

# Szintillations- $\gamma$ -Spektroskopie

Dr. Jonny Birkhan, jbirkhan@ikp.tu-darmstadt.de

---

## 1 Lernziele

Im Versuch K6 lernen Sie, wie Sie mit Hilfe eines Szintillationsdetektors  $\gamma$ -Strahlung energieaufgelöst messen und analysieren. Damit handelt es sich um ein sogenanntes  $\gamma$ -spektroskopisches Verfahren, kurz  $\gamma$ -Spektroskopie. Sie bildet den Ausgangspunkt für viele Anwendungsbereiche, wie zum Beispiel in der Kernphysik bei Kernfluoreszenzmessungen bis hin zu astrophysikalischen Problemstellungen, wie der Analyse von  $\gamma$ -Pulsaren.

Im Versuch geht es zum einen darum, Sie mit den wichtigsten technischen Aspekten der  $\gamma$ -Spektroskopie vertraut zu machen und zum anderen, wie anhand eines Energiespektrums Radionuklide identifiziert werden können.

---

## 2 Vorausgesetzte Kenntnisse

Sie sollen mindestens auf folgende Fragen antworten können, bzw. sich mit folgenden Aspekten beschäftigen haben:

---

### 2.1 Allgemeiner Teil

1. Wie lauten die Strahlenschutzgrundsätze?
2. Was bedeuten die Begriffe: Messgröße, Messergebnis, Messunsicherheit?
3. Was bedeuten die Begriffe: Zerfallswahrscheinlichkeit, Zerfallsrate, Aktivität?
4. Wie lautet das Gesetz für den radioaktiven Zerfall, was bedeutet es?
5. Welche Zerfallsarten von radioaktiven Kernen gibt es?

---

### 2.2 Spezieller Teil

6. Durch welche Prozesse wechselwirkt  $\gamma$ -Strahlung mit Materie?
7. Beschreiben Sie einen typischen Messaufbau in der  $\gamma$ -Spektroskopie.
8. Was ist die physikalische Grundidee, die bei einem Szintillationsdetektor ausgenutzt wird, um  $\gamma$ -Strahlung nachzuweisen? (Stichwort: „Frequenz-Schieber“)
9. Welche Arten von Szintillationsdetektoren gibt es?

10. Was bedeuten die Fachbegriffe Energieauflösung, Nachweiswahrscheinlichkeit, Tot-Zeit und Signalverstärkung in der  $\gamma$ -Spektroskopie?
11. In der Tabelle 1 sind typische Werte für die Energieauflösungen verschiedener Detektortypen gelistet. Finden Sie eine Erklärung für die Unterschiede zwischen Gas-, Szintillations- und Halbleiterdetektor.
12. Wie entsteht ein Impulshöhenspektrum? Beginnen Sie mit der Erklärung bei dem analogen Detektorsignal, das vom Vorverstärker verstärkt, anschließend geformt und dann über den Analog-Digital-Wandler an den Vielkanalanalysator weitergeleitet wird.
13. Erklären Sie das Entstehen der typischen Strukturen in einem  $\gamma$ -Spektrum auf der Basis von Röntgenfluoreszenz und der drei Wechselwirkungen Photo-, Compton- und Paarbildungseffekt, siehe Tabelle 2.
14. Wie wird eine Energiekalibrierung durchgeführt?
15. Die Tabelle 3 listet die Kriterien, nach denen Radionuklide über ihre Linien im Spektrum identifiziert werden können. Erklären Sie, warum diese Kriterien sinnvoll sind.
16. Recherchieren Sie das Zerfallsschema von  $^{207}\text{Bi}$ , so dass Sie es wiedergeben können.

**Tabelle 1:** Vergleich der Energieauflösungen verschiedener Detektoren

Detektor	Aktives Material	Auflösung in keV
Ionenkammer	Gas	$\approx 200$
NaI(Tl)	Szintillationskristall	$\approx 100$
CsI(Tl)	Szintillationskristall	$\approx 70$
LaBr <sub>3</sub>	Szintillationskristall	$\approx 25$
CdZnTe	Halbleiter	$\approx 6$
HPGe	Halbleiter	$\approx 2$

**Tabelle 2:** Typische Strukturen in einem  $\gamma$ -Spektrum

Struktur
2 Röntgenfluoreszenz-Linien zwischen 70 keV und 90 keV
Rückstreustruktur im Bereich von 300 keV
Compton-Kontinuum und -Kante
Gesamtabsorptionslinie
Summenlinie
Einfach- und Zweifach-Verlustlinien (Paarvernichtungslinien)

**Tabelle 3:** Kriterien zur Identifikation von Radionukliden

Kriterien
Zentroid-Energie $E_0$ der Gesamtabsorptionslinie
Emissionswahrscheinlichkeit $p$ der $\gamma$ -Quanten
Halbwertszeit $T_{1/2}$ des betreffenden Radionuklids
Betrachtung weiterer Linien der in Frage kommenden Radionuklide
Herkunft der Probe

---

### 3 Literatur für die Vorbereitung

---

Die nachfolgenden Literaturempfehlungen der Tabelle 4 behandeln die vorausgesetzten Kenntnisse und sind nach den Fragen des Abschnitts 2.2 gruppiert.

**Tabelle 4:** Literatur zur Vorbereitung

Fragen	Literaturauswahl
1.	Merkblatt K0: Merkblatt K0, frei im Netz erhältlich, Abfrage 4.4.2023.
2.	<b>T. Blochowicz, F. Laeri:</b> <i>Einführung in die Messdatenanalyse für das Physikalische Grundpraktikum</i> , TU Darmstadt, 2011. Datenanalyse-Skript GP, frei im Netz erhältlich, Abfrage 4.4.2023. <b>BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML:</b> <i>Evaluation of measurement data   Guide to the expression of uncertainty in measurement</i> . Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 100:2008, GUM, frei im Netz erhältlich, Abfrage 20.11.2022.
1., 3. - 5.	<b>H. Krieger:</b> <i>Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes</i> , 6. Auflage, Springer Spektrum, 2019. (erhältlich als E-Book über die ULB)
6. - 15.	<b>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV):</b> <i>Messanleitungen für die „Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung“</i> , Messanleitungen BMUV, frei im Netz erhältlich, Abfrage 20.11.2022. <b>Tavernier, S.:</b> <i>Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics</i> , Springer Verlag, 2010. (erhältlich als E-Book über die ULB) <b>Cerrito, L.:</b> <i>Radiation and Detectors: Introduction to the Physics of Radiation and Detection Devices</i> , Springer-Verlag, 2017. (erhältlich als E-Book über die ULB)
16.	<b>Brookhaven National Laboratory</b> , NuDat 3.0, Datenbank Kerndaten, Abfrage 20.11.2022.

---

### 4 Grundlagen

---

Die Energieverteilung von Strahlungsquanten zu bestimmen, die auf ein materielles Objekt einwirken oder einwirken können, ist in vielen Wissenschaftsbereichen ein Kernstück der wissenschaftlichen Arbeit. Die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit der Strahlungsquanten mit Materie hängt von ihrer Energie ab. Daher deponieren Strahlungsquanten verschiedener Energien bei gleicher Intensität unterschiedlich viel Energie im Material. Das ist z.B. für die Berechnung der Dosis im Strahlenschutz wichtig.

Bei Kernstrukturanalysen gibt die Energieverteilung der gemessenen Strahlungsquanten Auskunft über die im Kern angeregten Zustände und erlaubt z. B. Lebensdauermessungen einzelner Zustände.

Um ionisierende Strahlung energieaufgelöst, das heißt spektroskopisch messen zu können, ist es erforderlich, geeignete Detektorsysteme zu verwenden und bestimmungsgemäß einzustellen. Ein Detektorsystem besteht aus einer Sonde (Detektor) und anhängiger elektronischer Signalverarbeitungseinheit. Alle Bestandteile des Systems bilden, angefangen beim Detektor bis zur Anzeigeeinheit der gemessenen Daten, die sogenannte Messkette. Jeder Teil der Kette trägt auf seine eigene Weise zum Messsignal bei und reagiert mehr oder weniger auf Umgebungseinflüsse. Manchmal können letztere so groß sein, dass das eigentliche Detektorsignal

---

unbrauchbar wird. Um das Detektorsystem optimal betreiben zu können, ist es daher nötig, die Eigenschaften aller Komponenten der Messkette zu kennen und richtig aufeinander abzustimmen. In diesem Sinne spielen in der  $\gamma$ -Spektroskopie z. B. die sogenannte Tot-Zeit, die Energieauflösung, die Nachweiswahrscheinlichkeit, die Einstellung der Pulslänge oder der Pulsformzeit, die Signalverstärkung, der Effekt der Aufstockung und zufällige Koinzidenzen eine wichtige Rolle, um nur einige Aspekte zu nennen.

Szintillationsdetektoren sind die eher kostengünstigeren und einfacher zu handhabenden Detektoren, mit denen  $\gamma$ -Strahlung energieaufgelöst gemessen werden kann. Daher werden sie in vielen Wissenschaftsbereichen genutzt. Nachteilig ist die gegenüber Halbleiterdetektoren geringere Energie-Auflösung der Szintillationsdetektoren, was ihren Einsatzbereich wiederum einschränkt. Die Auflösung eines guten NaI(Tl)-Szintillationsdetektors liegt bei einer Strahlungsenergie von 662 keV ( $^{137}\text{Cs}$ ) im Bereich von 50 keV. Von Vorteil ist, dass die Detektorkristalle leicht in großen Dimensionen hergestellt werden können, so dass mit den Szintillationsdetektoren größere Nachweiswahrscheinlichkeiten erreichbar sind. Außerdem brauchen sie nicht gekühlt zu werden, wie das z. B. bei Germanium-Detektoren nötig ist.

$\gamma$ -Strahlung ist elektromagnetische Strahlung sehr kleiner Wellenlänge mit einer Energie im Bereich von Kilo (keV)- bis Mega (MeV)-Elektronenvolt. Sie wird im Wesentlichen von Atomkernen emittiert, z. B. nach einem  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfall.

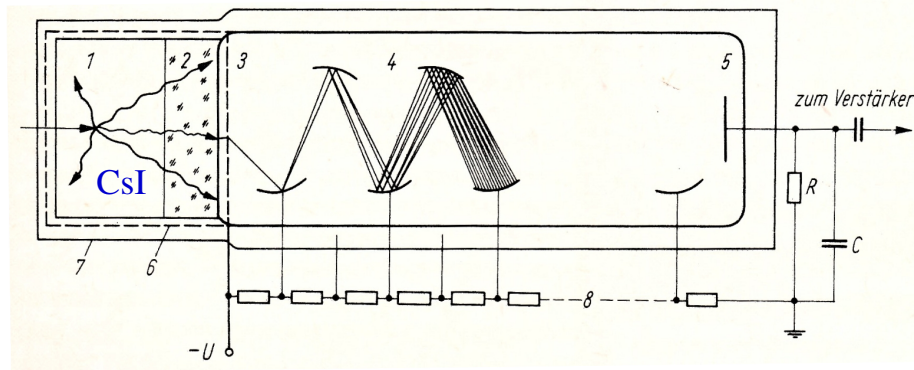
Mit dem Szintillatorkristall wechselwirkt  $\gamma$ -Strahlung durch den Photo-, Compton- und Paarbildungs-Effekt. Die aus den Wechselwirkungen hervorgehenden Primärteilchen (Elektronen und bei hinreichender Energie der  $\gamma$ -Strahlung auch Positronen) erzeugen Sekundärelektronen, durch welche die Atome oder Moleküle des Szintillatorkristalls ionisiert oder angeregt werden. Dabei handelt es sich um einen mehrstufigen Prozess, bei dem mehrere Generationen von Sekundärteilchen Energie untereinander übertragen, bis die Energien der letzten Generation in der Größenordnung der Anregung von Fluoreszenzzentren im Szintillatorkristall liegen, die infolgedessen angeregt werden. Die Fluoreszenzzentren entstehen bei anorganischen Szintillatorkristallen durch den Einbau von Aktivatoren in eine bestimmte Grundsubstanz. Ein Beispiel ist der NaI(Tl)-Szintillator, bei dem das Basismaterial NaI mit Tl dotiert wird.

Ein Teil der Fluoreszenzzentren sendet anschließend nach sehr kurzer Zeit Licht aus. Dabei wird die absorbierte Energie in Licht umgewandelt, das vom Photo-Vervielfacher (PMT = *Photo-Multiplier-Tube*) in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Dieses analoge Signal kann dann von einem Analog-Digital-Wandler (ADC = *Analog-to-Digital-Converter*) digitalisiert werden, nachdem es verstärkt und geformt worden ist.

Innerhalb der PMT trifft das Fluoreszenzlicht auf die Photokathode (Abb. 1, (3)) und setzt dort Elektronen frei. Diese werden im Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) durch ein System von Dynoden (Abb. 1, (4)) elektrostatisch beschleunigt und vervielfältigt: Beim Aufprall auf die erste Dynode erzeugt jedes Elektron mehrere Sekundärelektronen, die ihrerseits auf die zweite Dynode beschleunigt werden und dort wiederum Sekundärelektronen erzeugen. Dieser Vorgang wiederholt sich lawinenartig.

Die gesamte an der Anode (Abb. 1, (5)) des SEV ankommende Ladung ist proportional zur Zahl der erzeugten Photoelektronen, die wiederum proportional zur Zahl der auf die Photokathode auftreffenden Lichtquanten ist, welche ein  $\gamma$ -Quant verursacht hat. Diese Ladung fließt über den Widerstand  $R$  ab. Dabei entsteht an  $R$  ein kurzer Einbruch der dauerhaft angelegten Hochspannung, der als Spannungsimpuls  $U$  extrahiert wird und dessen Höhe proportional zur Ladung und damit zu der im Kristall deponierten Energie  $E$  ist. Im Vorverstärker (VV) wird der Impuls auf eine geeignete Höhe verstärkt. Im Versuch kann die Verstärkung durch den Empfindlichkeitsregler des Audio-Input-Eingangs (Mikrofoneingang) des Rechners geändert werden.

Radionuklide emittieren  $\gamma$ -Strahlung mit diskreten Energien, die im Spektrum als scharfe Linien auftreten sollten. Dopplereffekt und Energie-Zeit-Unschärfe verbreitern die diskreten Linien zu Lorentz-Kurven. Diese natürliche Linienverbreiterung kann von einem  $\gamma$ -Detektor aber nicht aufgelöst werden. Dennoch sind im



**Abbildung 1:** Schematischer Aufbau eines Szintillationsdetektors mit Szintillationskristall (1), Lichtleiter (2), Photokathode (3), Dynoden (4), Anode (5), Reflektor (6), lichtdichtes Gehäuse (7) und Spannungsteiler (8), nach [Sto90].

Spektrum aufgrund von elektronischen Rauschen gaussförmige Linien zu sehen. Demzufolge findet eine weitere Linienverbreiterung während des Messvorgangs statt.

Die gaussförmigen Linien sind demnach charakteristisch für ein  $\gamma$ -Emissions-Spektrum. Daneben gibt es weitere Ereignisse, die zu charakteristischen Erscheinungen in einem Spektrum führen:

- Wenn  $\gamma$ -Quanten an Bestandteilen des Messsystems, wie zum Beispiel der Kristallhalterung oder der Abschirmung gestreut werden, verlieren sie ihre Energie und gelangen möglicherweise nicht mehr in den Detektor. Diejenigen von ihnen, die registriert werden, erzeugen die *Rückstreustruktur*.
- Wenn  $\gamma$ -Quanten jeweils nur einmal mit dem Kristall über den Comptoneffekt wechselwirken und wieder heraus gestreut werden, entsteht das so genannte *Compton-Kontinuum*, das bei Null beginnt und mit der *Compton-Kante* endet. Dabei ist die Compton-Kante die Folge davon, dass  $\gamma$ -Quanten an Elektronen zurückgestreut werden. Sie übertragen dann die maximal mögliche Energie auf die Elektronen.
- In der *Gesamtabsorptionslinie* befinden sich alle gezählten Quanten, die ihre Energie  $E_\gamma$  vollständig an den Detektor abgegeben haben. Aber selbst wenn ein  $\gamma$ -Quant seine gesamte Energie über viele Wechselwirkungen an den Kristall abgegeben hat, ist es immer noch möglich, dass Energie verloren geht, weil Strahlung aus Folgeprozessen den Kristall verlassen kann (Röntgen-, Vernichtungs- und Bremsstrahlung).
- Sollte die Bedingung  $E_\gamma > 2m_0 \cdot c^2$  erfüllt sein, treten im Bereich des Compton-Kontinuums einer Linie zwei weitere Linien auf, deren Energien um 511 keV (*Einfach-Verlustlinie*) und 1022 keV (*Zweifach-Verlustlinie*) kleiner sind als die der Gesamtabsorptionslinie. Sie sind die Folge von Paarbildungen mit anschließender Vernichtung der Positronen.
- Auf die gleiche Art können zusätzliche Linien entstehen, wenn zum Beispiel ein Röntgenquant aus einem Atom entkommt, das durch eine primäre Wechselwirkung angeregt worden ist.
- Die  $\gamma$ -Strahlung aus der zu messenden Probe kann das Blei der Abschirmung über den Photoeffekt anregen, so dass es Röntgenfluoreszenzstrahlung emittiert. Dadurch entstehen *Röntgenfluoreszenzlinien* bei 75,0 und 84,9 keV.
- In der Bleiabschirmung kann es zur Paarbildung kommen, wenn  $\gamma$ -Strahlung aus der Probe in die Abschirmung eindringt. Die beiden 511 keV-Quanten, die aus der Vernichtung des Positrons entstehen, entfernen sich in entgegengesetzter Richtung voneinander. Die Wahrscheinlichkeit ist groß, dass eines

---

der beiden in die Messkammer gelangt und vom Detektor bei einer Energie von 511 keV erfasst wird (*Annihilationslinie*<sup>1</sup>).

- Da die zeitliche Auflösung eines Detektors wesentlich größer sein kann als die Lebensdauer von zwei aufeinanderfolgenden Kernzuständen, können koinzidente Messungen (gleichzeitige Registrierung) von zwei verschiedenen Energien auftreten. Diese zählt der Detektor in einer Linie, die zur Summe der Energien der beiden Quanten gehört. Auf diese Weise entsteht die so genannte *Summenlinie*.

Um eine Zuordnung zwischen den Kanälen eines primären Spektrums und den assoziierten Energien durchführen zu können, muss eine sogenannte *Energiekalibrierung* mit bekannten Radionukliden durchgeführt werden. Die Energien der emittierten Photonen dieser Radionuklide sind dann hinreichend genau bekannt. Den Linienschwerpunkten im Spektrum, ausgedrückt in Kanälen, können diese Energien anschließend zugeordnet werden.

---

## 5 Methoden und Material

---

Im Versuch kommt ein Szintillationsdetektor zum Einsatz, dessen Material aus einem anorganischen Szintillator besteht. Dabei handelt es sich um einen CsI-Kristall, der mit Thallium (Tl) aktiviert ist: daher die Abkürzung CsI(Tl). Erst durch den Einbau des Tl, das als sogenannter Aktivator wirkt, erhält der Kristall seine Fluoreszenzfähigkeit. Der Szintillationskristall ist zylinderförmig mit den Abmessungen 5,08 cm in der Höhe und 5,08 cm im Durchmesser.

Der Detektor ist mit einem elektronischen Modul verbunden, das ihn einerseits mit Hochspannung versorgt und andererseits die Signalverarbeitung durchführt.

Zur Datenaufnahme und -verarbeitung werden zwei vorinstallierte Programme auf einem *Acer Veriton M464* PC mit einem Intel(R) Pentium(R) Dual CPU E2190@ 2,00 GHz Prozessor mit 2816 MiB (Mebibyte) Systemspeicher und einem Linux-Betriebssystem der Variante Ubuntu 5.4.0-58 verwendet. Diese Programme sind zum einen **PRA** [Do21], welches zur Spektrenaufnahme verwendet wird, und zum anderen **fityk** [fityk], welches der Darstellung und Analyse der aufgenommenen Spektren dient (Näheres siehe Anleitung zu diesem Praktikumsversuch).

Das vorverstärkte und geformte Signal wird an den PC über einen emulierten Mikrofoneingang weitergeleitet. Die Audiokarte des PCs digitalisiert das Signal. Die Software **PRA** liest den entsprechenden ADC aus und erstellt die gewünschten Histogramme. Das Detektor-System ist in Abbildung 2 zu sehen.

Ein typisches Kalibrierspektrum mit diesem Detektortyp ist in Abbildung 3 gezeigt. Dort wurde eine der <sup>207</sup>Bi-Quellen vermessen. Deutlich zu sehen sind die drei Linien des <sup>207</sup>Bi bei 569,7 keV, 1063,66 keV und 1770,23 keV. Unmittelbar links von diesen Linien sind die zugehörigen Compton-Kanten erkennbar. Ganz links ist eine der Linien der Röntgenfluoreszenz des Bleis aus der Bleiburg sichtbar. Zwischen dieser und der Compton-Kante der 569,7 keV-Linie liegt eine breite Struktur, die aus der Rückstreuung von  $\gamma$ -Quanten aus der Bleiburg stammt.

Im Versuch stehen weitere Präparate für die Messungen zur Verfügung.

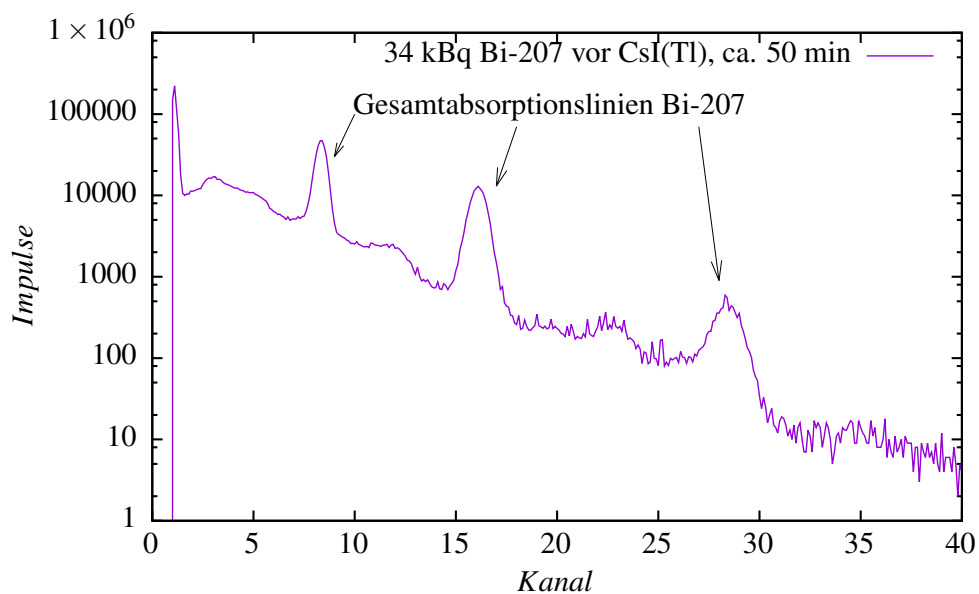
---

<sup>1</sup>Annihilationslinie = *Annihilation Peak*





**Abbildung 2:** CsI(Tl)-Detektor mit PMT in weißem Gehäuse und Elektronikeinheit für die Signalverarbeitung und -weiterleitung [Se21].



**Abbildung 3:** Halb-Logarithmische Auftragung eines Spektrums einer der  $^{207}\text{Bi}$ -Quellen, aufgenommen mit einem CsI(Tl)-Detektor. Die Verstärkung wurde hierbei auf ein Minimum eingestellt.

---

## Literatur

---

[Sto90] **Stolz, W.**, *Radioaktivität: Grundlagen-Messung-Anwendung*, 4. Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart, 2003.

[fityk] **Wojdyr, M.**, <http://fityk.nieto.pl/>, Abfrage 20.11.2022.

- 
- [Do21] **Dolleiser, M.**,  
<https://www.gammaspectacular.com/marek/pr/index.html>,  
Abfrage 20.11.2022.
- [Se21] **Sesselmann, S.**,  
<https://www.gammaspectacular.com/blue/gamma-spectroscopy/gamma-spectrometry-systems/GSB-2020-CSI>,  
Abfrage 20.11.2022.