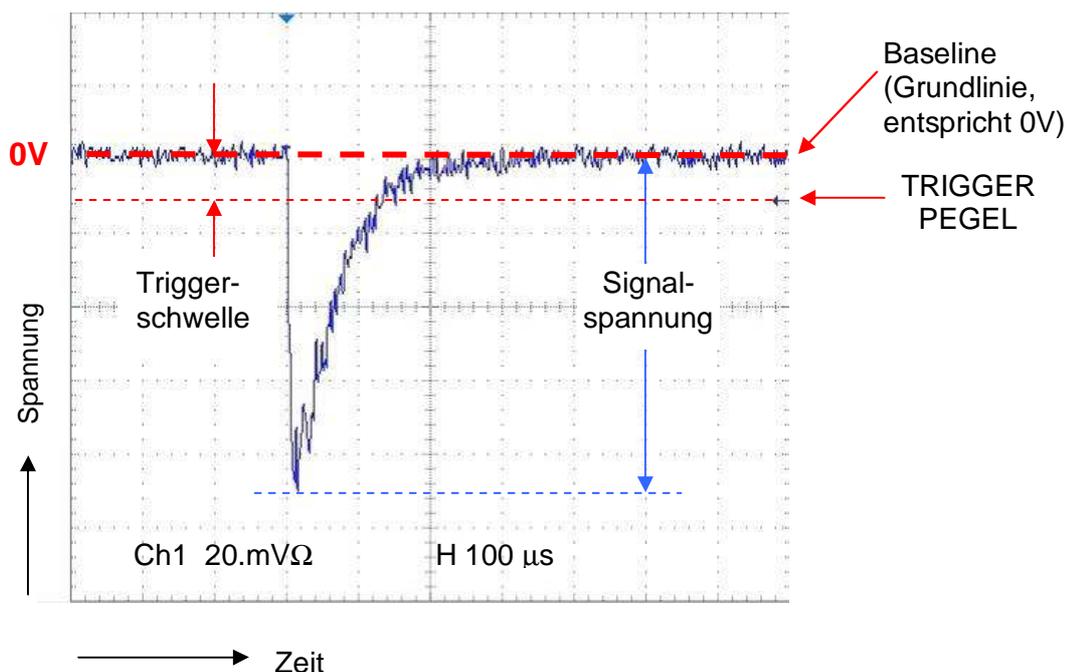
- „gesp. Einstell.abrufen“
- „Einstell. 1“ (das Datum ist unerheblich)

Sollte diese Voreinstellung überschrieben worden sein, können Sie die Oszilloskopeinstellungen auch von der beiliegenden 3.5“-Diskette abrufen:

- <Von Datei> drücken
- TEK0000.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 Spannungsimpuls).

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 100 μ s).

In unserem Beispiel hat ein γ -Quant also kurzzeitig einen Spannungsimpuls von ca. 85 mV erzeugt, der nach rund 200 μ s wieder abgeklungen ist. Die Baseline selbst schwankt um etwa \pm 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.

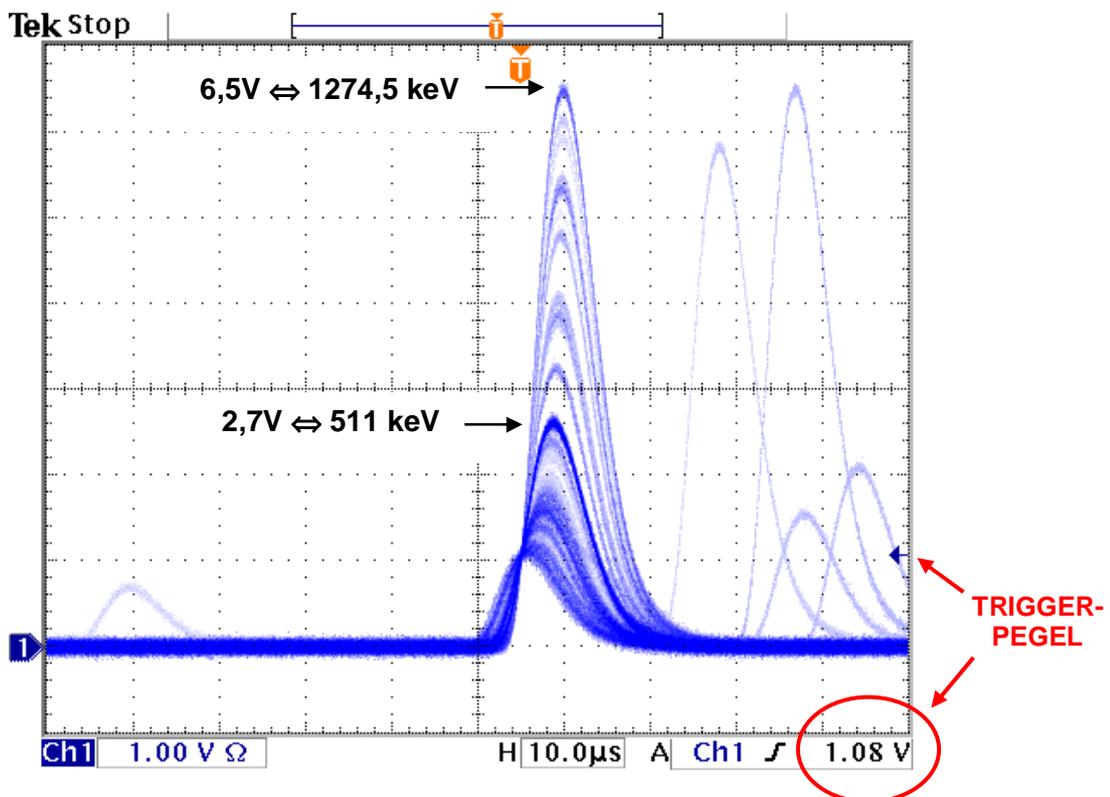


Sie sollten nun große, negative Impulse und eine deutlich geringere Schwankung der Baseline erkennen können. Für die Weiterverarbeitung im Computer werden diese Impulse nun in einem speziellen Verstärker (Ortec Amplifier 571) elektronisch "weiterbehandelt", und zwar (vgl. *Hintergrundwissen* H.8.):

- **invertiert** (aus negativen werden positive Impulse)
- **verstärkt** (die Signalspannungen müssen im Bereich zwischen 1V und 10V liegen)
- **verkürzt** (die Impulse sollen maximal 10 μ s dauern, das erreicht man mit der Einstellung "shaping time" = 3)

Die richtigen Voreinstellungen haben Sie am Anfang kontrolliert. Sie sollen nicht geändert werden.

- ☞ Schließen Sie nun das vom Signalkabel ("Ge-Detektor") direkt an den Ge-Hauptverstärker an (Anschluss "INPUT"). Der Oszilloskopeingang CH1 wird nun mit dem Ausgang (Anschluss „UNI“) des Ge-Hauptverstärkers verbunden. Außerdem müssen Sie am Oszilloskop sowohl die vertikale wie die horizontale Skalierung mit den Drehreglern ändern und den Trigger-Pegel mit dem Dreh-Regler auf positive Werte einstellen, denn die Signalspannungen sind nun positiv und wesentlich höher. Sie können hierzu am Oszilloskop auch die „Einstellung 2“ abrufen.
- ☞ Bitten Sie den Betreuer um die Eichquelle Na-22 und stellen Sie diese vor den Ge-Detektor in die Bleiwanne.



- ☞ 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 „**eV**“ (**Elektronenvolt**) und „**keV**“ (**Kiloelektronenvolt**, $1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}$) ist eine in der Atom- und Kernphysik gebräuchliche, sehr kleine Energieeinheit. Man kann sie in die sonst übliche Energieeinheit **Joule** umrechnen, wobei gilt: $1 \text{ J} = 6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV}$.

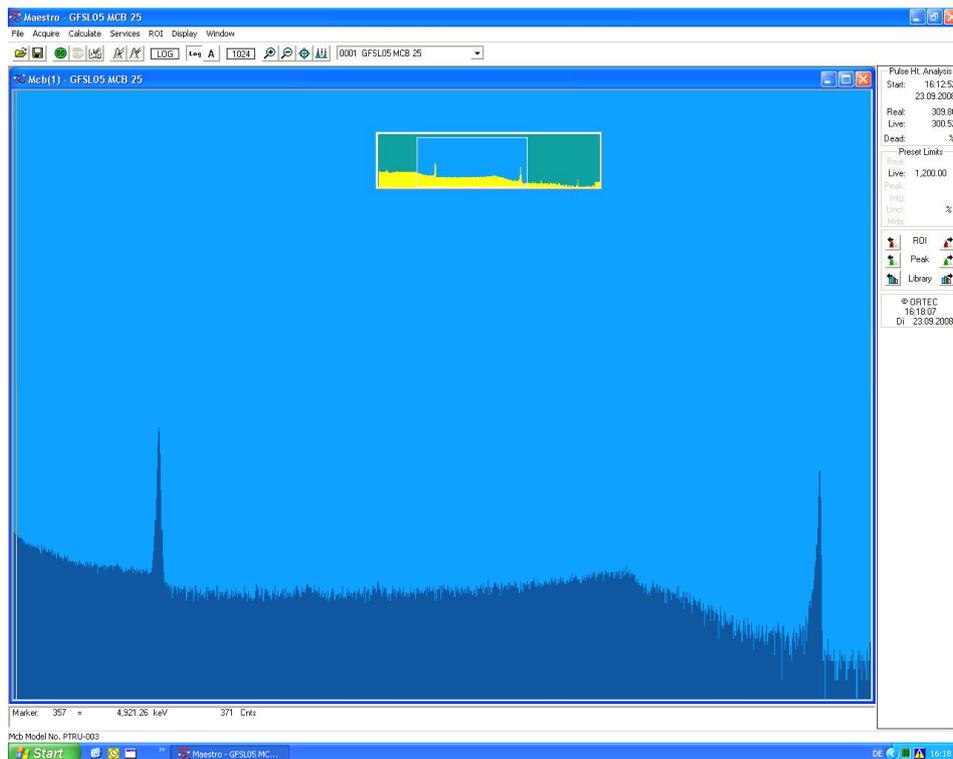
Prinzipiell können wir nun jeder Signalspannung die zugehörige γ -Energie zuordnen und können somit für jedes einfallende γ -Quant seine Energie in keV angeben. Allerdings ist die Ablesung der Signalspannung mit dem Oszilloskop nicht sehr genau. Deshalb werden wir im nächsten Kapitel die Signalspannungen 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

V.3.1. Das Impulshöhen-Analyseprogramm MAESTRO

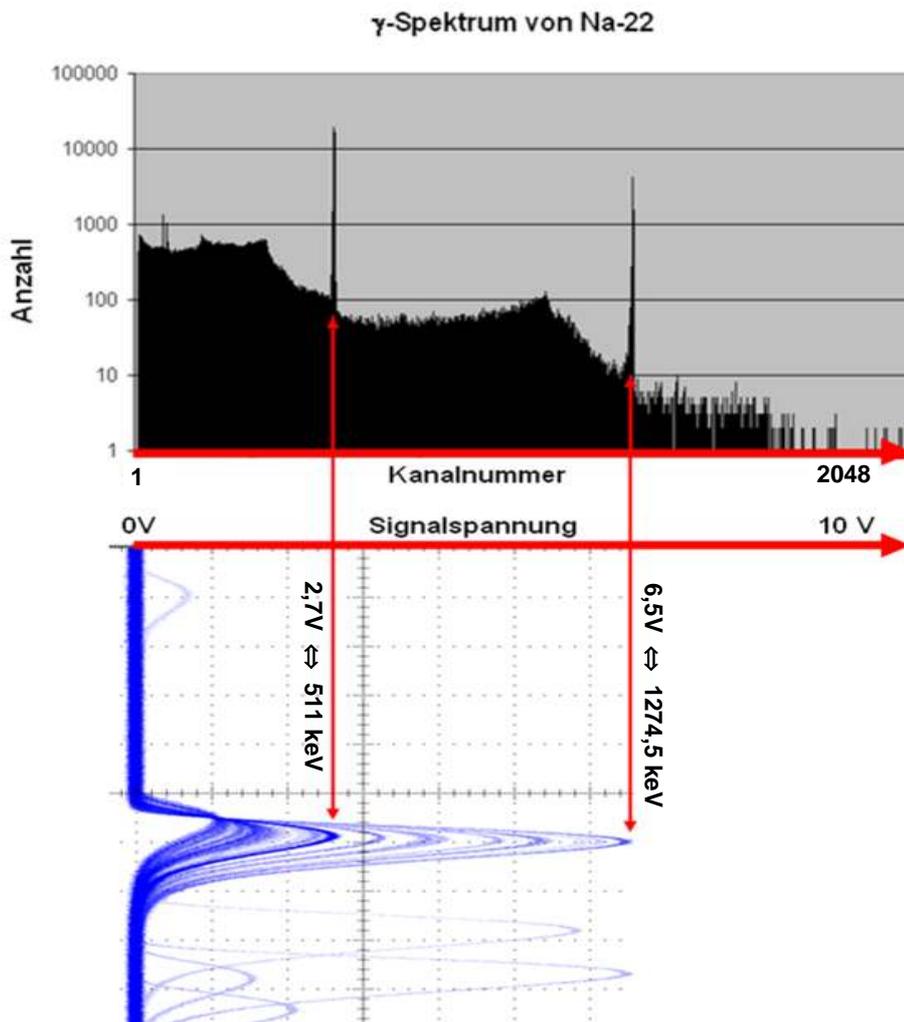
☞ PC einschalten und anmelden. Am Desktop das Programm "MAESTRO for Windows" durch Doppelklick starten. Daraufhin erscheint der MAESTRO-Hauptbildschirm. Dort sehen Sie in der Hauptansicht evtl. noch ein altes Spektrum.



- ☞ 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. Die Impulshöhen-Analyse

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.



<u>γ-Quant im Detektor:</u>		<u>am Oszilloskop:</u>		<u>im PC:</u>
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.

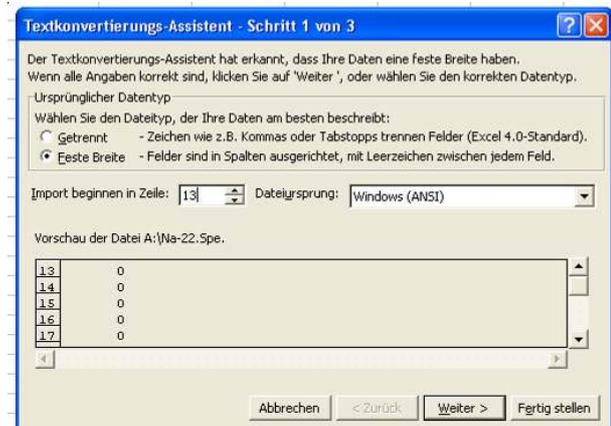
Die gemessenen Signalspannungen werden nun in einem so genannten **Spektrum** dargestellt (Abbildung unten): auf der x-Achse die Kanalnummern und auf der y-Achse die Anzahl der nachgewiesenen γ -Quanten.

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.

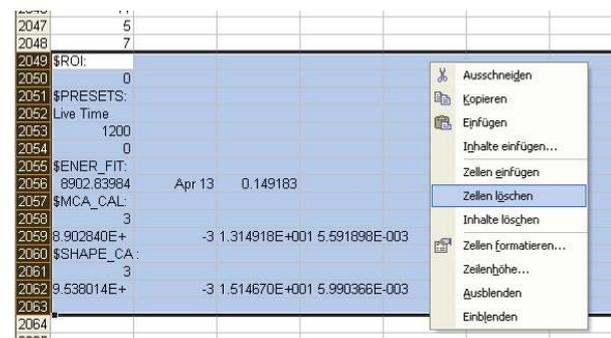
V.3.3. Darstellung eines Spektrums in Excel

Das mit dem Programm MAESTRO aufgenommene Spektrum sollen nun in Excel dargestellt und ausgewertet werden.

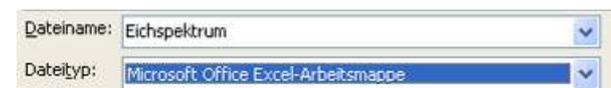
☞ Starten Sie das Programm EXCEL und öffnen Sie die Datei mit dem zuvor gespeicherten Spektrum. Es werden einige Abfragen zur Datenkonvertierung gestellt: Wählen Sie im Schritt 1 : „**Import beginnen in Zeile 13**“ und ändern Sie ansonsten die vorgegebenen Standardeinstellungen nicht.



☞ 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!**

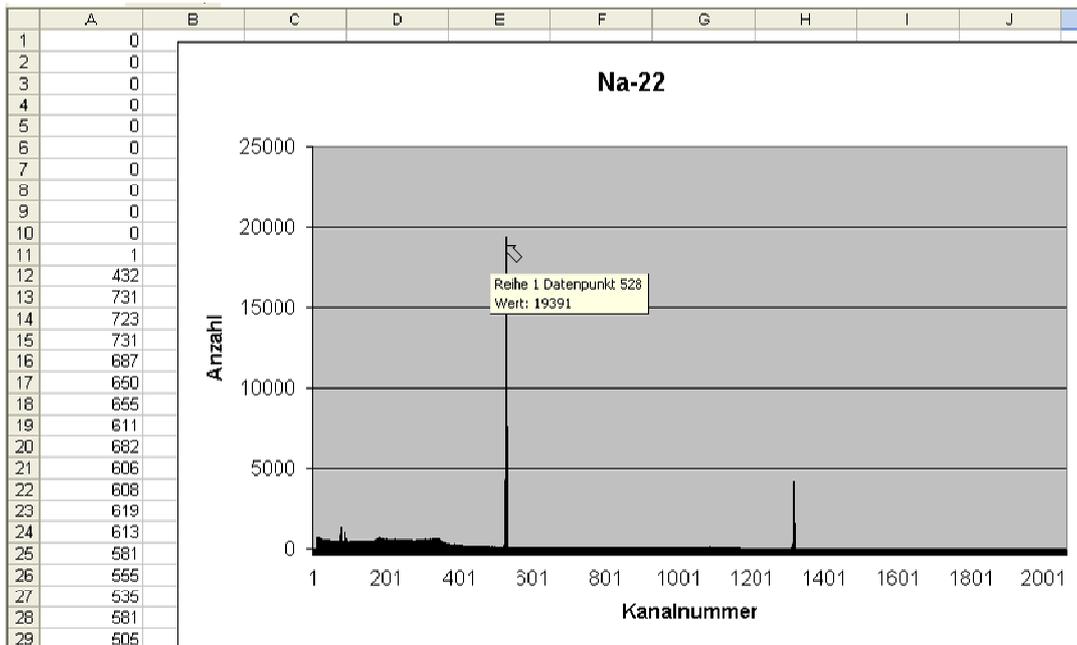
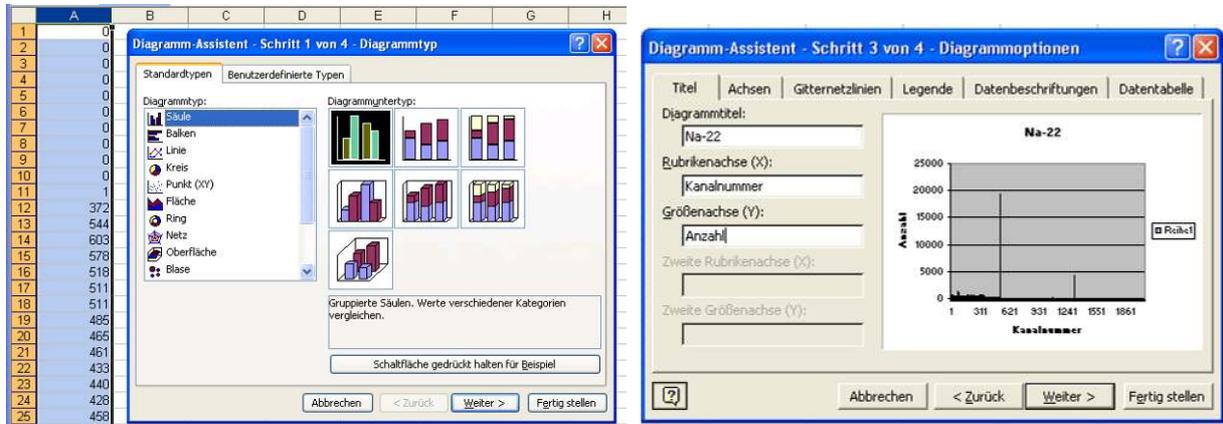


Betrachten wir nun die Tabelle genauer: Die Zeilennummern von 1 bis 2048 entsprechen den „Kanalnummern“ und man kann in der Spalte A direkt ablesen, wie viele γ -Quanten während der Messzeit in jedem dieser Kanäle gezählt wurden. In der Abbildung oben gab es z.B. während der Messzeit 7 γ -Quanten, die 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 - Energien 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 Spektrums 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:

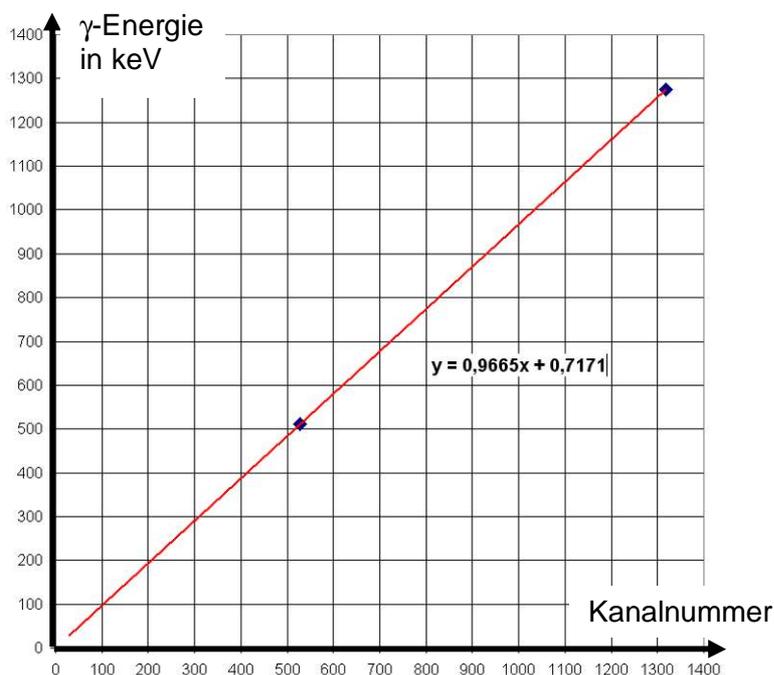
$$y = m \cdot x + b$$

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 Gammaskpektroskopie

V.4.1. Radioaktive Nuklide in Lebensmitteln

In diesem Kapitel sollen nun Lebensmittel und Gegenstände des täglichen Lebens auf mögliche γ -Strahlung untersucht werden.

☞ Stellen Sie anschließend das Glas mit den Pfifferlingen dicht vor den Detektor. Nehmen Sie mit Maestro ein γ -Spektrum auf und speichern Sie es wie oben beschrieben als ASCII SPE ab und importieren Sie dieses wie beschrieben in EXCEL.

☞ Obwohl nun sehr viel weniger γ -Quanten in den Detektor einfallen, erkennt man doch sehr deutlich eine Häufung ("Peak") bei einer ganz bestimmten Kanalnummer. Rechnen Sie mit Hilfe der Energiekalibrierung aus dem vorigen Kapitel diese Kanalnummer in die entsprechende γ -Energie (in keV) um und ermitteln Sie anhand der Tabelle auf den folgenden Seiten, welches radioaktive Nuklid in den Pilzen enthalten ist.

Die Tabelle (Quelle: <http://www.csupomona.edu/~pbsiegel/www/bio431/gennergies.html>) ist nach den in der ersten Spalte ansteigenden γ -Energien geordnet. In der 2. Spalte ist das Nuklid angegeben, von dem diese Strahlung herrührt die nächste Spalte (Half-Life) gibt dessen Halbwertszeit an.

Interessant ist auch die letzte Spalte der Tabelle. Mit "Percent Yield per decay" ist gemeint, mit welcher Wahrscheinlichkeit (in %) diese Strahlung nach einem Zerfall ausgesendet wird.

Nulleffekt

Um wirklich sicher zu sein, dass die beobachtete γ -Strahlung auch tatsächlich von den Pilzen stammt, muss man noch den im Labor herrschenden Strahlungsuntergrund (sog. "Nulleffekt") messen.

☞ Entfernen Sie alle Gegenstände aus der Bleiwanne und stellen Sie auch den Sortimentkasten mit den Proben möglichst weit von dem Detektor weg.

☞ Nehmen Sie 300 Sekunden lang ein Untergrundspektrum auf (Aufnahme mit Maestro, Speichern des Spektrums als ASCII SPEC, Import in EXCEL, graphische Darstellung).

Im Vergleich mit dem Untergrundspektrum erkennt man, dass die Pilze tatsächlich für den Peak im γ -Spektrum verantwortlich sind. Diese Pfifferlinge wurden im Sommer 2009 in einem Großmarkt in Frankfurt gekauft. Als Herkunftsland war Weißrussland angegeben.

☞ Untersuchen Sie auch Diätsalz oder Kakao auf mögliche γ -Strahlung. Welche Nuklide können Sie in diesen Stoffen nachweisen?

Gamma Energy (KeV)	Nuclide	Half-Life	Percent Yield per decay
8	Er-169	9.4 days	0.3
22	Sm-151	87 years	4
24	Sn-199m	250 days	16
30	Ba-140	12.8 days	11
31	Mg-28	21 hours	96
35	I-125	60 days	7
35	Te-125m	58 days	7
37	Br-80m	4.38 hours	36
40	Rh-103m	57 minutes	0.4
40	I-129	1.7×10^7 years	9
47	Pb-210	21 years	4
51	Rh-104m	4.41 minutes	47
53	Te-132	78 hours	17
58	Gd-159	18.0 hours	3
58	Dy-159	144 days	4
59	Te-127m	109 days	0.19
60	Am-241	458 years	36
63	Yb-169	32 days	45
63	Th-234	24.1 days	3.5
68	Ta-182	115 days	42
68	Ti-44	48 hours	90
70	Sm-153	47 hours	5.4
77	Pt-197	18 hours	20
77	Hg-197	65 hours	18
78	Ti-44	48 hours	98
80	Ba-133	7.2 years	36
81	Ho-166	26.9 hours	5.4
81	Xe-133	5.27 days	37
84	Tm-170	130 days	3.3
84	Th-228	1.90 years	1.6
87	Eu-155	1.81 years	32
88	Pd-109 / Ag-109m	13.47 hours / 40 seconds	5
88	Cd-109 / Ag-109m	453 days / 40 seconds	5
88	Lu-176m	3.7 hours	10
91	Nd-147	11.1 days	28
93	Th-234	24.1 days	4
95	Dy-165	139.2 min	4
99	Gd-153	242 days	55
99	Au-195	183 days	10
100	Pa-234	6.75 hours	50
103	Sm-153	47 hours	28
104	Sm-155	23 minutes	73
105	Eu-155	1.81 years	20
113	Lu-177	6.7 days	2.8
122	Co-57	270 days	87
122	Eu-152	12 years	37
123	Eu-154	16 years	38
124	Ba-131	12 days	28
128	Cs-134m	2.9 hours	14
129	Os-191	15 days	25
133	Hf-181	42.5 days	48
134	Ce-144	284 days	11
136	Hg-197m	24 hours	42
137	Re-186	90 hours	9
140	Tc-99m	6 hours	90
143	U-235	7.1×10^8 yrs	11
145	Ce-141	33 days	48
147	Ta-182m	16.5 minutes	40

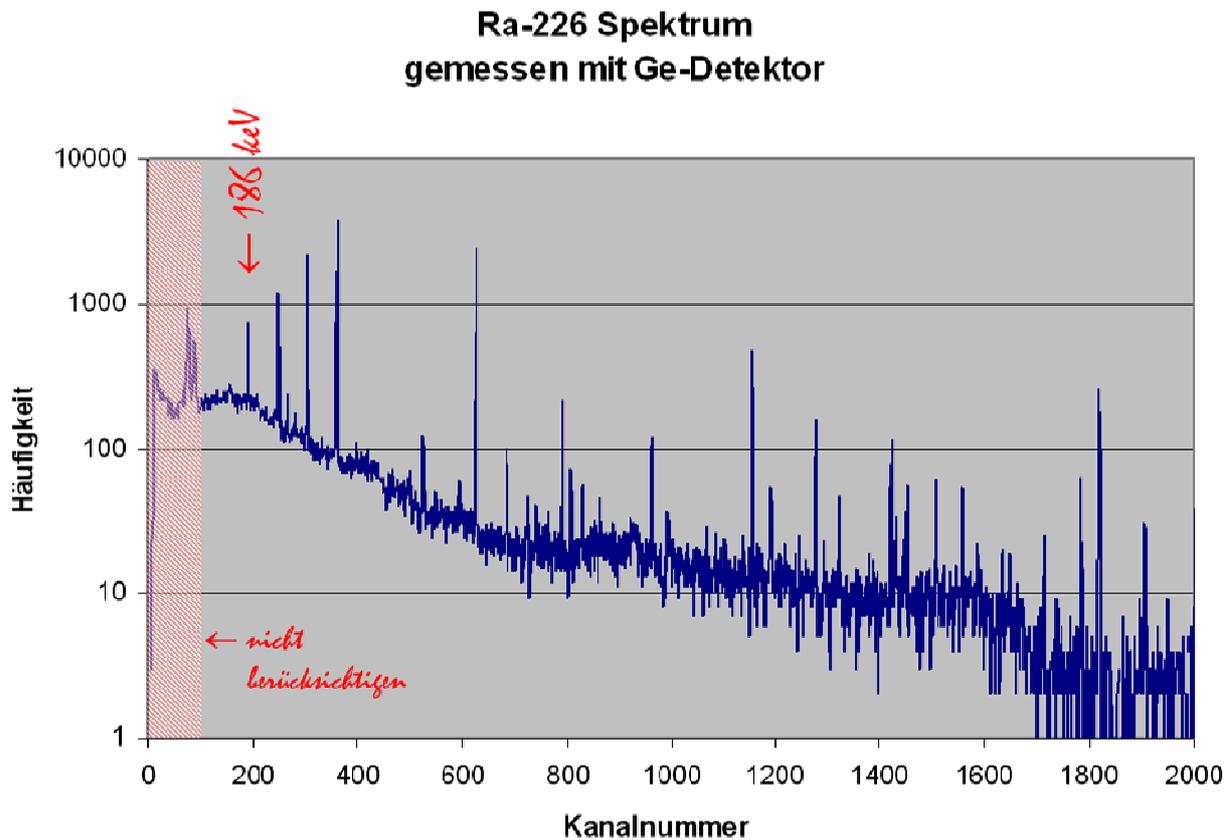
Gamma Energy (KeV)	Nuclide	Half-Life	Percent Yield per decay
150	Te-131	25 minutes	68
150	Cd-111m	48.6 minutes	30
150	Kr-85m	4.4 hours	74
155	Re-188	16.7 hours	10
158	Au-199	75.6 hours	37
163	Ba-140	12.8 days	6
164	Xe-131m	11.8 days	2
166	Ba-139	82.9 minutes	23
172	Ta-182m	16.5 minutes	40
185	U-235	7.1×10^8 yrs	54
186	Ra-226	1602 years	4
191	Mo-101	14.6 minutes	25
191	Pt-197	18 hours	6
192	In-114m	50.0 days	17
198	Yb-169	32 days	35
208	Lu-177	6.7 days	6.1
210	Ge-77	11.3 hours	61
215	Hf-180m	5.5 hours	82
215	Ru-97	2.9 days	91
230	Te-132	78 hours	90
233	Xe-133m	2.26 days	14
239	Pb-212	10.64 hours	47
239	As-77	38.7 hours	2.5
246	Sm-155	23 minutes	4
247	Cd-111m	48.6 minutes	94
250	Xe-135	9.2 hours	91
255	Sn-133	115 days	1.8
263	Ge-77	11.3 hours	45
265	Ge-75	82 minutes	11
265	Se-75	120.4 days	60
279	Hg-203	46.9 days	77
284	I-131	8.05 days	5.4
286	Pm-149	53.1 hours	2
293	Ce-143	33 hours	46
295	Pb-214	26.8 minutes	19
299	Tb-160	72.1 days	30
305	Kr-85m	4.4 hours	13
307	Tc-101	14.0 minutes	91
308	Er-171	7.52 hours	63
310	Pa-233	27.0 days	44
317	Ir-192	74.2 days	81
319	Nd-147	11.1 days	3
320	Cr-51	27.8 days	9
325	Sn-125m	9.7 minutes	97
328	Ir-194	17.4 hours	10
333	Hf-180m	5.5 hours	93
335	Cd-115 / In-115m	53.5 hours / 4.5 hours	50
342	Ag-111	7.5 days	6
344	Eu-152	12 years	27
351	Bi-211	2.15 minutes	14
352	Pb-214	26.8 minutes	36
356	Ba-133	7.2 years	69
360	Se-83	25 minutes	69
362	Pd-103	17 days	0.06
363	Gd-159	18.0 hours	9
364	I-131	8.05 days	82
368	Ni-65	2.56 hours	4.5
388	Sr-87m	2.83 hours	80
393	Sn-113	115 days	64

Gamma Energy (KeV)	Nuclide	Half-Life	Percent Yield per decay
393	In-133m	100 minutes	64
403	Kr-87	76 minutes	84
405	Pb-211	36.1 minutes	3.4
412	Au-198	2.698 days	95
427	Sb-125	2.7 years	31
439	Zn-69m	13.8 hours	95
441	I-128	25.0 minutes	14
444	Hf-180m	5.5 hours	80
468	Ir-192	74.2 days	49
477	Be-7	53 days	10.3
479	W-187	23.9 hours	23
482	Hf-181	42.5 hours	81
487	La-140	40.22 hours	40
490	Cd-115	53.5 hours	10
496	Ba-131	12 days	48
497	Ru-103	39.6 days	88
511	Cu-64	12.8 hours	38
511	Ga-68	68.3 minutes	176
511	As-74	17.9 days	59
511.0034	Na-22	2.60 years	180
512	Ru-106 / Rh-106	367 days / 30 seconds	21
514	Sr-85	64 days	100
514	Kr-85	10.76 years	0.41
520	Se083	25 minutes	59
527	Xe-135m	15.6 minutes	80
530	I-133	21 hours	90
530	Cd-115	53.5 hours	26
533	Nd-147	11.1 days	13
537	Ba-140	12.8 days	34
538	I-130	12.4 hours	99
554	Br-82	35.34 hours	66
559	As-76	26.5 hours	43
564	Sb-122	67 hours	66
570	Bi-207	30 years	98
583	Tl-208	3.10 minutes	86
596	As-74	17.9 days	61
599	Sb-125	2.7 years	24
603	Sb-125	60 days	97
605	Cs-134	2.05 years	98
609	Bi-214	19.7 minutes	47
619	Br-82	35.34 hours	41
622	Ru-106 / Rh-106	367 days / 30 seconds	11
637	I-131	8.05 days	6.8
658	Ag-110m	253 days	96
658	Ag-110	24.4 seconds	4.5
661.64	Cs-137 / Ba-137m	30 years / 2.55 minutes	85
669	I-130	12.4 hours	100
670	I-132	2.3 hours	144
686	W-187	23.9 hours	27
695	Pr-144	17.3 minutes	1.5
697	Te-129m	34 days	6
724	Zr-95	65 days	49
726	Ru-105	4.44 hours	48
727	Bi-212	60.6 minutes	7
740	Mo-99	67 hours	12
743	I-130	12.4 hours	87
747	Zr-97 / Nb-97m	17.0 hours / 60 seconds	92
748	Sr-91	9.67 hours	27

Gamma Energy (KeV)	Nuclide	Half-Life	Percent Yield per decay
756	Zr-95	65 days	49
765	Nb-95	35 days	100
773	I-132	2.3 hours	89
777	Br-82	35.34 hours	83
780	Te-131m	30 hours	60
796	Cs-134	2.05 years	99
810	Co-58	71.3 days	99
832	Pb-211	36.1 minutes	3.4
835	Ga-72	14.10 hours	96
834.827	Mn-54	303 days	100
837	Mn-56	2.58 hours	99
850	Te-131m	30 hours	31
879	Tb-160	72.1 days	31
885	Ag-110m	253 days	71
889	Sc-46	83.9 days	100
898	Rb-88	17.8 minutes	13
900	Pa-234	6.75 hours	70
935	Cd-115m	43 days	1.9
966	Tb-160	72.1 days	31
1020	Mo-101	14.6 minutes	25
1025	Sr-91	9.67 hours	30
1063	Bi-207	30 years	77
1078	Ba-68	68.3 minutes	3.5
1095	Fe-59	45 days	56
1115	Zn-65	245 days	49
1115	Ni-65	2.56 hours	16
1120	Sc-46	83.9 days	100
1120	Bi-214	19.7 minutes	17
1122	Ta-182	115 days	34
1140	I-135	6.7 hours	37
1173.2	Co-60	5.26 years	100
1210	Y-91	58.8 days	0.3
1274.5	Na-22	2.60 years	100
1278	Eu-154	16 years	37
1280	I-135	6.7 hours	34
1292	Fe-59	45 days	44
1293	In-116m	54.0 minutes	80
1293	Ar-41	1.83 hours	99
1308	Ca-47	4.53 days	74
1332.5	Co-60	5.26 years	100
1350	Mg-28	21 hours	70
1369	Na-24	15.0 hours	100
1380	Ho-166	26.9 minutes	0.9
1408	Eu-152	12 years	22
1426	Cs-138	32.2 minutes	73
1434	V-52	3.76 minutes	100
1460	K-40	1.29 x 10 ⁹ years	11
1481	Ni-65	2.56 hours	25
1524	K-42	12.4 hours	18
1570	Pr-142	19.2 hours	3.7
1596	La-140	40.22 hours	96
1600	Cl-38	37.3 minutes	38
1692	Sb-124	60 days	50
1764	Bi-214	19.7 minutes	17
1780	Al-28	2.31 minutes	100
1811	Mn-56	2.58 hours	29
2614	Tl-208	3.10 minutes	100
2754	Na-24	15.0 hours	100
6130	N-16	7.2 seconds	69
7110	N-16	7.2 seconds	5

V.4.2. 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 V.3.3. 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 Kalibrierung in V.3.4. 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 zugehörigen „Peak“.

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

V.5. Zerfallsreihen natürlicher Radionuklide

V.5.1. Identifizierung radioaktiver Isotope der Zerfallsreihe von Radium

Sucht man in der Tabelle der Gammaenergien nach dem Nuklid Ra-226, dann stellt man fest, dass dieses Isotop nur Gamma-Quanten mit der Energie 186 keV abstrahlt.

Die vielen weiteren Linien im Spektrum der Radium-226-Quelle stammen nämlich 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.

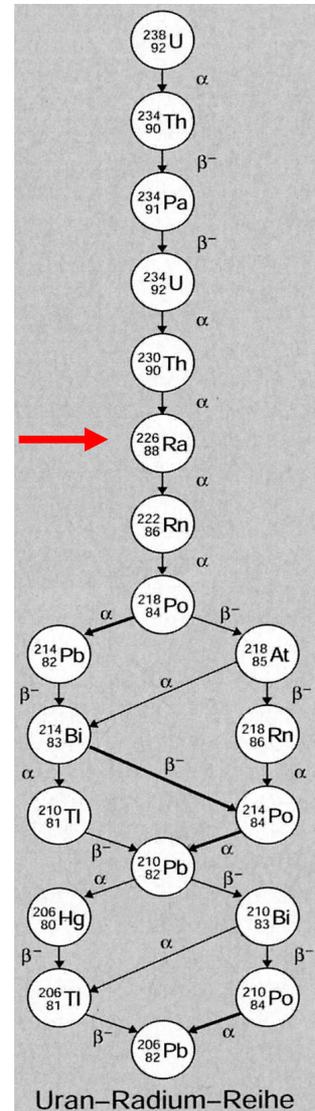
Ra-226 gehört zu der Uran-Radium-Zerfallsreihe, die ihren Ursprung in dem Uranisotop U-238 hat.

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?

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.

V.5.2. Die Uran-238-Zerfallsreihe

$\alpha\beta\gamma$ 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 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 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} 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 Pa $\xrightarrow{\beta^-}$ ²³⁴ 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 Th 100 ↓ α	α: 4.6877 (76.3) α: 4.6205 (23.4)		γ: 67.67 (0.38)
1600 y	²²⁶ Ra 100 ↓ α	α: 4.7843 (94.45) α: 4.601 (5.55)		γ: 186.21 (3.59)
3.8235 d	²²² Rn 100 ↓ α	α: 5.4895 (99.92) α: 4.986 (0.078)		γ: 510 (0.076)
3.10 m	²¹⁸ 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 At $\xrightarrow{\beta^-}$ ²¹⁴ 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 (18.15/19.3) γ: 242.00 (7.12/7.43)
19.9 m	²¹⁴ 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 Tl $\xrightarrow{\beta^-}$ ²¹⁴ Po 100 100 β ↘ ✓ 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	²¹⁰ Pb 100 ↓ β		β: 0.017 (80) β: 0.063 (20)	γ: 46.54 (4.25)
5.013 d	²¹⁰ Bi 100 ↓ β		β: 1.162 (99)	no γ-rays observed
138.376 d	²¹⁰ Po 100 ↓ α	α: 5.3043 (100)		γ: 803.10 (1.21*10 ⁻³)
stable	²⁰⁶ Pb		Ref.: End of '00	Version: 3.7, August 2001

V.5.3. Die Uran-235-Zerfallsreihe

$\alpha\beta\gamma$ 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 α ✓ 98.620 \searrow 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 \searrow ²²⁷ ₉₀ Th 100 \swarrow 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 β ✓ 99.724 \searrow 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 \searrow ²⁰⁷ ₈₁ Tl 100 \swarrow 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.5.4. Die Thorium-232-Zerfallsreihe

$\alpha\beta\gamma$ 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 ²¹² ₈₄ Po 100 100 β ↘ ↙ 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

☞ Messen Sie bei weiteren Proben die Energie der Gammastrahlung und stellen Sie diese in einem Spektrum grafisch dar. Identifizieren Sie die Zerfallsreihen, zu denen die Nuklide gehören anhand der Tabellen auf den vorangegangenen Seiten.

- Objekt in der Pappschachtel (NICHT AUSPACKEN!)
- Armbanduhr
- Steine (Hohentwiel)

☞ Während der **Mittagspause** können Sie das Spektrum des Raumuntergrunds, mit einer längeren Messzeit noch empfindlicher messen. Treten weitere Linien im Spektrum auf, und wenn ja, können Sie diese interpretieren? Woher könnte der Raumuntergrund, d.h. die natürliche uns umgebende Radioaktivität, stammen?

V.5.5. 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.6. Vergleich der Detektoreigenschaften von NaI und Ge (optional)

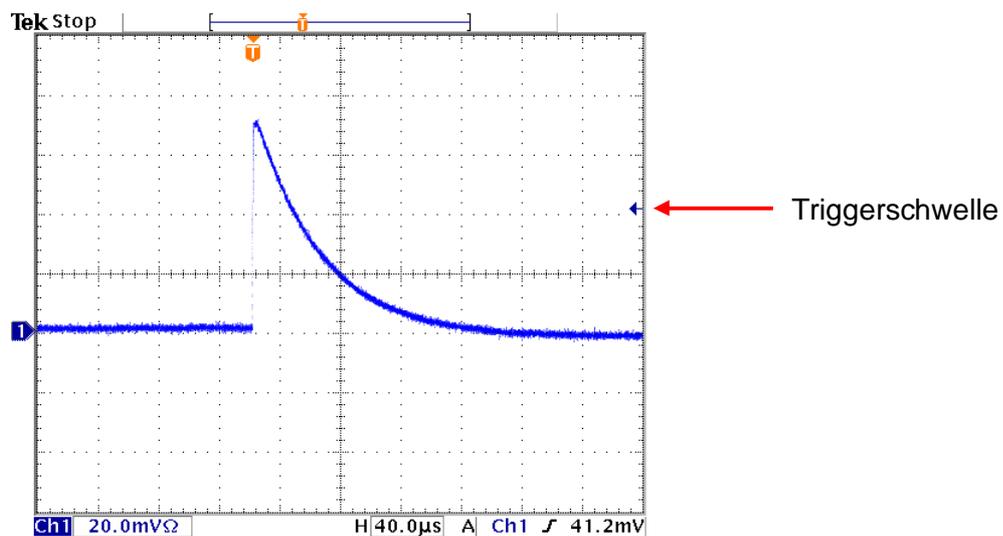
Der Experimentaufbau enthält noch einen sogenannten Natriumiodid-Detektor (NaI). Dieser Detektortyp ist weit verbreitet und wird in vielen Experimenten in der GSI eingesetzt.

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 $40 \mu\text{s}$ (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.



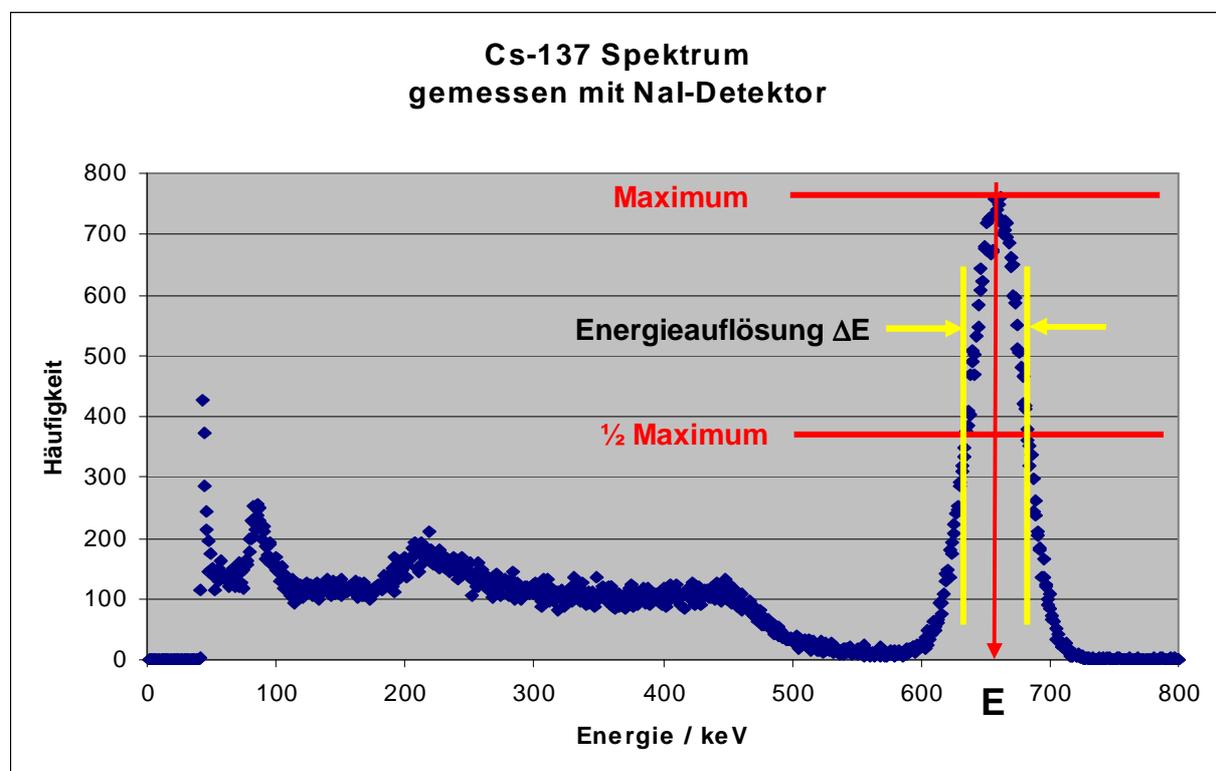
- ☞ Wenn die Messsignale des NaI-Detektors zufriedenstellend aussehen, können Sie das Signalkabel nun mit dem NaI-Hauptverstärker verbinden (Anschluss "INPUT") und den Ausgang „UNI“ über das Kabel ("PC/MCA") mit dem PC verbinden. Bitten Sie den Betreuer noch einmal um die Cs-137-Quelle, stellen Sie diese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

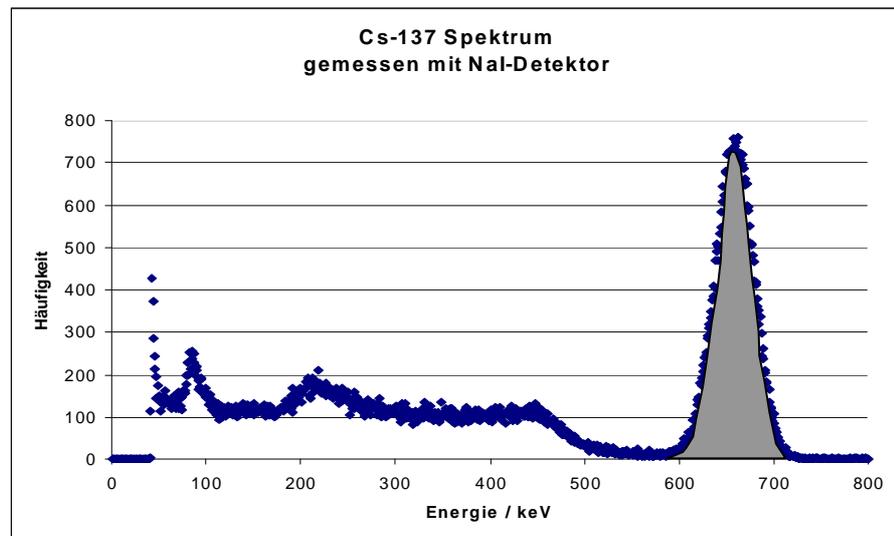
In einem geeichten Spektrum ist dies dann ein Energiebereich ΔE , der angibt, wie stark „verschmiert“ die eingestrahlte Gamma-Energie E von dem Detektor nachgewiesen wird. Meist wird die relative Energie-Auflösung $\Delta E/E$ angegeben: je kleiner diese Zahl, desto besser ist die Energieauflösung des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

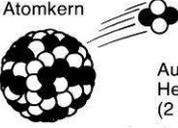
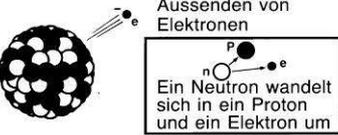
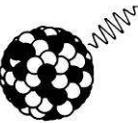
- Man unterscheidet β^- (Elektronen-) und β^+ -(Positronen-) Strahler.
- β -strahlende Radionuklide emittieren meistens auch γ -Strahlen.
- Ausnahme: reiner β -Strahler ist z. B. Strontium-90.
- Das Ionisierungsvermögen ist gering (etwa 50 Ionen je cm Weglänge). Zur Abschirmung sind einige Millimeter 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 Atomhülle (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  <p>Atomkern Aussenden von Heliumkernen (2 p + 2 n)</p>	5 MeV	4 cm	1 Blatt Papier	Radon 222 Radium 226 Plutonium-isotope
Beta-(β-)Strahler  <p>Aussenden von Elektronen Ein Neutron wandelt sich in ein Proton und ein Elektron um</p>	1 MeV	3 m	0,5 cm Plexiglas	Kalium 40 Cäsium 137 Strontium 90
Gamma-(γ-)Strahler  <p>Aussenden von elektromagnetischen Wellen (Quanten, Photonen) ähnlich der Röntgenstrahlung</p>	1 MeV	Abnahme mit dem Quadrat der Entfernung	10 cm Blei	nahezu alle Radionuklide

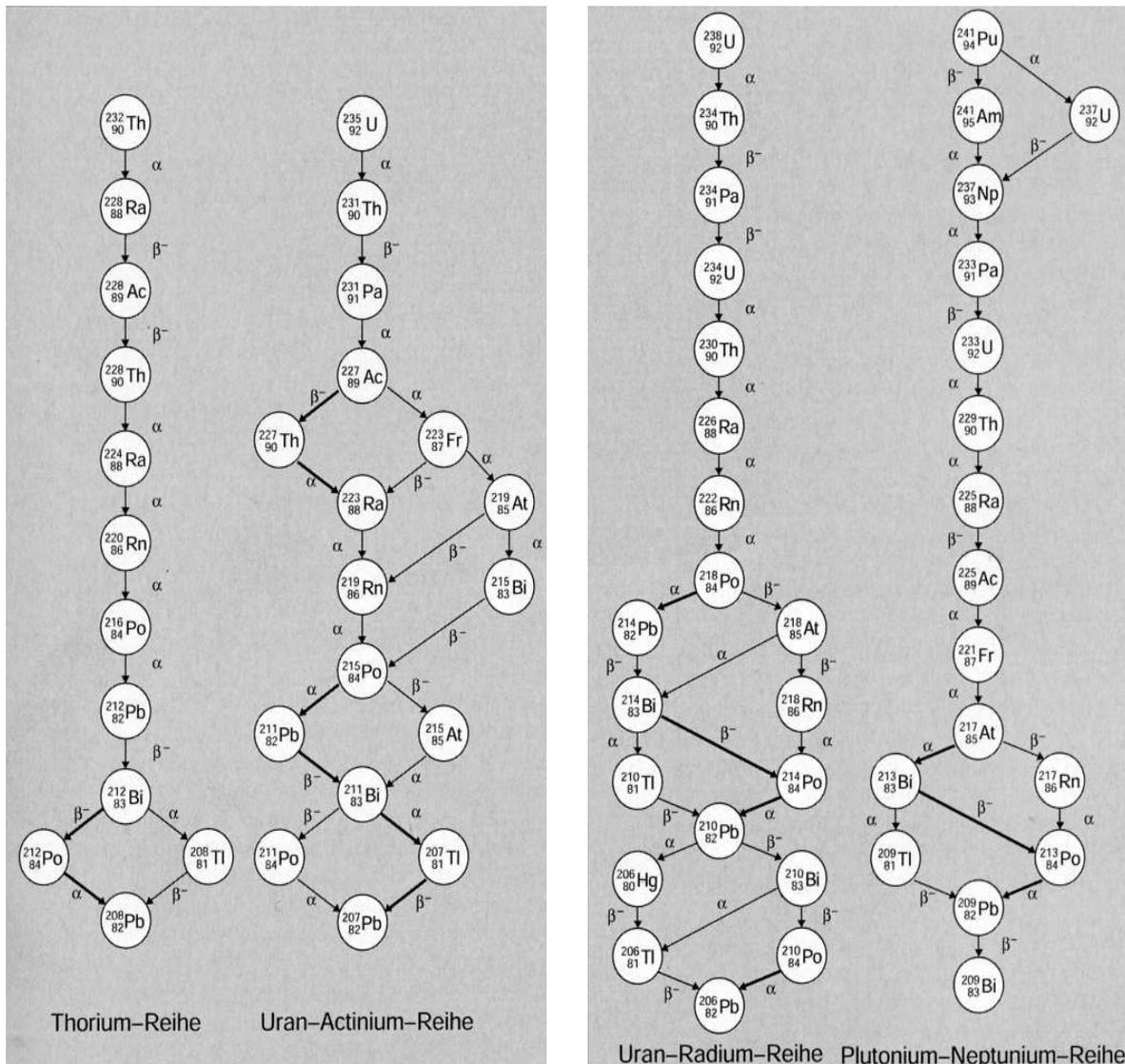
H.2. Zerfallsreihen

Im Experimentierteil haben wir die mit Th-232, U-235 und U-238 beginnenden natürlichen Zerfallsreihen kennengelernt und uns zwei davon genauer angeschaut. Man kann zeigen, dass es insgesamt nur 4 unterschiedliche Zerfallsreihen geben kann.

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 $2,144 \times 10^6$ Jahren hat. Nachdem aber die Transurane und damit auch Pu-241 künstlich hergestellt worden sind, existiert damit diese Zerfallsreihe im Prinzip wieder.

Die vier möglichen Zerfallsreihen sind auf der nächsten Seite zusammengestellt. Von links nach rechts sieht man die Th-232, die U-235, die U-238 und die Pu-241 -Reihe.

Zum Nachdenken: Warum kann es nur 4 unterschiedliche Zerfallsreihen geben?



H.3. 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.

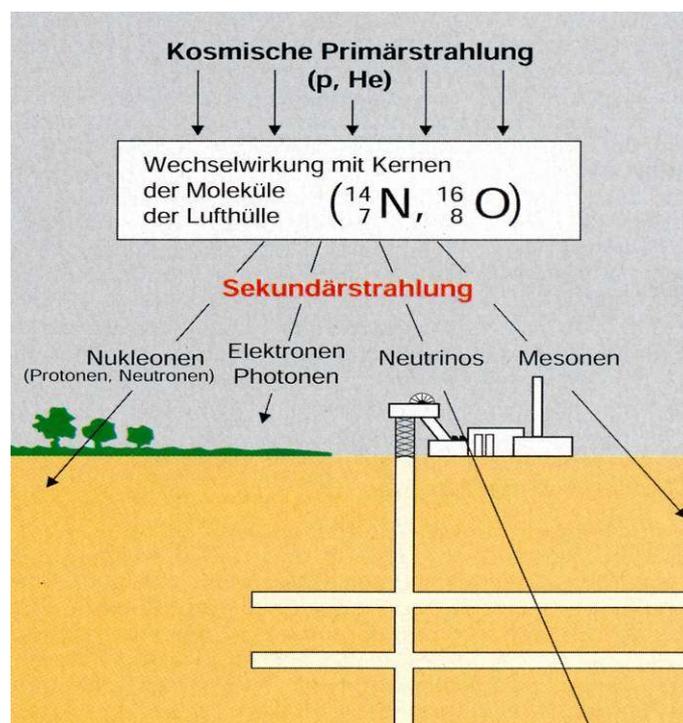
Eine Ausnahme in dieser Hinsicht stellt das Kalium-40 dar. Es hat im Vergleich zu den anderen Nukliden eine deutlich geringere Halbwertszeit und einen höheren Anteil an der Isotopenzusammensetzung. Dies führt zu einer merklichen natürlichen Strahlenexposition. Da das K-40 mit einem gewissen Anteil (0,0117%) 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	$2,7 \times 10^{21}$		

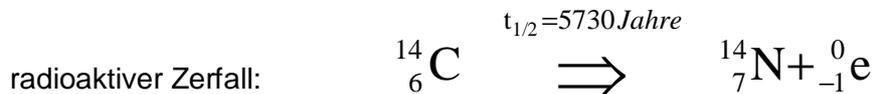
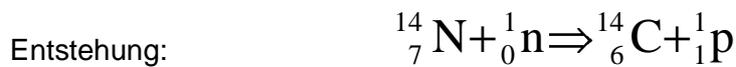
H.4. Kosmische Strahlung und die Erzeugung neuer Radionuklide

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:



Die gesamte natürliche C-14-Aktivität beträgt $8,5 \times 10^{18}$ 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.

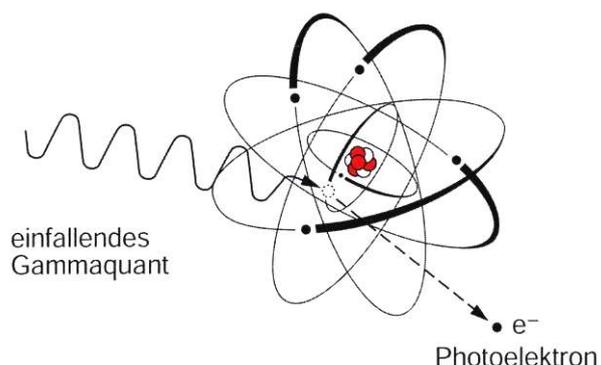
Die Wechselwirkungen zwischen **Neutrinos** und Materie sind außerordentlich schwach. So wird z. B. von 1 Million Neutrinos, die durch die Erdkugel fliegen, nur eines absorbiert. Sie tragen deshalb auch nicht zur Strahlenexposition bei.

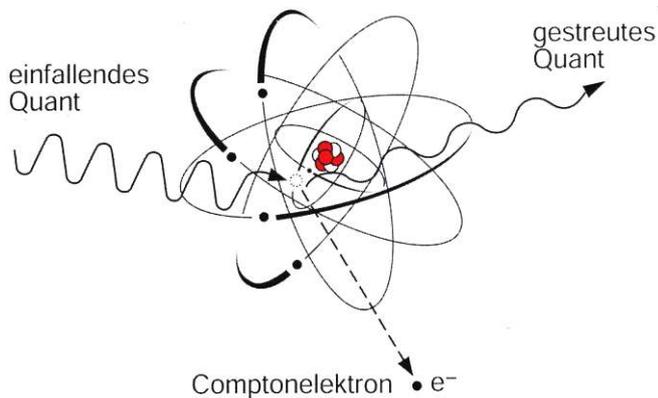
H.5. Die Ionisationswirkung der radioaktiven Strahlungsarten

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 Ionenspur, 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:

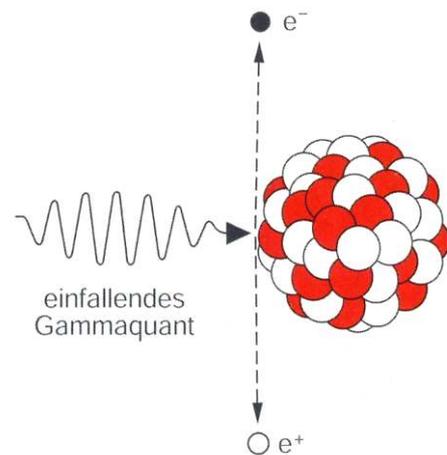
Beim **Photoeffekt** wird die gesamte Energie des einfallenden γ-Quants vom Atom absorbiert und auf ein in der Hülle des Atoms gebundenes Elektron übertragen. Das Elektron wird dadurch aus der Bindung der Atomhülle gelöst; es entsteht ein freies Elektron und ein Ion.





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.6. 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.

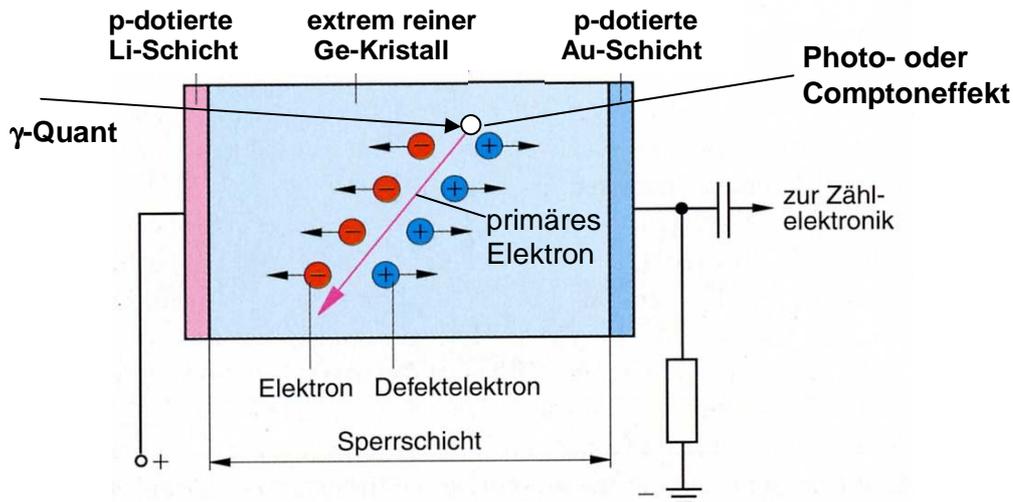
Absorbermaterial	Halbwertsdicke in cm
Blei	1,2
Eisen	1,7
Aluminium	5,2
Beton	ca. 5
Wasser	12

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

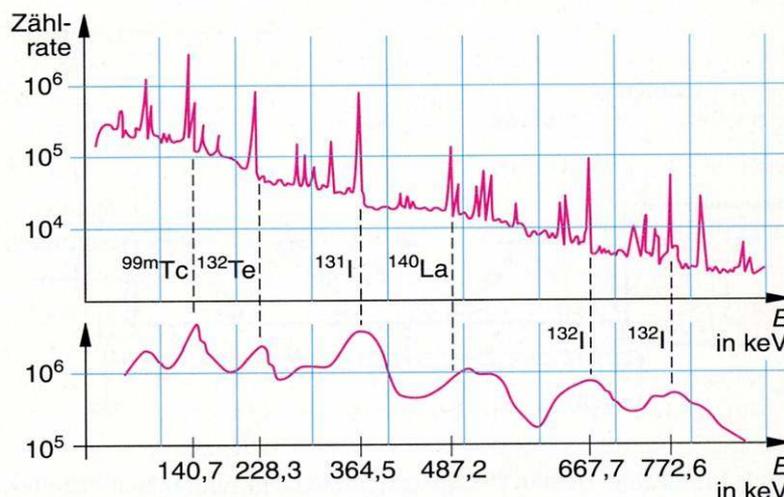
Die Funktionsweise von Halbleiterdetektoren beruht auf der Ausnutzung der Eigenschaften des Grenzbereiches zwischen zwei unterschiedlich dotierten Bereichen eines Halbleiters. Da aus dem n-dotierten Bereich Elektronen in den p-Bereich wandern und aus dem p-dotierten Bereich Defektelektronen in den n-Bereich 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 γ -Quant in die Sperrschicht einfällt, so setzt es mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durch Photo- oder Comptoneffekt ein primäres Elektron frei. Während des Durchgangs dieses primären Elektrons durch das Kristallgitter werden zahlreiche weitere Elektronen und Defektelektronen gebildet. Diese fließen 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 Ladungspaars 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 (s.u.). 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

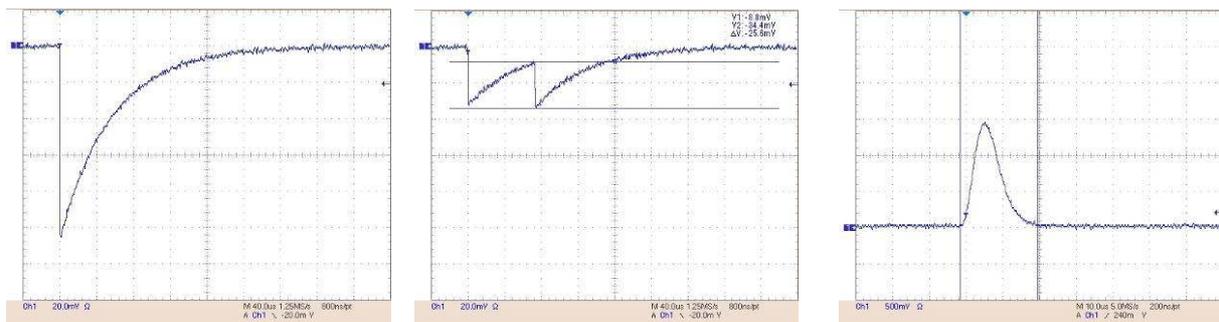
Die Hauptaufgabe eines Vorverstärkers ist es, die schwachen Signale eines Detektors zu verstärken und durch ein Kabel zu treiben, das den Vorverstärker mit der restlichen Elektronik verbindet. Gleichzeitig darf er nur so wenig Rauschen wie möglich hinzufügen. Bei Detektoren, die über eine interne Verstärkung 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 10 μ s und einer zur Energie proportionalen Amplitude.

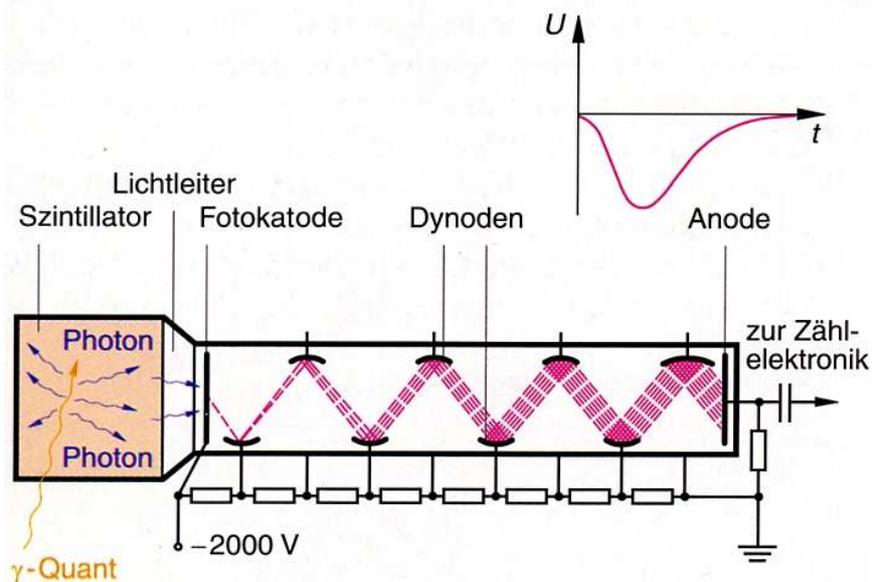


Trifft nun innerhalb dieser Zeit ein zweites Signal ein, summieren sich die Amplituden und die Signale werden deformiert („pile-up“). Um diesen Effekt zu vermeiden, werden die Impulse durch Formung verkürzt. Ein zweiter Grund für die Impulsformung ist eine Optimierung des Signal-Rausch-Verhältnis. Die 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“ eines typischen Signals nach dem Hauptverstärker.

H.9. 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.

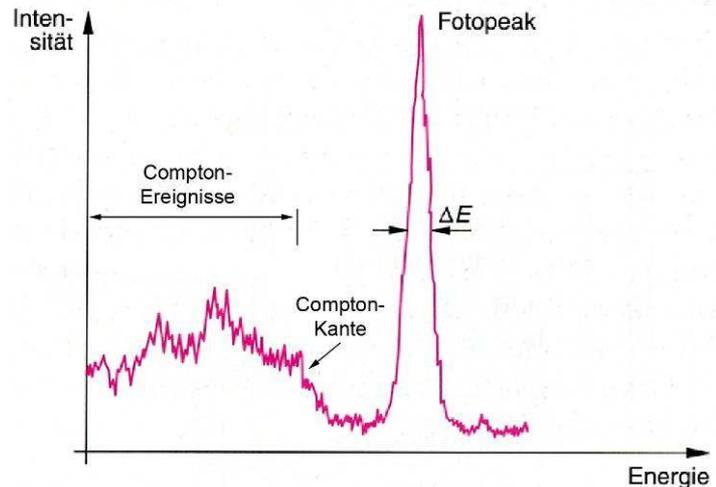


Ein γ -Quant kann im Szintillatormaterial seine gesamte Energie oder einen Teil davon auf ein Elektron übertragen. Dieses Elektron wiederum verliert seine Energie, indem es im Szintillator entlang seiner Bahn andere Elektronen in energetisch höhere Energiezustände hebt. Diese Anregungen werden durch 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 γ -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-Präparates erhält. Die nach rechts abgetragene Energie ist der Höhe der registrierten 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 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 $\Delta E/E$. Da es γ -Spektren gibt, deren Energiewerte dicht zusammenliegen, können diese von einem Szintillationszähler nicht mehr getrennt werden.

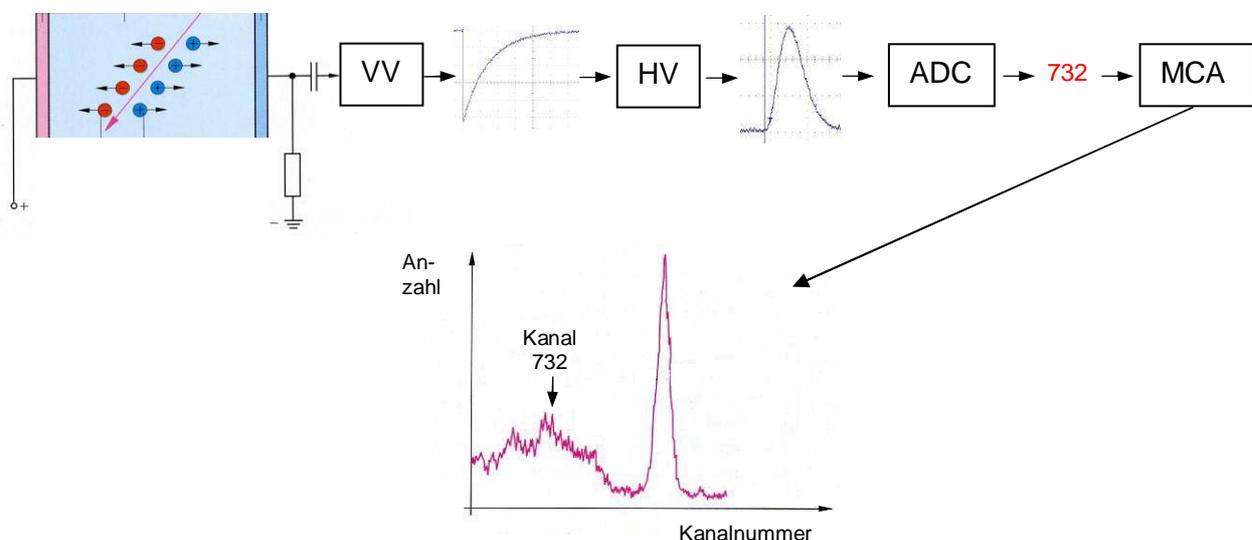
Zusammenfassung: In Szintillationsdetektoren übertragen γ -Quanten ihre Energie an Elektronen, die im Material Lichtquanten auslösen. Szintillationszähler besitzen eine hohe Nachweiseffektivität für γ -Strahlung. Ihr Nachteil besteht in der relativ geringen Energieauflösung $\Delta E/E$ von nur etwa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

H.10. 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.