

# IA7

Modul Atom-/Kernphysik

## Gammaspektrometrie

Gammastrahlung von Radionukliden ist monoenergetisch. Daher kommt ihr in der Radiophysik und Radiochemie eine grosse Bedeutung zu. In diesem Versuch soll das Prinzip der Gammaspektrometrie kennengelernt werden und Spektren verschiedener Nuklide sind aufzuzeichnen. Dabei wird die Wechselwirkung der Gammastrahlung mit einem NaI(Tl)-Kristall Detektor untersucht. Mit Hilfe von Nuklidbibliotheken sind diese Spektren schliesslich zu interpretieren.



## **Versuch IIA7 - Gammaspektrometrie**

Gammastrahlung von Radionukliden ist monoenergetisch. Daher kommt ihr in der Radiophysik und Radiochemie eine grosse Bedeutung zu. In diesem Versuch soll das Prinzip der Gammaspektrometrie kennengelernt werden und Spektren verschiedener Nuklide sind aufzuzeichnen. Dabei wird die Wechselwirkung der Gammastrahlung mit einem NaI(Tl)-Kristall Detektor untersucht. Mit Hilfe von Nuklidbibliotheken sind diese Spektren schliesslich zu interpretieren.

## 1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Was heisst ionisierende Strahlung? Welche Arten von ionisierender Strahlung gibt es? Welche Gefahren gehen von den verschiedenen Typen der ionisierenden Strahlung aus? Wie kann man sich schützen?
- Was ist ein Termschema? Welche Informationen findet man in einem Termschema? Wo findet man Termschemata, wenn man etwas nachschlagen möchte?
- Was heisst Szintillation? Wie kann das zum Nachweis von ionisierender Strahlung benutzt werden?
- Wie ist ein Szintillationsdetektor aufgebaut und wie funktioniert er? Was lässt sich mit einem NaI-Detektor messen, was nicht?
- Wozu braucht man bei diesem Experiment eine Hochspannung? Was ist diesbezüglich zu beachten?
- Was ist Gammaspektrometrie? Wo findet Gammaspektrometrie Anwendung?
- Was versteht man unter Photoeffekt, Paarbildung und Comptoneffekt? Warum ist die Kenntnis über diese Prozesse bei der Gammaspektrometrie wichtig?

## 1.2 Theorie

### 1.2.1 Ionisierende Strahlung

Gammastrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung, welche besonders durchdringend ist. Das liegt daran, dass Gammastrahlung im Vergleich zur Alpha- oder Betastrahlung deutlich weniger mit Materie wechselwirkt. Gammastrahlung entsteht beim Zerfall, d.h. einer spontanen Umwandlung, der Atomkerne vieler natürlich vorkommender oder künstlich erzeugter radioaktiver Nuklide. Es handelt sich bei Gammastrahlung um ionisierende Strahlung.

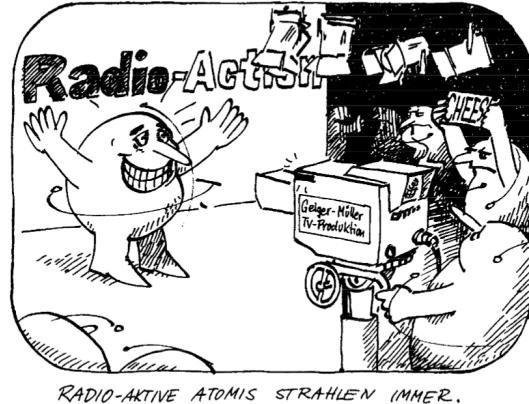


Abbildung 1.1

### 1.2.2 Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie

Atome bestehen aus einem Atomkern und einer Hülle. Der Atomkern ist aus Neutronen und Protonen, den sogenannten Nukleonen, aufgebaut. Die Atomhülle enthält die Elektronen. Wenn nun Gammastrahlung, also energiereiche Photonen, auf ein Atom treffen, so können mehrere Arten von Wechselwirkung auftreten: Die Photonen können einerseits mit den Elektronen in der Atomhülle, mit den Coulombfeldern des Atoms oder mit den Nukleonen im Atomkern interagieren. Es kann dabei zum Photoeffekt, zum Comptoneffekt oder zum Paareffekt kommen.

## Photoeffekt

Bei diesem Wechselwirkungsprozess wird die gesamte Energie eines Photons an ein Elektron abgegeben. Das Elektron wird aus dem Atom ausgestossen. Dabei wird die gesamte Energie des Photons auf das Elektron übertragen.

Der Photonenimpuls muss beim Photoeffekt immer von zwei Partnern aufgenommen werden: Dem Elektron und dem ionisierten Restatom. Der Photoeffekt findet daher nur an gebundenen Elektronen statt, da freie Elektronen auf Grund der Impulserhaltung nicht in der Lage sind, Photonen vollständig zu absorbieren.

Nach der Absorption des Photons durch das Elektron ist das Restatom ionisiert - es fehlt ein Elektron. Diese Lücke wird durch Nachrücken von Elektronen aus höheren Schalen aufgefüllt. Dabei wird Energie in Form von Röntgenstrahlung frei. Der Photoeffekt wird unter anderem in Photokathoden ausgenutzt (siehe Kapitel zum Versuchsaufbau).

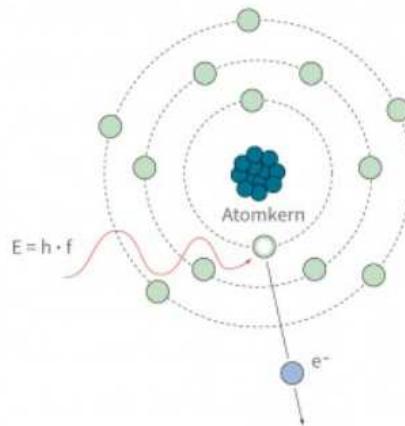


Abbildung 1.2: Beim Photoeffekt wird die gesamte Energie eines Photons an ein im Atom gebundenes Elektron abgegeben. Das Elektron verlässt dabei die Atomhülle, wodurch das Atom ionisiert wird.

Die Wahrscheinlichkeit für den Photoeffekt nimmt einerseits mit steigender Photonenenergie rasch ab, steigt allerdings mit steigender Ordnungszahl sehr stark an. Daher ist der Photoeffekt der dominierende Wechselwirkungsprozess niederenergetischer Photonen mit Atomen hoher Ordnungszahl.

## Comptoneffekt

Je grösser die Energie  $E_\gamma$  eines Photons, desto wahrscheinlicher findet der Comptoneffekt statt. Dabei wird ein Photon nur einen Teil seiner Energie auf ein locker gebundenes oder freies Elektron übertragen und dabei eine Richtungsänderung erfahren.

Der Comptoneffekt ist ein elastischer Stoß zwischen Photon und Elektron, bei dem das Photon nach dem Stoß eine vermindernde Energie  $E'_\gamma$  hat. Diese ist gegeben durch

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma \cdot m_e \cdot c^2}{m_e \cdot c^2 + E_\gamma \cdot [1 - \cos(\theta)]} \quad (1.1)$$

Dabei ist  $m_e \cdot c^2$  die Ruheenergie des Elektrons. Die graphische Darstellung des Comptoneffekts zeigt, dass die Änderung der Photonenenergie vom Streuwinkel  $\theta$  abhängt, wobei sämtliche Streuwinkel im Bereich zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  möglich sind. Bei der Vorwärtsstreuung des Photons mit einem Winkel von  $\theta = 0^\circ$  tritt kein Energieübertrag vom Photon auf das Elektron auf, während bei einer Rückstreuung des Photons mit dem Winkel  $\theta = 180^\circ$  – genannt

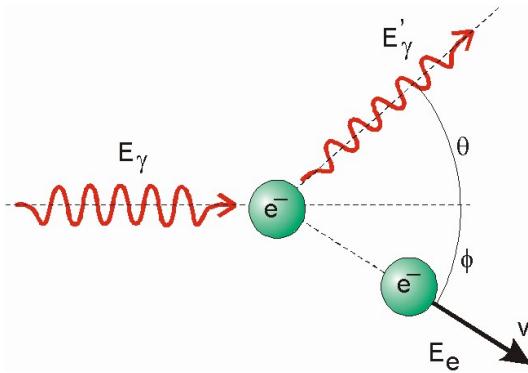


Abbildung 1.3: Beim Comptoneffekt überträgt ein Photon einen Teil seiner Energie  $E_\gamma$  auf ein locker gebundenes oder freies Elektron  $e^-$  und erfährt dabei eine Richtungsänderung um den Winkel  $\theta$ . Für den Winkel  $\theta$  kommen alle Größen zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  in Frage. Das gestreute Photon hat eine Energie von  $E'_\gamma$ . Das zu Beginn ruhende Elektron hat nach dem Stoss eine kinetische Energie  $E_e$ .

*Backscatter* – der maximale Energieübertrag vom Photon auf das Elektron beobachtet werden kann. Das gestreute Photon hat dann die Energie

$$E_\gamma^{\text{BSC}} = \frac{511 \text{ keV} \cdot E_\gamma}{511 \text{ keV} + 2 \cdot E_\gamma} \quad (1.2)$$

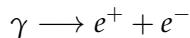
Dabei wurde für  $m_e \cdot c^2$  die Ruheenergie des Elektrons von 511 keV und für den Streuwinkel  $\theta = 180^\circ$  in Gleichung 1.1 eingesetzt. Die maximale Energie, welche beim Backscattering auf das Elektron übertragen wird, bestimmt die Lage der Comptonkante  $E_\gamma^C$  im Energiespektrum. Diese lässt sich berechnen mit der Formel

$$E_\gamma^C = E_\gamma - E_\gamma^{\text{BSC}} = \frac{2 \cdot (E_\gamma)^2}{511 \text{ keV} + 2 \cdot E_\gamma} \quad (1.3)$$

Der Comptoneffekt ist bei Elementen mit kleiner Ordnungszahl für Photonen zwischen 50 keV und 15 MeV und bei Elementen mit hoher Ordnungszahl zwischen 0.5 MeV und 5 MeV der wahrscheinlichste Wechselwirkungsprozess.

## Paareffekt

Bei diesem Wechselwirkungsprozess wird ein Photon  $\gamma$  im Coulombfeld eines Atomkerns spontan in je ein Elektron  $e^-$  und ein Positron  $e^+$  umgewandelt. Dies kann nur geschehen, wenn die Energie des Photons der doppelten Ruheenergie des Elektrons entspricht, also grösser ist als 1022 keV. Die Differenz zur ursprünglichen Photonenenergie wird als kinetische Energie an die beiden Teilchen abgegeben.



Ein Positron ist im Unterschied zum Elektron positiv geladen, hat aber die gleiche Masse. Das Positron hat eine sehr kurze Lebensdauer von rund  $10^{-8}$  s. Anschliessend wird es beim Prozess der *Anihilation* zusammen mit einem freien Elektron zu zwei Photonen mit je 511 keV Energie. Diese Energie entspricht der Ruheenergie von Elektron und Positron.

Weil bei der Umwandlung radiaktiver Nuklide selten Gammastrahlung mit Energien grösser als 1 MeV emittiert wird, ist der Paareffekt von geringerer Bedeutung. Da bei der Paarbildung Energie, Impuls und Ladung erhalten sein müssen, ist stets ein dritter Stosspartner erforderlich. Diese Rolle übernimmt der Atomkern, der den Impuls übernimmt, aber kaum Rückstossenergie wegen seiner grossen Masse.

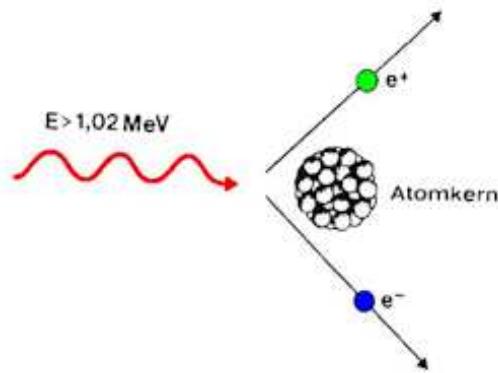


Abbildung 1.4: Ein Photon  $\gamma$  mit einer Energie von mehr als 1022 keV kann im Coulombfeld eines Atomkerns spontan in ein Elektron  $e^-$  und ein Positron  $e^+$  zerfallen. Die Differenz zwischen der Energie des Photons  $\gamma$  und der Ruheenergie der erzeugten Teilchen  $e^-$  und  $e^+$  wird als kinetische Energie an die erzeugten Teilchen abgegeben. Man spricht bei diesem Prozess von Paarbildung.



Abbildung 1.5: Da ein Positron eine sehr kurze Lebensdauer von nur rund  $10^{-8} \text{ s}$  hat, wird es direkt nach der Entstehung durch Paarbildung zusammen mit einem freien Elektron  $e^-$  zu zwei Photonen zerfallen. Diesen Prozess nennt man Anihilation.

### Bremsstrahlung und charakteristische Röntgenstrahlung

Wenn ein geladenes Betateilchen in die Nähe eines Atomkerns kommt, erfährt es wegen der Coulombkraft eine Beschleunigung, die sich mit zunehmender Distanz dann allerdings wieder verringert. Dieser Prozess führt zu Photonen mit Energien im Röntgenbereich, welche *Bremsstrahlung* genannt werden.

Wenn beispielsweise durch den Compton- oder Photoeffekt Elektronen aus inneren Schalen eines Atoms entfernt werden, wird das entstandene Loch sofort gefüllt, indem ein Elektron aus einer höheren Schale unter Abgabe eines Photons verschoben wird. Hier spricht man von *charakteristischer Röntgenstrahlung*. Dieses Photon muss vom Elektron aus Gründen der Energieerhaltung abgegeben werden, weil es sich in der inneren Schale auf einem tieferen Energieniveau befindet.

Röntgenstrahlen und Gammastrahlen sind elektromagnetische Wellen. Der Unterschied liegt im Ursprung: Röntgenstrahlen stammen aus der Hülle eines Atoms (z.B. Bremsstrahlung, charakteristische Strahlung), während Gammastrahlung mit dem metastabilen Zustand eines Atomkerns zu tun hat.

Bremsstrahlung ist insbesondere beim Thema Abschirmung von grosser Bedeutung. Versucht man beispielsweise eine Quelle abzuschirmen, welche Betastrahlung mit hoher Energie abgibt, so ist im Falle einer Bleiabschirmung damit zu rechnen, dass die Betateilchen im Coulombfeld der grossen Bleikerne stark beschleunigt werden und Bremsstrahlung entsteht. Diese Sekundärstrahlung ist unter Umständen deutlich schwieriger abzuschirmen als die Primärstrahlung.

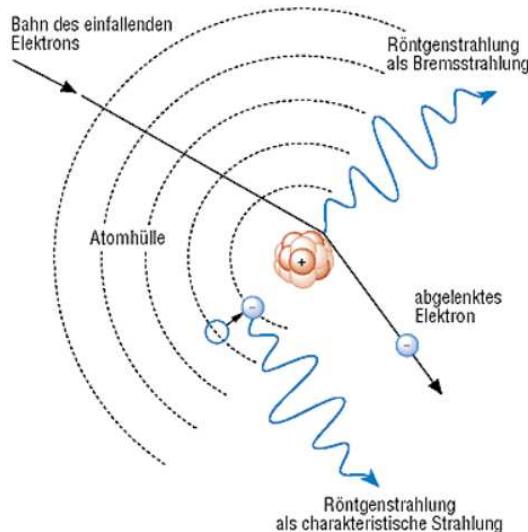


Abbildung 1.6: Betateilchen sind Elektronen oder Positronen. Wenn diese an einem Atomkern vorbeifliegen, erfahren sie wegen der Coulombkraft eine Beschleunigung. Aus Gründen der Energieerhaltung muss während der Beschleunigungsphase ein Photon im Röntgenbereich abgegeben werden, das Bremsstrahlung genannt wird. Bremsstrahlung ist von charakteristischer Röntgenstrahlung zu unterscheiden - letztere entsteht, wenn ein Elektron aus einer äusseren Schale in eine innere Schale nachrückt, nachdem dort durch Compton- oder Photoeffekt ein Elektron herausgeschleudert wurde. Wegen der Energieerhaltung muss auch dieses Elektron ein Photon im Röntgenbereich abgeben.

### 1.2.3 Gammaspektrometrie

Bei der Gammaspektrometrie treffen energiereiche Photonen, die Gammastrahlen, auf einen Kristall, also ein Gitter aus Atomen. Dabei finden wie im vorherigen Kapitel beschrieben Wechselwirkungen zwischen der Gammastrahlung und der Materie statt: Es kann zu Photoeffekt, Comptoneffekt, Paareffekt, Bremsstrahlung oder auch charakteristischer Röntgenstrahlung kommen.

Bei der *Gammaspektroskopie* geht es darum, mit einer qualitativen Messung zu zeigen, welche Nuklide in einer Probe vorhanden sind. Im Unterschied dazu wird bei der *Gammaspektrometrie* auch die Aktivität der einzelnen Nuklide quantitativ bestimmt.

### 1.2.4 Anwendungen der Gammaspektrometrie

Die Gammaspektrometrie hat zahlreiche Anwendungen in vielerlei Gebieten. Hier sei eine kleine Auswahl vorgestellt:

- Nuklearmedizin: Räumliche Darstellung der Aktivitätsverteilung von vorab verabreichten Tracern (wie z.B.  $^{99}\text{Tc}$ ) im Körper mit Gammakameras, Einzelphotonenemissionscomputertomographie (SPECT) und Positronen-Emissions-Tomographie (PET)
- Überwachung der Lebensmittelsicherheit
- Altersbestimmung von Fundstücken in der Archäologie mittels  $^{14}\text{C}$ -Methode
- Satellitendetektoren und Gammakameras in Observatorien zur Untersuchung des Weltraums

- Detektoren in der Teilchenphysik, z.B. am CERN
- Methode zur Untersuchung radioaktiver Abfälle, um über deren Behandlung und Lagerung zu entscheiden
- Bestimmung der nuklidspezifischen Anteile von Bodenproben durch die nationale Alarmzentrale (NAZ), die NAGRA oder das ENSI
- Nachweis von Nuklearwaffentests, z.B. durch internationale Organisationen
- usw.

## 1.3 Versuchsaufbau

Über ein Türchen in der gelben Bleiabschirmung kann eine Probe in den Detektor platziert werden. Über der Probe befindet sich ein Szintillatorkristall. Energieriche Photonen oder geladene Teilchen, welche von der Probe abgestrahlt werden, erzeugen Lichtblitze in diesem Kristall. Diese schlagen Elektronen aus einer Photokathode, welche in einem Photomultiplier zu einem messbaren Signal verstärkt werden. Dieses Signal ist proportional zur Intensität der von der Probe abgegebenen Strahlung. Ein Mehrkanalanalysator zählt die Signale bei verschiedenen Energien, so dass am Computer ein Spektrum ausgegeben werden kann. Um das Experiment zu verstehen, ist es wichtig die einzelnen Bestandteile des Versuchsaufbaus genauer anzuschauen. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Komponenten detaillierter besprochen.



Abbildung 1.7: In diesem Versuch werden NaI-Detektoren (gelb) für die Gammaspektrometrie verwendet. Diese werden über eine externe Spannungsversorgung (hinter den Detektoren) betrieben. Ein weiteres Modul sorgt für die Verstärkung des Signals, bevor dieses vom Computer aufgezeichnet wird.

### 1.3.1 Szintillatorkristall

Wenn energieriche Photonen oder geladene Teilchen sich durch einen Szintillatorkristall bewegen, so werden dessen Atome bzw. Moleküle durch Stöße angeregt. Um wieder in den Grundzustand zurück zu kommen, geben die Moleküle anschliessend Energie in Form von Photonen ab. Solche Lichtblitze nennt man *Szintillation* des Materials. Aus der Lichtmenge

kann die Energie der Teilchen bestimmt werden. Die Intensität kann aus der Anzahl der Photonen pro Zeiteinheit bestimmt werden.

Szintillatoren sind Monokristalle, das heisst, die Atome bzw. Moleküle des Szintillatorkristalls bilden ein homogenes, durchgehend einheitliches, geordnetes Gitter - nur so ist der Kristall genügend durchlässig. Es gibt anorganische und organische Szintillatorkristalle. Natriumiodid, Cäsiumiodid, Bismutermanat und Bleiwolframat sind bekannte anorganische Szintillatoren. In diesem Experiment soll ein Natriumiodidkristall verwendet werden.



Abbildung 1.8: Ein quaderförmiger Szintillatorkristall ist an einen Photomultiplier (unten links) angebracht. Der besseren Sichtbarkeit wegen befindet sich der Kristall für das Foto auf einem schwarzen Blatt Papier. Es handelt sich hier um ein Symbolbild, der Kristall stammt aus einem Experiment am Paul Scherrer Institut (PSI) in Villigen.

Bei anorganischen Kristallen, wie sie in diesem Experiment benutzt werden, erzeugen geladene Teilchen ( $\beta$ -Strahlung) oder energiereiche Photonen ( $\gamma$ -Strahlung) im Kristall freie Elektronen (bzw. Löcher). Die angeregten Zustände können im Kristallgitter umherwandern, bis sie auf die im Kristall eingebauten (dotierten) Aktivatorzentren treffen und diese anregen. Nach der Anregung fällt das Aktivatorzentrum in den Grundzustand zurück und emittiert dabei ein Photon. Damit ist der Ionisationsverlust der Primärteilchen (z.B.  $\beta$ -Teilchen,  $\gamma$ -Quant) proportional zur Anzahl an Photonen, welche im Kristall erzeugt werden.

Weil Licht zu Störsignalen im Szintillatorkristall führt, ist dieser mit schwarzer Folie vollständig lichtdicht eingepackt. Energiereiche Gammastrahlung und Betastrahlung wird durch diese Folie nicht abgeschirmt.

### 1.3.2 Photomultiplier

Der Photomultiplier ist ein Gerät, das einen Lichtblitz in eine messbare Spannung verwandelt. Der Lichtblitz, auch Photon genannt, trifft dabei auf die Photokathode. Diese Photokathode ist sehr dünn und aus einem Material mit der speziellen Eigenschaft, dass ein auftreffendes Photon auf der anderen Seite ein Elektron herausschlägt. Man nennt dies den photoelektrischen Effekt.

Ein einzelnes Elektron kann immer noch kaum gemessen werden. Daher geht es nun im weiteren darum, aus einem einzigen (oder einigen wenigen) Elektronen einen messbaren Strom von rund  $10^6$  Elektronen zu erzeugen. Es ist bekannt, dass sich geladene Teilchen wie Elektronen in einem elektrischen Feld beschleunigen lassen. Durch anlegen einer Hochspannung wird das Elektron beschleunigt und schlägt beim Auftreffen auf die erste Dynode zahlreiche Elektronen aus dieser Dynode heraus. Diese Elektronen wiederum werden wieder in einem starken elektrischen Feld beschleunigt, treffen erneut auf eine Dynode und schlagen wiederum eine Vielzahl an Elektronen aus dieser Dynode heraus. Werden an jeder Dynode rund vier

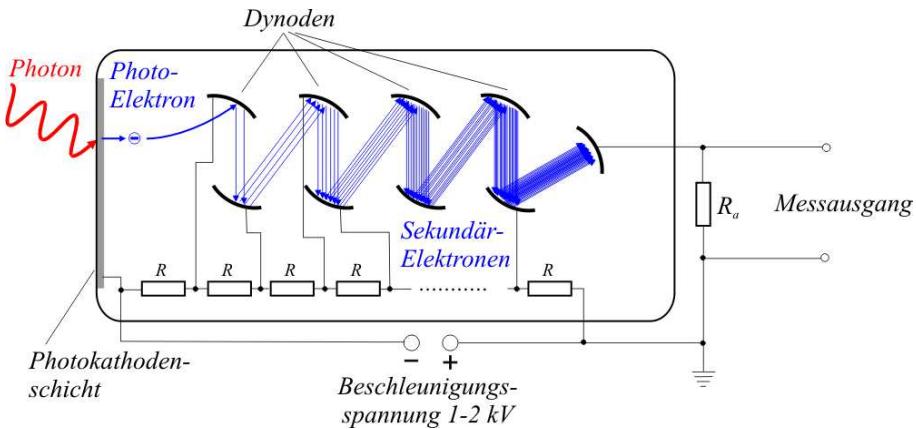


Abbildung 1.9: Ein Photomultiplier ist wie folgt aufgebaut: Eine Photokathode bildet das Einfallsfenster. Wenn ein Photon auf die Photokathode trifft, wird ein Elektron aus dieser herausgeschlagen. Elektronen aus der Photokathode werden im elektrischen Feld zu einer Dynode hin beschleunigt und schlagen weitere Elektronen aus dieser Dynode. Diese werden wiederum in einem elektrischen Feld beschleunigt usw. Durch eine Kaskade von Dynoden wird bei ausreichend grosser Beschleunigungsspannung aus dem ursprünglichen Photon schliesslich ein messbarer Strom.

Elektronen pro einfallendes Elektron herausgeschlagen, so ist nach 10 Dynoden die Anzahl der Elektronen auf  $4^{10} \approx 10^6$  angestiegen - ein messbarer Strom.

Über einen Widerstand kann schliesslich die Spannung am Messausgang gemessen werden, die proportional ist zur Intensität des Photons. Auf diese Weise kann die Intensität des Photons gemessen werden. Diese wiederum ist proportional zu der im Szintillatorkristall deponierten Energie.

### 1.3.3 Hochspannungsversorgung

Damit der Photomultiplier funktioniert, muss eine *negative* Hochspannung von  $-800$  Volt angelegt werden. Diese wird an die sogenannte Basis angeschlossen, welche direkt mit dem Photomultiplier verbunden ist und die unterschiedlichen Dynoden mit der benötigten Spannung versorgt. Die Hochspannung kommt von einer externen Spannungsversorgung. Es ist darauf zu achten, dass die Hochspannung nie höher als  $-800$  Volt eingestellt ist, da sonst der Photomultiplier beschädigt werden kann.

Wie immer beim Experimentieren mit Hochspannung ist mit grosser Vorsicht vorzugehen - insbesondere ist auf defekte oder falsch eingesteckte Kabel zu achten. Im Zweifelsfall ist die zuständige Betreuerin oder der zuständige Betreuer sofort zu informieren.

### 1.3.4 Abschirmung

Eine rund 2 cm dicke Bleiabschirmung ummantelt den Detektor. Diese dient einerseits als Abschirmung und zum Schutz der experimentierenden Personen. Andererseits soll verhindert werden, dass andere radioaktive Quellen in der Nähe die Messungen im Detektor verfälschen oder stören.

### 1.3.5 Zusammenfassung

Die in einen Kristall, hier einem NaI(Tl)-Kristall einfallenden  $\gamma$ -Quanten geben Energie durch Photo- und Comptoneffekt an Elektronen des Kristalls ab oder konvertieren zu Elektron-

Positron-Paaren (Paarbildung). Durch den Energieverlust der in der Folge erzeugten energetischen  $e^-$  wie auch  $e^+$  werden Gitteratome des Kristalls angeregt, welche zum Teil durch Lichtemission wieder zerfallen. Die Zeitkonstante des exponentiellen Abklingens der angeregten Zentren beträgt in NaI(Tl) ungefähr  $0.25\ \mu s$ . Ein Teil der emittierten Lichtquanten trifft auf die Photokathode des Photomultipliers und löst Elektronen via Photoeffekt. Diese werden durch die angelegte Spannung beschleunigt und schlagen beim Auftreffen auf die erste Dynode weitere Elektronen heraus. Dieser Prozess wiederholt sich 10 bis 14 mal je nach Konstruktion. Die Vervielfachung bewirkt, dass an der Anode ein messbarer elektrischer Impuls erzeugt wird. Das Ausgangssignal wird nun mit Hilfe des Verstärkers geformt und im Vielkanalanalysator (englisch Multi Channel Analyser, MCA) nach der Impulshöhe geordnet. Da im allgemeinen alle Prozessstufen linear sind, ist die Impulshöhe proportional zu der im Kristall deponierten Energie.

## 1.4 Durchführung des Versuchs

### 1.4.1 Vor dem Experiment

- Alle Experimentierenden rüsten sich mit einem Dosimeter aus. Dieses ist am Oberkörper zu tragen.
- Im Journal sind folgende Angaben einzutragen: Name der Person, Datum und Uhrzeit, Dosimeter-Nummer und Experiment.
- Dosimeter einschalten: Einschalttaste gedrückt halten, bis ein Pieps ertönt. Anschließend ist das Dosimeter zu resetten.
- Untergrund am Arbeitsplatz bestimmen (sollte im Bereich  $5\ \mu Sv/h$  bis  $20\ \mu Sv/h$  sein).
- Arbeitsbereich mit Strahlenpropeller markieren.
- Der Detektor sollte rund eine Stunde vor Messbeginn eingeschaltet werden. Ansonsten ist Temperatur bedingte Drift in den Spektren zu beobachten, welche die Messergebnisse verfälscht und daher unerwünscht ist.

### 1.4.2 Versuchsdurchführung

Während dem gesamten Experiment ist ein Dosimeter zu tragen. Dieses darf nicht vorzeitig ausgeschaltet werden. Es muss jede Stunde die Pfeiltaste des Dosimeters kurz gedrückt und die bis dahin akkumulierte Dosis überprüft werden. Eine Ortsdosisleistung von bis zu  $20\ \mu Sv$  pro Stunde entspricht der natürlichen Strahlenbelastung, ohne dass radioaktive Quellen im Raum sind. Bei Auffälligkeiten sowie beim Ertönen eines Alarms ist sofort die Betreuerin oder der Betreuer des Versuchs zu informieren.

### Aufgaben

1. Zuerst muss eine Messung ohne Probe im Messraum durchgeführt werden. Dadurch kann eine mögliche Kontamination im Messraum festgestellt werden. Für die Bedienung des Experiments sei auf die Anleitung in Anhang A.1 verwiesen. *Beachte:* Dies ist keine Untergrundmessung. Eine Untergrundmessung wurde bereits vorgängig durchgeführt über 24 Stunden und ist in der Software hinterlegt, wird also automatisch abgezogen.

2. Mach eine Kalibration mit der Cäsium  $^{137}\text{Cs}$  Quelle, indem du wie in Anhang A.1.4 vorgehst. Lege die Quelle auf eine entsprechende Geometrie und schiebe diese in den Messraum. Bestimme den Abstand der Quelle vom Szintillationskristall. Schliesse das Türchen zum Messraum und starte eine Messung. Die Messdauer soll 10 Minuten betragen. Die  $\gamma$ -Energie von  $^{137}\text{Cs}$  findest du im Termschema in Abbildung A.21 im Anhang. Diese Kalibration ist wichtig, um den Kanälen (Histogrammbalken) eine Energie zuordnen zu können.  
*Wichtig:* Der Szintillationskristall ist sehr empfindlich und darf nicht berührt werden, um Beschädigungen vorzubeugen.
3. Speichere das Spektrum von  $^{137}\text{Cs}$  ab wie in Anhang A.1 beschrieben. Wähle dabei eine passende Bezeichnung.
4. Untersuche die verschlossenen Proben mit den Wischtests W-01, W-02, W-03 und W-04 nacheinander. Der Detektor muss dabei nicht erneut kalibriert werden – es sei denn, der Computer wird neu gestartet. Gehe für die Messungen wiefolgt vor:
  - Sehr starke Quellen, das heisst solche mit grosser Dosisleistung, können mit diesem Detektor nicht gemessen werden - der NaI(Tl)-Detektor würde überladen. Miss daher zuerst mit einem geeigneten Messgerät (z.B. einer AD4- oder AD6-Sonde) die Ortsdosisleistung im Abstand von rund 10 cm zur jeweiligen Quelle. Es ist wichtig, dass dabei jeweils keine anderen Quellen in der direkten Nähe liegen. Bei den im NaI(Tl)-Detektor messbaren Quellen gilt, je schwächer die Quelle, desto näher an den Kristall sollte sie platziert werden.
  - Platziere die Quelle im Messraum in geeigneter Höhe und bestimme vorsichtig den Abstand der Probe zum Szintillationskristall. Schliesse danach den Messraum. Starte eine Messung mit einer Messdauer von rund 10 Minuten.
  - Stoppe anschliessend die Messung und speichere das Spektrum ab, wobei als Bezeichnung sich die Probennummer anbietet.
5. Bei den Lebensmittelproben L-01 und L-02 handelt es sich um Proben getrockneter Pilze aus dem Alpenraum. Gehe wie bei den vorherigen Proben vor, zeichne die jeweiligen Spektren auf und speichere diese unter einem sinnvollen Namen ab.
6. Die Lebensmittelproben L-03 und L-04 sind identisch. Wähle *eine* dieser beiden Proben aus, zeichne das Spektrum auf und speichere dieses ab. Gehe danach für die Probe L-05 analog vor.
7. Exportiere sämtliche aufgenommenen Spektren als Datensatz (nach Anhang A.1.5) *und* als Bild (nach Anhang A.1.6).

### 1.4.3 Nach dem Experiment

- Radioaktive Quellen in den Quellenschrank wegräumen lassen durch die Betreuerin oder den Betreuer
- Arbeitsplatz aufräumen und reinigen
- Arbeitsplatz freimessen
- Hände sehr gut Waschen
- Auf dem Dosimeter erneut die Pfeiltaste drücken und die insgesamt akkumulierte Dosis auf dem Dosimeter ablesen

- Dosis im Journal zusammen mit der Rückgabezeit des Geräts in der gleichen Zeile notieren und unterschreiben
- Dosimeter ausschalten: Einschalttaste so lange gedrückt halten, bis OFF auf dem Display steht
- Gerät zurücklegen

## 1.5 Aufgaben zur Auswertung

1. Analysiere die gemessenen Spektren. Gehe dabei wie folgt vor:
  - Markiere alle zu erkennenden Strukturen (z.B. Photopeak, Röntgenlinien, Comptonkante, Compton-Kontinuum, Backscatterpeak, Paarbildung, usw.) in den Spektren und notiere ihre Energien.

*Hinweis:* Die Formeln 1.2 und 1.3 helfen beim Identifizieren des Backscatterpeaks und der Comptonkante. Röntgenstrahlen haben Energien zwischen 120 eV und 120 keV.

  - Erkläre, warum es wichtig ist, obige Strukturen zu erkennen und zu identifizieren.
  - Lege einen Gaussfit an alle Photopeaks und bestimme damit möglichst exakt die jeweiligen Energien der Gammastrahlung. *Tipp:* Anleitung in Anhang A.2
  - Interpretiere die Spektren mit Hilfe der Termschemata in Anhang A.3. Kannst du jeweils eindeutig sagen, um welche Radionuklide es sich handelt?
2. Berechne an Hand von Literaturwerten für die Photopeaks mit im Theorienteil angegebenen Formeln  $E^{BSC}$  und  $E^C$  und überprüfe, ob diese Strukturen in den experimentell gemessenen Spektren am richtigen Ort sind.
3. Welche zusätzlichen Strukturen weisen die Spektren auf und was ist ihre Interpretation?
4. Hast du anhand der gemessenen Spektren herausgefunden, bei welcher Probe es sich um Strontium  $^{90}\text{Sr}$  handelt? Erkläre.
5. Schätze jeweils die Anzahl Counts im Photopeak ab und bestimme unter Berücksichtigung der Distanz zum Szintillatorkristalls die  $\gamma$ -Aktivität der Proben ab.
6. Schätze dann mit Hilfe der Termschemata im Anhang A.3 an Hand der  $\gamma$ -Aktivität die Gesamtaktivität  $A$  der Proben ab.
7. Würdest du die untersuchten Lebensmittelproben als unbedenklich einordnen und die entsprechenden Lebensmittel für den Verzehr freigeben? Begründe.
8. Überlege dir, welchen Einfluss die Grösse des Szintillationskristalls auf die Form der Spektren, insbesondere die Intensitätsverhältnisse zwischen Photopeak, Compton-Kontinuum und Paarbildungslinien hat. Wie gut ist die Auflösung des verwendeten NaI-Detektors, wenn du die gemessenen Spektren mit denjenigen aus Abbildung A.26 vergleichst?
9. Untersuche systematische und statistische Fehler, schätze die Messungenauigkeit ab und interpretiere die Ergebnisse.
10. Welche Vorteile und Anwendungen hat die Gammaspektrometrie? Wo liegen die Grenzen dieser Technologie?

## 1.6 Literatur

Es gibt zahlreiche gute Bücher über die Atom- und Kernphysik. Eine kleine Auswahl sei hier gegeben:

- B. Povh, *Kerne und Teilchen*, Springer Verlag, 2013
- H. Krieger, *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*. Vieweg+Teubner Verlag, 2007

Zu den Themen Radioaktivität und Strahlenschutz finden sich diverse Unterlagen auf der Webseite des Anfängerpraktikums Physik. Es wird empfohlen, diese vorgängig gut zu studieren.

## Appendix

### A.1 InterWinner 5.0

Die Spektren werden mit der Software *InterWinner 5.0* erfasst. Einige hilfreiche Befehle und Funktionen sind im folgenden zusammengestellt.

#### A.1.1 Computer einschalten

Die Computer arbeiten mit dem Betriebssystem Windows NT. Das Einschalten geht wie folgt:

1. Die Stromleiste auf dem Tisch einschalten.
2. Den Hauptschalter hinten oben am Computer auf ON stellen.
3. Den Einschaltknopf vorne am Computer drücken - dann (lange) warten.
4. Die drei Tasten *Ctrl + Alt + Delete* gleichzeitig drücken. Der Benutzername ist *radio*, das Feld für das Kennwort bleibt frei. Mit *OK* die Eingabe bestätigen.
5. Den Dienstprotokoll-Manager schliessen.

#### A.1.2 Spektren aufzeichnen und verwalten

InterWinner 5.0 starten	Das Symbol auf dem Desktop anklicken. Alternativ unter <i>Start</i> auf <i>InterWinner 5.0</i> gehen und <i>InterWinner</i> anklicken
Messung starten	Klick auf die grüne Ampel oder Taste <i>F2</i>
Messung stoppen	Klick auf die rote Ampel oder Taste <i>F3</i>
Messung löschen	Klick auf die orange Ampel oder Taste <i>F4</i>
Spektren speichern	Oben links im Menü unter <i>File</i> auf <i>Save as</i> klicken
Spektren herunterladen	Oben links im Menü <i>File</i> auf <i>Open</i> klicken und gewünschtes Spektrum auswählen
Analyse	Unter <i>Edit</i> auf <i>Analysis</i> klicken, ein Berichtfenster öffnet sich
Sprache ändern	Klicke auf <i>Einstellungen</i> , wähle <i>Bildschirmanzeige</i> und klicke auf die gewünschte Sprache (Englisch oder Deutsch)



Abbildung A.10: Mit der grünen Ampel kann die Messung gestartet werden, die rote Ampel stoppt die Messung und die orange Ampel setzt das Spektrum zurück.

### A.1.3 Spektren anzeigen und skalieren

Y-Achse skalieren	Cursor auf dem Spektrum platzieren, rechte Maustaste drücken und Y scale auswählen
Art der Skala ändern	Durch Klicken auf <i>Counts/Channel</i> zwischen linearer, LOG oder SQRT-Skala wechseln
X-Achse skalieren	Taste F9 zum Vergrößern, F10 zum Verkleinern
Region vergrößern	Den Cursor auf dem Spektrum halten und die linke Maustaste drücken
Zoomen	Linke Maustaste gedrückt halten und dabei über die ROI fahren

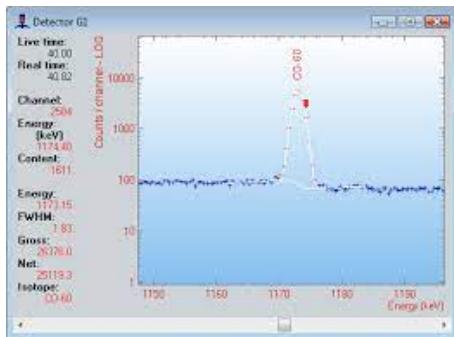


Abbildung A.11: Ein Spektrum wurde aufgezeichnet. Mit den genannten Befehlen lassen sich die Achsen skalieren oder ins Spektrum zoomen.

### A.1.4 Detektor kalibrieren

Ein Spektrum ist nichts anderes als ein Histogramm. Um nun jedem Kanal, also jedem Intervall des Histogramms eine entsprechende Energie zuzuordnen, muss der Detektor zu Beginn kalibriert werden. Dafür ist wie folgt vorzugehen:

1. Eine bekannte Quelle unter dem Detektor platzieren und das Spektrum aufzeichnen.
2. Die verschiedenen Peaks als *Region of Interest*, kurz ROI, markieren. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten:
  - Automatisch: Den Cursor irgendwo im Peak platzieren und die *INSERT* Taste drücken. Der entsprechende Peak wird automatisch rot markiert.
  - Manuell: Den Cursor am Anfang des Peaks platzieren und die *Shift* Taste drücken. Der Cursor verwandelt sich dadurch in einen Stift, den man mit der Maus bewegen kann. Die gewünschte Breite des Peaks so definieren, dann die *Shift* Taste loslassen.

Es öffnet sich ein Fenster, in dem man die Farbe für die Markierung des Peaks auswählen kann.

Möchte man nur einen einzigen Kanal markieren, so kann man den Cursor auf diesen Kanal platzieren und die + Taste drücken. Die Markierung kann man entsprechend mit der – Taste aufheben.

Möchte man die Markierung einer ROI aufheben, so ist wie bei der manuellen Markierung vorzugehen und anstatt einer Farbe die Funktion *Erase* zu wählen.

3. Oben links auf *Edit* klicken und *Calibration* wählen. Es öffnet sich ein Fenster. In diesem Fenster sieht man ein Spektrum, in welchem man mit einem Rechtsklick ein Kontextmenü öffnen kann. Wähle dort *X-Scale Expand*.

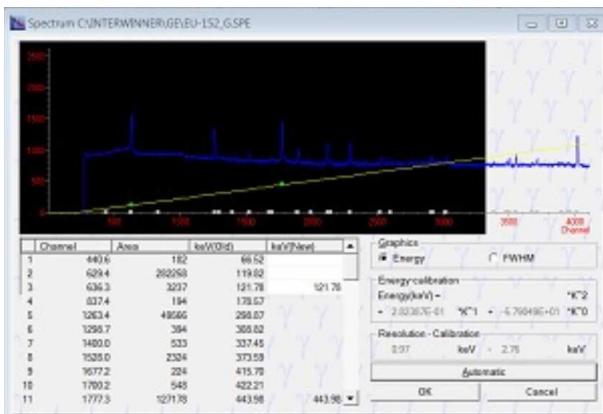


Abbildung A.12: Fenster mit Spektrum zur Kalibration. Es ist das kleine Quadrat beim gewünschten Peak der zu kalibrierenden Energie zuzuordnen.

4. Nun gilt es herauszufinden, welches der kleinen farbigen Quadrate dem Maximum des Photopeaks entspricht. Klicke diesen Punkt an. Dadurch öffnet sich wieder ein Kontextmenü.
5. Wähle *Manual Input* und gib im Fenster *Peak Energy* den Literaturwert für den gewählten Photopeak ein (diesen findest du im entsprechenden Termschema im Anhang A.3). Bestätige dann mit *OK* und wähle unten rechts erneut *OK*.
6. Ein neues Fenster öffnet sich und fragt *Calibrate input DET 1?* Klicke auf *YES*. Es folgt die Meldung *Calibration of input DET 1 done!* Das bedeutet, dass jedem Kanal eine bestimmte Energie zugeordnet wurde. Bitte mit *OK* bestätigen.

Im Spektrum kann man unten links durch Klicken auf Energie bzw. Kanal (Channel) zwischen der Anzeige in Energie bzw. der Kanalnummer wechseln. Darüber hinaus kann der Cursor an einer beliebigen Stelle im Spektrum platziert werden, und die zu diesem Ort gehörende Energie bzw. der entsprechende Kanal kann unten rechts abgelesen werden. Beachte: Ohne vorgängige Kalibration sind gemessene Spektren nicht aussagekräftig.

### A.1.5 Spektrum als Datensatz exportieren

Der Datensatz entspricht einer Tabelle, die jedem Kanal bzw. jeder Energie die Anzahl der Counts zuordnet. Exportiert man den Datensatz, so kann man auf einem anderen Computer mit entsprechender Analysesoftware wie z.B. Origin die Daten auswerten.

1. Öffne das gewünschte Spektrum und stelle sicher, dass auf der horizontalen Achse die Energie (und nicht die Kanäle) aufgetragen sind. Klicke dann oben auf das Register *Macros* und wähle *Spec to ASCII*.
2. Wähle bei *Give a File Name* eine passende Bezeichnung und drücke *OK*. Das Spektrum wird dann im ASCII Format auf dem Laufwerk (C:) gespeichert.
3. Öffne auf dem Desktop den *Arbeitsplatz*, gehe ins Laufwerk (C:) und wähle die soeben abgespeicherte Datei. Öffne diese mit dem Programm *Word Pad*.
4. Versichere dich, dass sich die Diskette im Laufwerk (A:) befindet.
5. Gehe in Word Pad auf *Datei*, wähle *Speichern unter* und nutze die 3<sup>1</sup>/<sub>2</sub>-Diskette auf Laufwerk (A:) zum Speichern. Das Dateiformat sollte *txt* (Textdatei) sein.
6. Wirf die Diskette aus mit dem Knopf neben dem Diskettenlaufwerk und nutze das externe Diskettenlaufwerk, um die Daten auf dein persönliches Notebook oder einen beliebigen Computer im Praktikum mit USB-Anschluss zu übertragen.
7. Lösche die Spektren auf der Diskette anschliessend, da deren Speicherkapazität stark beschränkt ist.

#### A.1.6 Spektrum als Bild exportieren

1. Klicke auf *File* und wähle *Preview graphic*.
2. Mache einen Rechtsklick im Spektrum und wähle *Export bitmap file*. Als Format ist 1024 × 768 zu wählen und das Dateiformat *PNG* sei empfohlen. Mit *OK* bestätigen.
3. Vergewissere dich, dass eine Diskette im Laufwerk (A:) ist. Wähle einen Dateinamen (mit Endung *.png*) und drücke dann auf *OK*.
4. Mache erneut einen Rechtsklick im Spektrum und wähle *close*, um das Menü zu schliessen und den Vorgang zu beenden.
5. Wirf die Diskette aus mit dem Knopf neben dem Diskettenlaufwerk und nutze das externe Diskettenlaufwerk, um die Daten auf dein persönliches Notebook oder einen beliebigen Computer im Praktikum mit USB-Anschluss zu übertragen.
6. Lösche die Spektren auf der Diskette anschliessend, da deren Speicherkapazität stark beschränkt ist.

#### A.1.7 Ausschalten

1. Alle Spektren speichern (siehe oben).
2. Programm *Interwinner 5.0* schliessen.
3. Unten links auf *Start* klicken, dann *Beenden* wählen und auf *Computer herunterfahren* klicken und mit *OK* bestätigen.
4. Den Hauptschalter hinten am Computer Tower (oben links) ausschalten.
5. Vergewissere dich, dass die Hochspannung (HV) des Detektors ausgeschaltet ist. Dann die Stromleiste ausschalten, um das Experiment vom Stromnetz zu trennen.

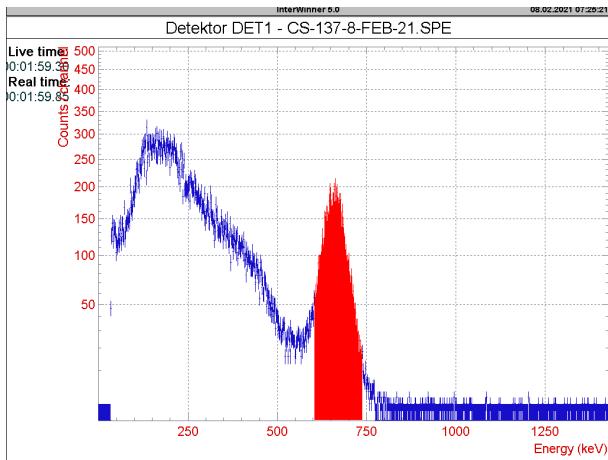


Abbildung A.13: Das mit *Interwinner 5.0* aufgenommene Spektrum wurde als Bild exportiert. Der Photopeak ist rot markiert. Es handelt sich um ein Cäsiumspektrum.

## A.2 Analyse mit Origin

### A.2.1 Datensatz mit Origin plotten

Eine Anleitung zur Installation und Registrierung von Origin sowie ein Tutorial mit den Grundfunktionen findet sich auf der Webseite des Anfängerpraktikums Physik.

1. Das USB-Diskettenlaufwerk an einen Computer mit der Software *Origin* anschliessen. Das zuvor abgespeicherte Dokument im txt-Format öffnen (z.B. mit einem Editor wie *Word Pad*, *Kate* oder *TeXmaker*).
2. Alle Daten im Textdokument markieren.
3. Die Daten mit *Ctrl + C* kopieren und mit *Ctrl + V* ins Programm *Origin* einfügen.
4. Im Spaltenkopf passende *Langnamen* für die Achsenbeschriftung eingeben.
5. Unten links ein Punktdiagramm erstellen durch Klicken auf das Icon.
6. Im Punktdiagramm einen Doppelklick auf einen Datenpunkt (kleines schwarzes Quadrat) machen und die Grösse (Size) reduzieren - z.B. auf 3.
7. Das ganze unter *Datei* als *Projekt speichern*.

### A.2.2 Gaussfit an Photopeak anlegen mit Origin

1. Im Register *Analyse* auf *Anpassen* klicken, *Nichtlinearer Fit* wählen und *Dialog öffnen* wählen.
2. In der Kategorie *Origin Basic Function* die Funktion *Gauss* auswählen.
3. Links davon unter Datenauswahl bei *Eingabedaten* auf den Rechtspfeil/Dreieck klicken und *alle Daten des Diagramms erneut auswählen* anklicken.
4. Mit dem Auswahlwerkzeug den Photopeak markieren.
5. Auf den kleinen, roten Pfeil rechts im Fenster klicken und mit *OK* bestätigen.

## 6. Der Parameter $xc$ entspricht dem Kanal (bzw. der Energie) des Photopeaks.

Sind in einem Spektrum mehrere Photopeaks, kann das Vorgehen wiederholt werden, um sämtliche Photopeaks zu fitten. Achte darauf, dass das Diagramm vollständig beschriftet und mit einer Legende versehen ist.

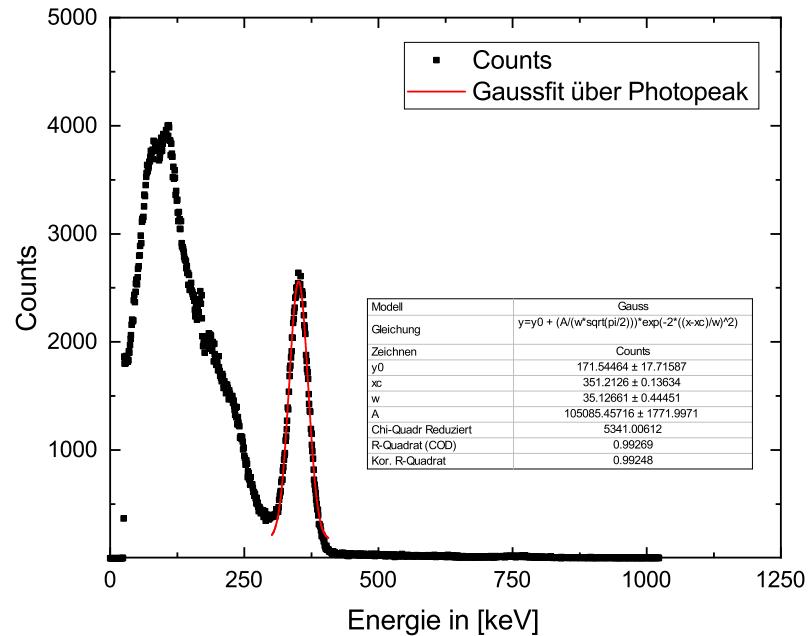


Abbildung A.14: Die Messdaten wurden mit Origin geplottet. Eine Gausskurve wurde nach obiger Anleitung an den Photopeak gelegt. Der Fitparameter  $xc$  gibt die Energie des Photopeaks bei 351 keV an.

### A.3 Termschemata

Ein Termschema gibt die Zerfallskanäle eines Radionuklids an. Die Prozentzahl gibt Auskunft darüber, wie wahrscheinlich ein bestimmter Zerfallskanal ist. Die Bezeichnungen  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\gamma$  und EC geben die Zerfallsarten an. Die Halbwertszeit und die Energie der Strahlung stehen in der Regel bei jedem Zerfall mit dabei. Die Sternchen (\*) stehen für einen metastabilen, das heisst angeregten Zustand. Photonen sind teilweise als vertikale Linien oder Pfeile und teilweise als Wellen dargestellt. Mit Hilfe dieser Termschemata sollen die gemessenen Spektren identifiziert werden.

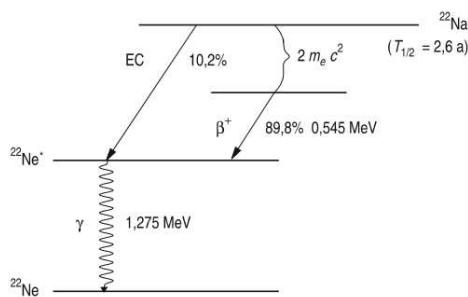


Abbildung A.15: Natrium  $^{22}\text{Na}$

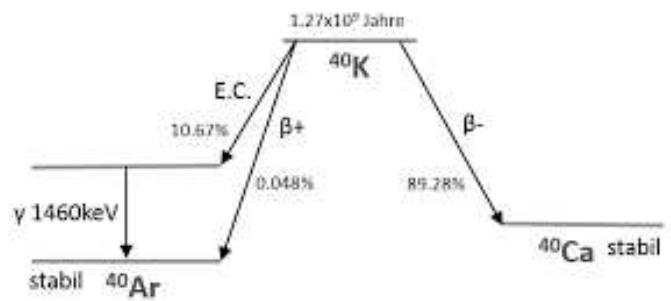


Abbildung A.16: Kalium  $^{40}\text{K}$

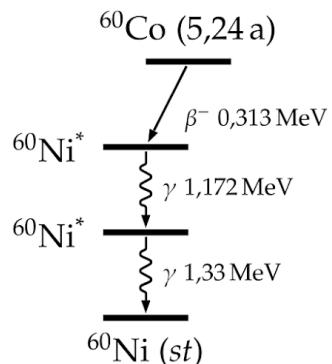


Abbildung A.17: Cobalt  $^{60}\text{Co}$

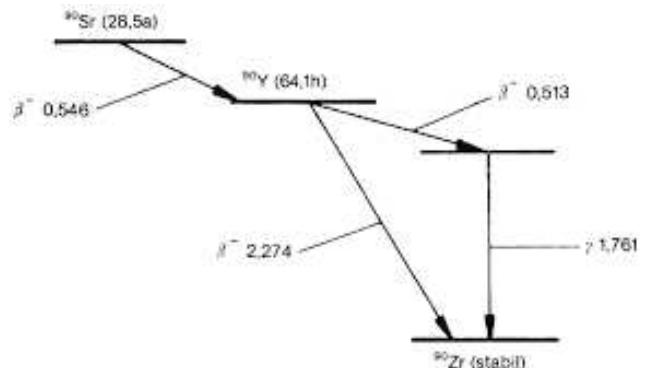


Abbildung A.18: Strontium  $^{90}\text{Sr}$

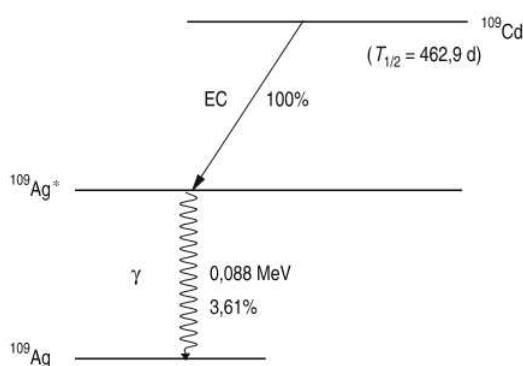


Abbildung A.19: Cadmium  $^{109}\text{Cd}$

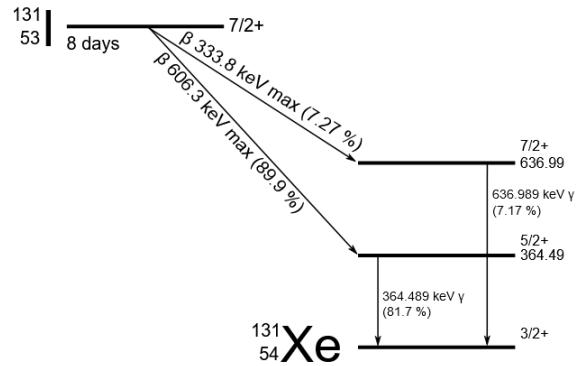


Abbildung A.20: Iod  $^{131}\text{I}$

$^{137}\text{Cs}$  (30 a)

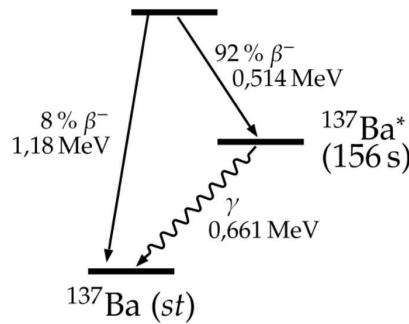


Abbildung A.21: Cäsium  $^{137}\text{Cs}$

$^{238}\text{U}$

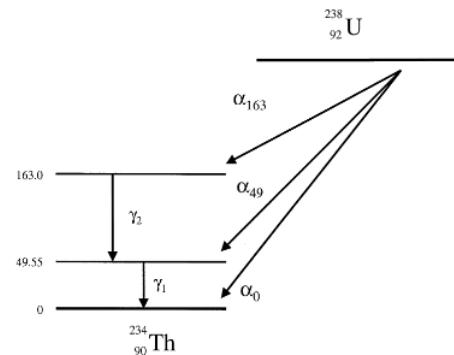


Abbildung A.22: Uran  $^{238}\text{U}$

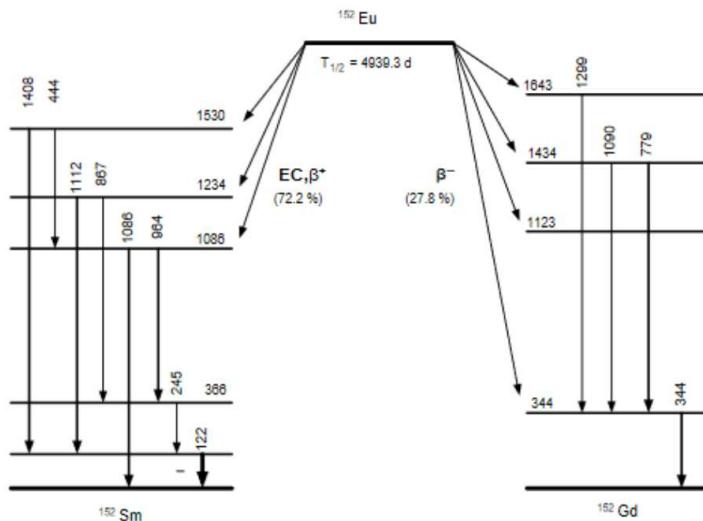


Abbildung A.23: Europium  $^{152}\text{Eu}$

$^{207}\text{Bi}$   
( $T_{1/2} = 31.6 \text{ a}$ )

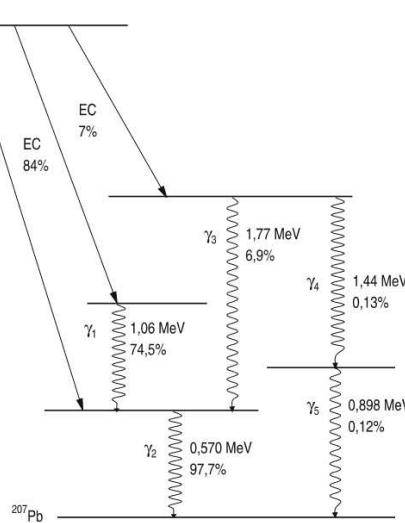


Abbildung A.24: Bismut  $^{207}\text{Bi}$

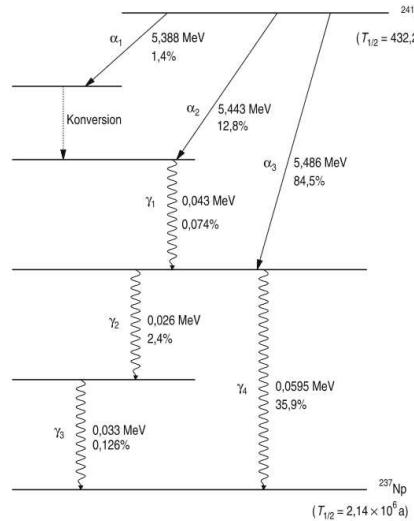


Abbildung A.25: Americium  $^{241}\text{Am}$

## A.4 Auflösung verschiedener Szintillationsdetektoren

Es gibt zahlreiche organische wie anorganische Kristalle, welche als Szintillatoren eingesetzt werden können. Von der Art des Kristalls hängt die Auflösung des Spektrums sehr wesentlich ab. In der Abbildung A.26 sieht man in vier Diagrammen die Auflösung der unterschiedlichen Kristalle in verschiedenen Farben: NaI(Tl), GYGAG(Ce), LaBr<sub>3</sub>(Ce) und SrI<sub>2</sub>(Eu) - um nur einige Beispiele aufzuführen. Für die Auflösung gilt, je schmäler der Peak, desto besser die Auflösung.

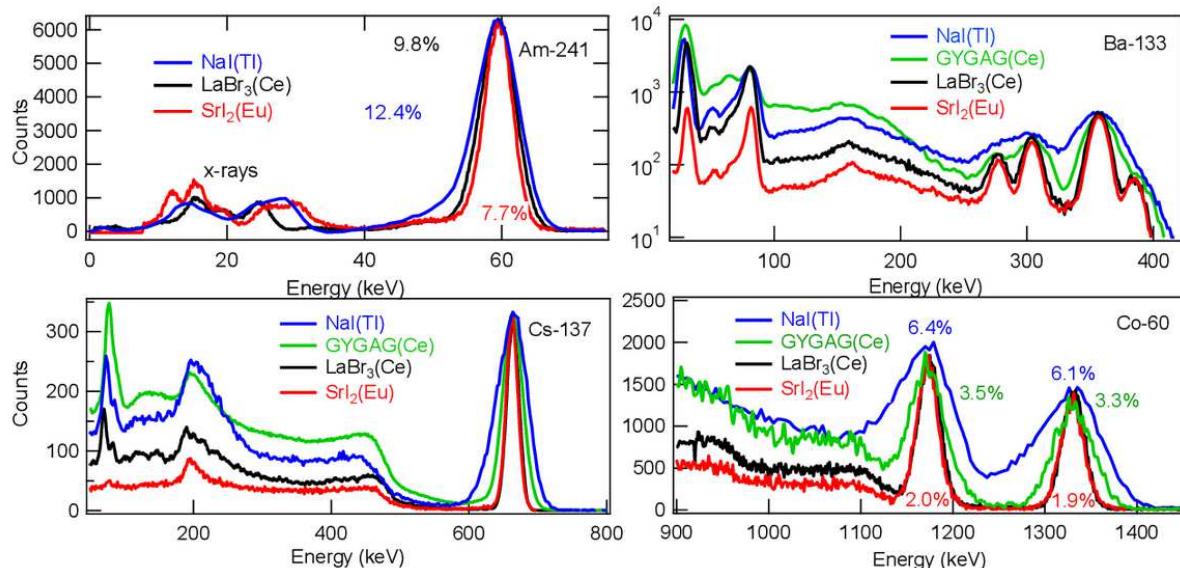


Abbildung A.26: Es wurden die vier Radionuklide Am-241, Ba-133, Cs-137 und Co-60 mit unterschiedlichen Szintillationsdetektoren untersucht: Blau ist ein NaI(Tl)-Detektor, wie er hier in diesem Experiment auch verwendet wird, schwarz ein LaBr<sub>3</sub>(Ce)-Detektor und rot ein SrI<sub>2</sub>(Eu)-Detektor. Je schmäler der Photopeak im Vergleich zur Peakhöhe ist, desto besser ist die Auflösung des Detektors. Abbildung von N. Cherepy et al.