



Leibniz  
Universität  
Hannover



Leibniz Universität Hannover

Fakultät für Mathematik und Physik

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

---

## Bachelorarbeit

# Ortsaufgelöste Alpha-Spektrometrie an Pechblende-haltigen Erzen

---

**Vorgelegt von:** Aaron Lehnert

**Matrikelnummer:** 10016000

10. Dezember 2021

**Erstprüfer:** Prof. Dr. Clemens Walther

**Betreuerin:** MSc. Annika Klose



## **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe. Ich versichere, dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommenen Aussagen als solche gekennzeichnet habe und dass die eingereichte Arbeit weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen ist.

Hannover, den 10. Dezember 2021.

Aaron Lehnert



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Pechblende</b>	<b>2</b>
2.1	Zerfallsreihen und Gleichgewichte . . . . .	2
2.2	alpha-Zerfall . . . . .	3
2.3	Natürliches Vorkommen . . . . .	4
2.4	Pechblende-Proben . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Messmethoden</b>	<b>6</b>
3.1	alpha-Track Analyse . . . . .	6
3.1.1	Funktionsweise . . . . .	6
3.1.2	Belichtungsdauer . . . . .	6
3.1.3	Analyse . . . . .	9
3.1.4	Detektoreffizienz . . . . .	11
3.2	Gitterionisationskammer . . . . .	12
3.2.1	Aufbau . . . . .	12
3.2.2	Funktionsweise . . . . .	13
3.2.2.1	Frisch-Gitter . . . . .	14
3.2.3	Signalverarbeitung . . . . .	15
3.2.4	Eigenschaften . . . . .	16
3.2.4.1	Betriebsspannung . . . . .	16
3.2.4.2	Energiekalibrierung . . . . .	17
3.2.4.3	Untergrundmessungen . . . . .	18
3.2.4.4	Effizienzabschätzung . . . . .	19
3.2.4.5	Beispielproben . . . . .	21
3.2.4.6	Aufgetretene Probleme . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>45</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>103</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>105</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>107</b>



## 1 Einleitung

Seit der Nutzung der Kernenergie für kommerzielle und militärische Zwecke besteht die Gefahr von Reaktorunfällen, wie in Tschernobyl oder Fukushima, Transportunfällen und terroristischen Anschlägen mit Kernwaffen. Bei diesen Ereignissen können große Mengen an Radioisotopen freigesetzt und weite Gebiete kontaminiert werden. Auf großen Flächen lassen sich gamma-Kontaminationen, aufgrund einiger freigesetzter Nuklide, leicht erfassen. Für alpha-emittierende Nuklide gibt es aber bislang kein Detektorsystem, das in der Lage ist, großflächige Kontaminationen aus der Ferne entdecken zu können. Das aktuelle Verfahren beschränkt sich auf das Abrastern kontaminierter Flächen von Hand, da alpha-Strahlung sehr kurzreichweitig ist. Das ist ungenau, langsam und gefährdet das Personal. Auch beim Rückbau kerntechnischer Anlagen ist es für die Nukleare Sicherheit unerlässlich potenzielle Kontaminationen alpha-spezifisch lokalisieren zu können[1].

Im Rahmen des RemoteAlpha Projekts werden daher optische Systeme entwickelt, die auf dem Prinzip der Radiolumineszenz beruhen. Die Radiolumineszenz der Luft ist ein sekundärer Prozess. Das alpha-Teilchen trifft auf Stickstoff in der Umgebungsluft und regt die Außenelektronen der Stickstoffmoleküle in höhere Energiezustände an. Beim Relaxieren werden Photonen im UV-Spektrum emittiert, die charakteristisch für Stickstoff sind. Es entstehen dabei  $19 \pm 3$  Photonen pro MeV Zerfallsenergie des alpha-Teilchens. Die emittierten Photonen sollen dann aus der Ferne detektiert werden. Zusätzlich werden verschiedene mobile Systeme entwickelt, die an einer Drohne befestigt werden können und in der Lage sind, große Flächen auszumessen und alpha-Strahlungsniveaus in Echtzeit abzubilden[2][3].

Diese Arbeit ist Teil des Projektes, das sich mit der Probenherstellung für die Kalibrierung des optischen Fernmesssystems beschäftigt. Dazu werden 30 verschiedene Pechblende-haltige Erze ortsaufgelöst mit der alpha-Track Analyse und alpha-spektrometrisch mit einer Gitterionisationskammer untersucht. Bei den Pechblende-haltigen Erzen handelt es sich um Uran-haltige Umweltproben, mit denen das System auf Funktionalität geprüft werden soll. Außerdem werden Pechblende-haltige Erze verwendet, da Pechblende die höchste Umweltaktivität hat und daher für das Projekt von besonders großem Interesse ist, da das Detektorsystem vor allem in der Umwelt eingesetzt werden soll. In dieser Arbeit soll ausschließlich die alpha-Aktivität der Oberflächen der Umweltproben bestimmt werden, da nur alpha-Strahlung den Stickstoff UV-Strahlung emittieren lässt. Mit den beiden Messmethoden wird auch nur die alpha-Strahlung und insbesondere keine gamma-Strahlung detektiert.

Ziel dieser Arbeit ist es, ortsaufgelöst eine Flächenzählrate für die Pechblende-Proben mit beiden Messmethoden zu bestimmen. Danach werden die Proben bei der Betrachtung der Ergebnisse in drei verschiedene Güteklassen eingeteilt, die angeben sollen, wie gut sich die Erze für eine Verwendung im Forschungsprojekt eignen. Mit den ermittelten Flächenzählraten sollen Vorhersagen getroffen werden, wie viel UV-Strahlung durch die Pechblende-Proben emittiert wird.

## 2 Pechblende

Die chemischen Zusammensetzungen von Pechblende sind Verbindungen von  $\text{UO}_2$  bis  $\text{U}_3\text{O}_8$ , die in natürlicher Form vorkommen. Die Begriffe Pechblende und Uraninit werden häufig synonym verwendet, wobei eigentlich  $\text{UO}_2$  für Uraninit steht und Pechblende die Vielfalt an weiteren chemischen Verbindungen als Oberbegriff zusammen fasst[4][5].

Der Begriff der Pechblende wurde im Mittelalter geprägt. Der Name bezieht sich dabei auf die pechschwarze Farbe und seine hohe Dichte, die Metall suggeriert, aber das damals noch unbekanntes Uran enthält[6].

In Abbildung 1 ist eine in dieser Arbeit verwendete Pechblende-Probe gezeigt. Zu sehen ist das schwarze Uraninit, aber auch mehrere farbintensive, korrodierte Stellen, das vom gelb-orangen bis hin zum grünen reicht. Die Farbe kommt von anderen Uranverbindungen, weshalb das gesamte Stück als Pechblende bezeichnet wird.



Abb. 1: Foto einer Pechblende-Probe

### 2.1 Zerfallsreihen und Gleichgewichte

Radionuklide, die nach ihrem Zerfall weitere Zerfälle eingehen, werden in einer Zerfallsreihe zusammengefasst. Uran gehört zu den Actiniden und hat die Ordnungszahl 92. Die drei Hauptisotope liegen im natürlichen Isotopenverhältnis, 99.27%  $^{238}\text{U}$ , 0.72%  $^{235}\text{U}$  und 0.0055%  $^{234}\text{U}$ , vor[7]. Für Pechblende sind daher die Uran-Radium-Reihe ( $^{238}\text{U}$ -Zerfallsreihe) und die Uran-Actinium-Reihe ( $^{235}\text{U}$ -Zerfallsreihe) essentiell. Die Zerfallsreihen geben die Töchternuklide von den beiden Uranisotopen an, die in der spektrometrischen Analyse nachgewiesen werden. Bei manchen Pechblende-Proben ist auch Thorium vertreten, weshalb auch die Thorium-Reihe ( $^{232}\text{Th}$ -Zerfallsreihe) mit betrachtet wird.

Da sich diese Arbeit ausschließlich mit der alpha-Spektrometrie von Pechblende beschäftigt, werden auch nur die Folgeprodukte der Zerfallsreihen betrachtet, die alpha-Emitter sind. In der Nuklidkarte sind diese mit einem gelben Kästchen markiert.

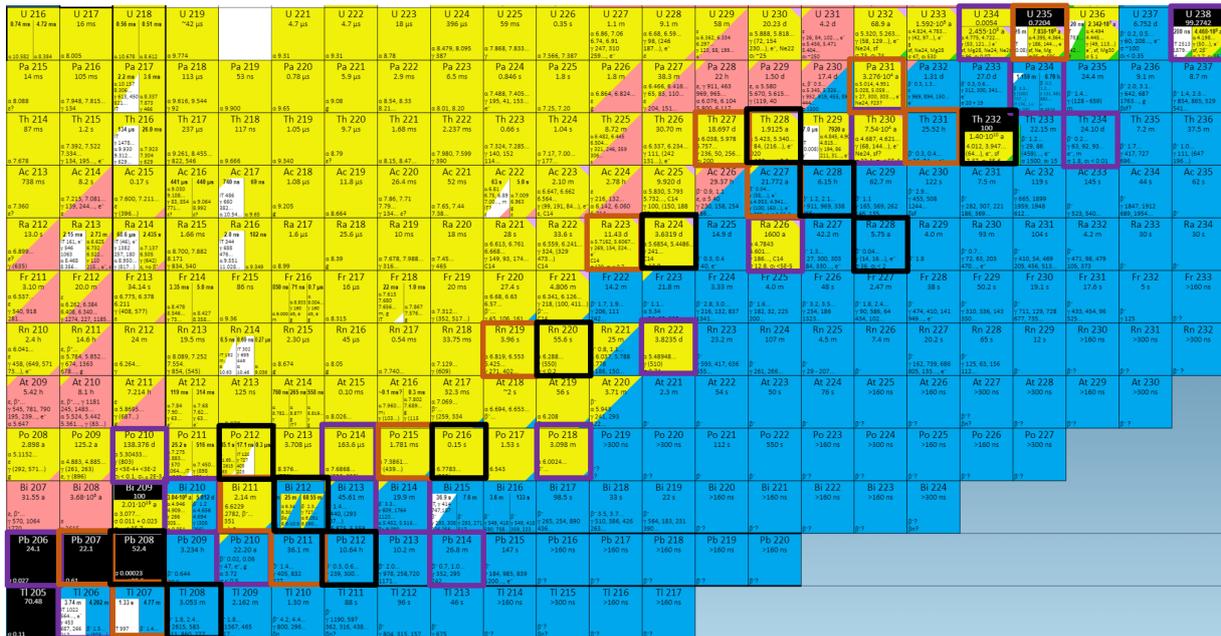


Abbildung 2: Ausschnitt Nuklidkarte Actinide (Nucleonica [8]) - Zerfallsprodukte der  $^{238}\text{U}$ -Zerfallsreihe sind violett, der  $^{235}\text{U}$ -Zerfallsreihe orange und der  $^{232}\text{Th}$ -Zerfallsreihe schwarz umrandet

$^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  sind primordial. Das heißt, dass ihre Halbwertszeiten mit  $7,04 \times 10^8$  a und  $4,47 \times 10^9$  a ähnlich groß sind, wie das Alter der Erde mit  $4,54 \times 10^9$  a.

Wenn zehn Halbwertszeiten eines Nuklids verstrichen sind, hat die Menge des Nuklids um den Faktor  $2^{10} = 1024$  abgenommen. Danach liegt nur noch ein Bruchteil des ursprünglichen Nuklids vor. Wenn in einer Zerfallsreihe zehn Halbwertszeiten der langlebigsten Tochter vergangen sind, dann sind die Töchternuclide in guter Näherung im Gleichgewicht. Für die  $^{238}\text{U}$ -Zerfallsreihe ist das beispielsweise das  $^{234}\text{U}$  mit  $2,45 \times 10^5$  a. Naturan liegt damit, nach seiner Bildung bei der Entstehung der Erde, im Zerfallgleichgewicht vor. Töchternuclide einer Zerfallsreihe, die im Gleichgewicht sind, haben dieselbe Aktivität.

## 2.2 alpha-Zerfall

Beim alpha-Zerfall emittiert der Mutterkern ein alpha-Teilchen. Ein alpha-Teilchen ist ein Heliumkern, der aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Aus der Differenz der Bindungsenergien von Mutter- und Tochternuclid ergibt sich die charakteristische Zerfallsenergie des alpha-Teilchens. Wegen der Impulserhaltung erhält das alpha-Teilchen nur 98% der Zerfallsenergie. Die restlichen 2% erfährt das Tochternuclid in Form von kinetischer Energie als Rückstoß.

Das emittierte alpha-Teilchen wechselwirkt durch Stöße mit seiner Umgebung. Bei jedem Stoß gibt es einen Teil seiner kinetischen Energie an die Außenelektronen umliegender Moleküle ab und wird dadurch langsamer. Die Anzahl der Stöße pro Weglänge nimmt mit weiterer Geschwindigkeitsabnahme

zu. Bei der Ionisation wird auf das Elektron genügend Energie übertragen, um es vom Molekül zu trennen. Zurück bleibt ein einfach positiv geladenes Molekül, das sogenannte Ion[9].

Da das alpha-Teilchen mit jedem Stoß langsamer wird, wird die Wahrscheinlichkeit mit einem weiteren Molekül zusammen zu stoßen immer größer. Je dichter ein Medium, desto wahrscheinlicher werden auch die Stöße. Die maximale Eindringtiefe in einem Medium ist erreicht, wenn das alpha-Teilchen seine gesamte kinetische Energie abgegeben hat.

Die Dichte von Pechblende variiert mit ihrem Verwitterungsgrad. Sie liegt im Mittel bei  $10,88 \text{ g/cm}^2$  und damit ähnlich groß wie die von Blei mit  $11,34 \text{ g/cm}^2$ . Die maximale Eindringtiefe eines  $5 \text{ MeV}$  alpha-Teilchens in Blei liegt bei  $15,8 \mu\text{m}$ [9].

Emittierte alpha-Teilchen aus tiefer liegenden Schichten eines Festkörpers sind somit nur schwer detektierbar. Sie streuen vor dem Austritt an dem Festkörper selbst. Das führt zu einer reduzierten Energie des alpha-Teilchens beim Austritt aus dem Festkörper und bei noch tiefer liegenden Schichten zur vollständigen Absorption innerhalb der Probe. Bei einer maximalen Reichweite von  $15,8 \mu\text{m}$  spielt für die Analyse nur die Probenoberfläche der Pechblende eine Rolle.

### 2.3 Natürliches Vorkommen

Fundorte für Pechblende gibt es weltweit. Die in dieser Arbeit verwendete Proben stammen unter anderem aus Kanada, Finnland, sowie aus Jachimov in der Tschechischen Republik und aus Deutschland aus dem Krunkelbachtal bei Menzenschwand im Schwarzwald. Da sich Pechblende in den jeweiligen lokalen Gesteinsschichten einlagert, liegen die Pechblende Erze nicht in reiner Form, sondern in verschiedensten mineralischen Verbindungen vor. Die meisten Pechblende-Proben sind pechschwarz, jedoch gibt es auch mehrere leuchtend gelbe, grüne und orangene Uranminerale im Trägergestein, wie anfangs anhand der Beispielprobe in Abbildung 1 gezeigt[10].

### 2.4 Pechblende-Proben

Die in dieser Arbeit untersuchten Proben haben je nach Herkunft eine unterschiedliche mineralische Zusammensetzung. Ausschlaggebend hierbei ist nur der Anteil an alpha-Emittern im Gestein. Pechblende besteht zum Großteil aus Uran, jedoch können auch Thoriumverbindungen mit auftreten. Ein Beispiel dafür sind die Wiikit-Proben, sogenannte Samarskit-Steine, die neben Uran auch Yttrium, Eisen und Thorium enthalten[11].

Die Proben haben eine Grundfläche von  $1$  bis  $17 \text{ cm}^2$ , mit Ausnahme einer größeren Probe mit  $29 \text{ cm}$  und eines Schaustücks, das eine Grundfläche von  $62 \text{ cm}^2$  hat. Manche Proben haben eine polierte, andere eine zerklüftete Oberfläche, sind Fragmente von größeren Stücken oder generell unterschiedlich.

Das macht eine einheitliche und vergleichbare Analyse schwer, da, aufgrund der Selbstabsorption, nur die obersten 15,8  $\mu\text{m}$  für die Untersuchung entscheidend sind.

## 3 Messmethoden

Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten, alpha-Strahlung qualitativ und quantitativ nachzuweisen. In dieser Arbeit werden hierfür zwei verschiedene Methoden zum Einsatz kommen. Zum Einen die orts aufgelöste alpha-Track Analyse und zum Anderen die alpha-Spektrometrie, durchgeführt mit einer Gitterionisationskammer (GIK).

### 3.1 alpha-Track Analyse

Mit der alpha-Track Analyse können Proben orts aufgelöst betrachtet werden. Das bedeutet, dass untersucht wird, wo sich Pechblende-Adern lokal auf der Erdoberfläche befinden.

#### 3.1.1 Funktionsweise

Für die alpha-Track Analyse werden sogenannte CR-39 alpha-Track Detektoren verwendet. Die Detektoren sind 5 x 5 cm groß, 1 mm stark und bestehen aus Polycarbonaten. Die Pechblende-Proben werden für die Analyse auf alpha-Track Detektoren gelegt. Die emittierten alpha-Teilchen treffen auf die Detektoroberfläche und erzeugen lokal durch die Zerstörung mikroskopisch kleine Defekte im Detektor. Nach einer bestimmten Belichtungszeit werden die Detektoren in einem Probenhalter (Abbildung 3) in ein Ätzbad gegeben (Abbildung 4). Das Ätzbad besteht aus einer 6 molaren Natronlauge (NaOH), worin die Detektoren 3 Stunden lang bei 80 °C entwickelt werden. Das Ätzen greift das beschädigte Material stärker an, wodurch die Defekte größer und besser sichtbar werden. Die fertig entwickelten Detektoren werden im Folgenden mit einem Lichtmikroskop ausgewertet [12][13][14].



Abb. 3: Probenhalter aus Teflon für die alpha-Track Detektoren

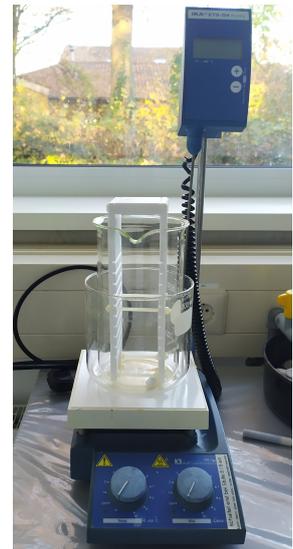


Abb. 4: Heizplatte für Ätzbildung der alpha-Track Detektoren

#### 3.1.2 Belichtungsdauer

Die Belichtungsdauer einer Probe ist abhängig von ihrer Flächenaktivität. Das Ziel der alpha-Track Analyse ist neben dem Mapping der alpha-Emitter die Bestimmung der Flächenzählrate. Dazu wird die Anzahl der Defekte pro Belichtungszeit auf dem Detektor gezählt. Das wird mit dem graphischen Auswerteprogramm ImageJ vorgenommen. ImageJ kann die Mikroskopbilder auswerten, indem es

zusammenhängende Bildpixel, die bei Defekten dunkel erscheinen, zählt. Die Voraussetzung dafür ist, dass sich die Defekte auf den Mikroskopbildern nicht überlappen, damit ImageJ zwischen einzelnen Defekten differenzieren kann. Wenn eine solche Überlappung auftritt, muss die Probe kürzer belichtet werden.

Das Programm kann besonders dann nicht mehr zwischen einzelnen Defekten differenzieren, wenn diese mit bloßem Auge sichtbar sind. Im Folgenden sind Beispiele für alpha-Track Detektoren aufgeführt, die zu lange belichtet wurden.

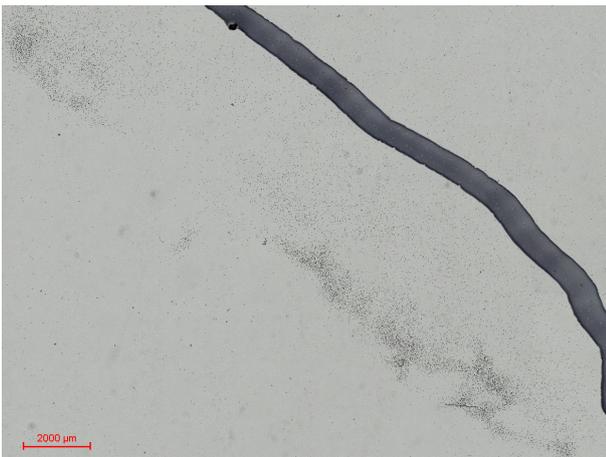


Abbildung 5: Bildausschnitt Lichtmikroskop  
Probe N

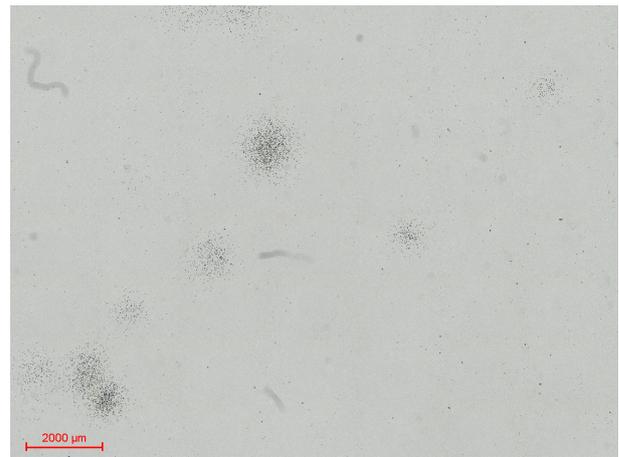


Abbildung 6: Bildausschnitt Lichtmikroskop  
Probe Y

Abbildung 5 zeigt mehrere große Erzadern, die sich am Probenrand befinden. Der dicke Strich auf dem Detektor markiert den Umriss der Probe auf dem Detektor. Damit wird das Aufnehmen der Bilder mit dem Lichtmikroskop reproduzierbar. Nur der Bereich des alpha-Track Detektors im Inneren der Markierung wird ausgewertet. In Abbildung 6 sind dagegen mehrere einzelne Hotspots zu erkennen.

Beide Abbildung zeigen eine stark inhomogene Verteilung der alpha-Emitter. Das wird später in der Diskussion über die erhobenen Ergebnisse und die Fehlerbetrachtung sowie Reproduzierbarkeit eine Rolle spielen.

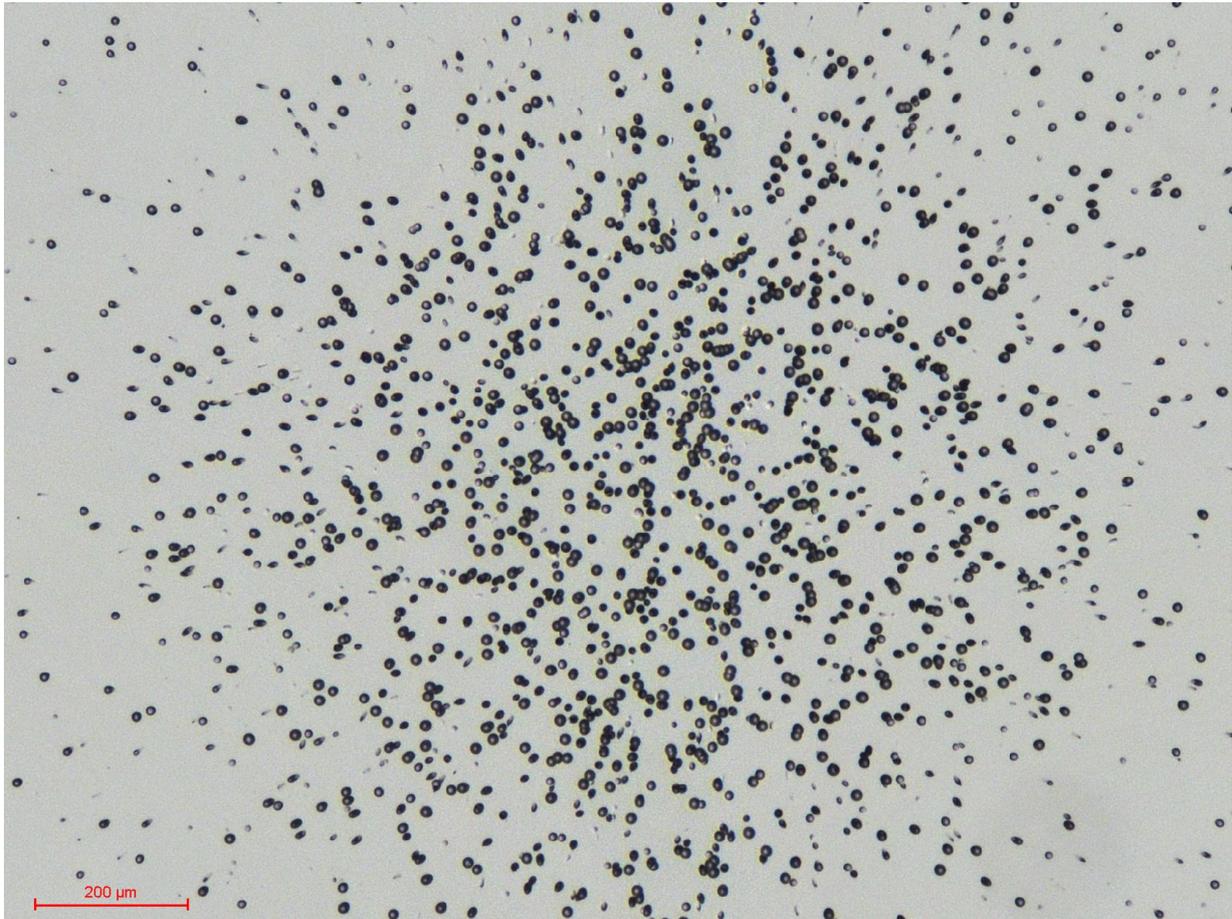


Abbildung 7: Bildausschnitt Lichtmikroskop Probe Y - Zoom auf Häufungspunkt

In Abbildung 7 ist auf einen Hotspot vom Bildausschnitt der Probe Y vergrößert worden. Hier sind deutlich Überlappungen der einzelnen Defekte erkennbar, sodass an dieser Stelle eine Auswertung mit ImageJ nicht aussagekräftig ist.

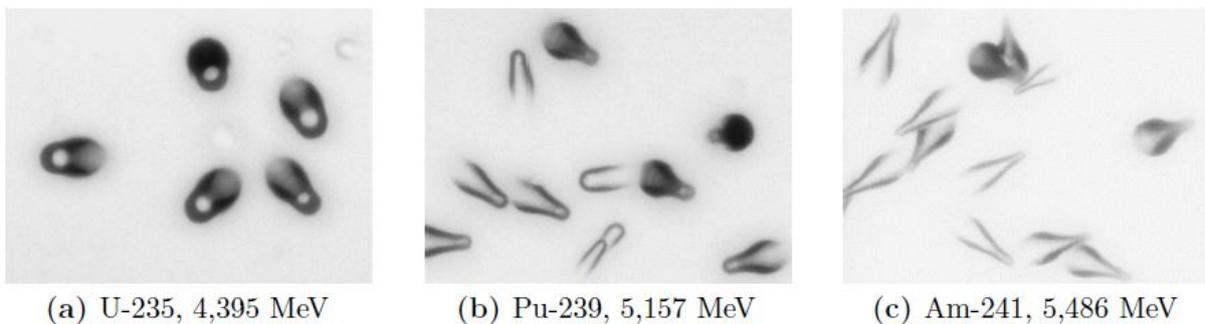


Abbildung 8: Vergleiche von Defekten unterschiedlicher Energien im alpha-Track Detektor (L. Hamann, 2017, S. 14 [15])

Abbildung 8 zeigt eine Möglichkeit den unterschiedlichen Defekten Energien zuzuordnen und somit

Spektrometrie mit alpha-Track Detektoren zu betreiben. Zudem sind in Abbildung 8 die kegelförmigen Spuren der Defekte sichtbar, die in Abbildung 7 zu erahnen sind.

Je mehr von dem Kegelquerschnitt auf den Bildern zu erkennen ist, desto steiler ist der Einschlagswinkel des alpha-Teilchens in den Detektor. Anhand der Form der Defekte kann auf den Ursprung der emittierten Quelle zurück geschlossen werden. Die radialen Spuren in Abbildung 7 deuten somit auf einen Hotspot hin[16].

### 3.1.3 Analyse

In diesem Kapitel wird anhand der Pechblende-Probe M die Auswertung der alpha-Track Detektoren mit ImageJ schrittweise beschrieben[17].

Von den geätzten Detektoren werden Bilder mit einem Lichtmikroskop aufgenommen. Das verwendete Lichtmikroskop nimmt dafür viele kleine Bilder hintereinander auf und fügt diese bei Bedarf zu einem Großen zusammen. Mit ImageJ kann für jedes einzelne Bild die Anzahl der Defekte bestimmt werden.

Abbildung 9 zeigt einen Ausschnitt eines Mikroskopbildes, anhand dessen die Auswertung mit ImageJ erläutert wird.



Abb. 9: Ausschnitt eines Bildes vom Lichtmikroskop

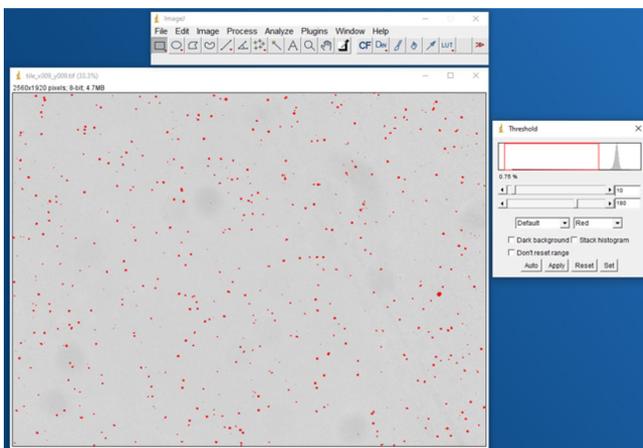


Abb. 10: Threshold-Einstellung in ImageJ

Für die Auswertung wird jeweils ein Bild in das Programm importiert und in Graustufen angepasst. Anhand eines Schwellenwertes (*Threshold*) wird bestimmt, bis zu welcher Graustufe Objekte auf dem Bild komplett schwarz oder komplett weiß dargestellt werden sollen. In Abbildung 10 sind in rot die Objekte hervorgehoben, die als einzige nach der Anpassung schwarz dargestellt werden. Die größeren grauen Flecken sind u.A. Staubkörner auf der Detektoroberfläche, die mit aufgenommen worden sind.

Der Threshold muss für jeden neuen Detektor angepasst werden, da der Weißabgleich vom Lichtmikroskop automatisch eingestellt und verändert wird. Außerdem können die Detektoren nach dem Ätzen in sich leicht verbogen sein. Da sie dann nicht plan auf dem Lichtmikroskop liegen und das Mikroskop ein großes Bild vom gesamten Detektor aufnimmt, sind beispielsweise die Bilder der linken Detektorenhälfte schärfer aufgenommen als die auf der Rechten.

Nach dem Erstellen des schwarz-weiß Profils werden die Pixel auf dem Bild gezählt. Hierfür gibt es in ImageJ zwei Parameter im *Analyze Particles*-Fenster. Zum Einen wird das Intervall (*Size*) festgelegt, ab und bis wie viele zusammenhängende Pixel gezählt werden sollen. Zum Anderen wird eingestellt wie rund (*Circularity*) die zusammenhängenden Pixel sein müssen, um gezählt zu werden. Diese Parameter sorgen dafür, dass nur die von den alpha-Teilchen verursachten Defekte gezählt werden und nicht kleinste Bildfehler, Staub oder Ähnliches.

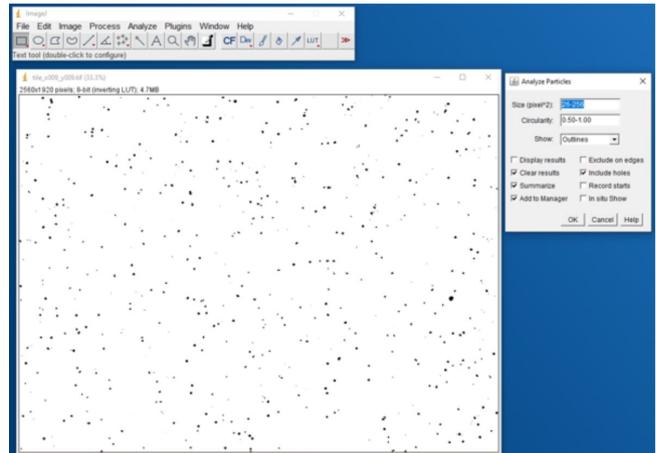


Abb. 11: Auszählung der Counts in ImageJ

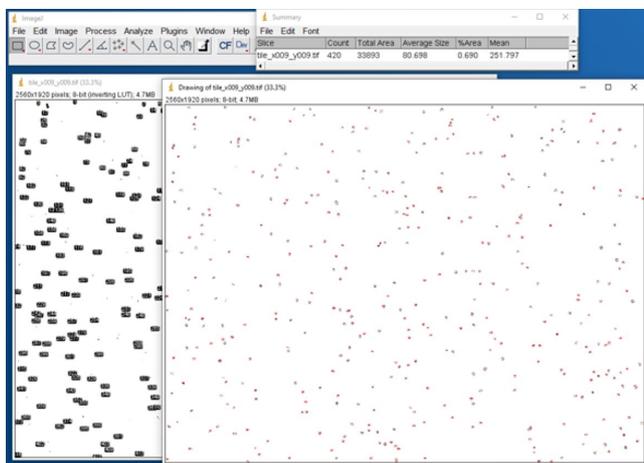


Abb. 12: Summe der detektierten Counts in ImageJ

Dadurch, dass der Threshold für jeden Detektor unterschiedlich eingestellt wird, müssen auch diese Parameter immer wieder neu angepasst werden. ImageJ zählt dann die Anzahl der Counts zusammen und gibt die Summe aus. Für das Beispielbild sind es 420 Counts. Da eine Aufnahme eines alpha-Track Detektors aus bis zu 1500 Bildern bestehen kann, wird diese Arbeit von einem Makro übernommen. Das Makro führt die oben beschriebenen Schritte für alle einzelnen Bilder einer Gesamtaufnahme aus und trägt die Summe aller Counts zusammen.

Daraus ergibt sich eine Zählrate für eine Probe in der Einheit Counts pro Belichtungszeit.

Anhand der Größe und Anzahl der ausgewerteten Bilder kann die Oberfläche der Probe abgeschätzt werden. Das Seitenverhältnis der einzelnen Bilder wird dabei vom Lichtmikroskop ausgegeben. Die resultierende Oberfläche der Probe wird mit einem relativen Fehler abgeschätzt, der die Hälfte der

Größe der am Rand liegenden Bilder hat. Die am Rand liegenden Bilder sind die, die mit dem Marker versehen den Probenrand repräsentieren.

Das Programm, das die Lichtmikroskopbilder verarbeitet, nimmt die Bilder der Detektoren mit einem Überlapp von 1% zueinander auf, um hinterher alle Bilder zu einem Gesamtbild zusammenfügen zu können. Dieser Überlapp wird dem relativen Fehler der Oberflächengröße hinzu gerechnet.

### 3.1.4 Detektoreffizienz

Zählrate und Oberfläche zusammen ergeben mit der Detektoreffizienz von 40% eine Flächenzählrate, die für die Proben abgeschätzt werden kann[18].

Das ist jedoch für die Abschätzung eine untere Schranke. Die tatsächliche alpha-Aktivität wird viel höher sein. Das liegt an der jeweiligen Oberflächenbeschaffenheit der Pechblende-Probe. Wenn die Probe nicht geschliffen ist, liegt sie nicht plan auf dem Detektor auf, sodass die emittierten alpha-Teilchen schon von der Luft zwischen Probe und Detektor absorbiert werden. In [Abbildung 7](#) sind neben deutlichen Defekten kleinste weitere Defekte zu erahnen. Dabei kann es sich um alpha-Teilchen handeln, die durch Selbstabsorption oder Absorption mit der Umgebungsluft Teile ihrer Energie verloren haben. Da die alpha-Track Analyse mit den in dieser Arbeit verwendeten Proben nur eine quantitative Aussage über die Zahl der alpha-Teilchen zulässt, bleibt an dieser Stelle eine qualitative Auswertung der Zerfallsenergien mit der alpha-Track Analyse, wie sie in [Abbildung 8](#) vorgenommen wurde, aus. Es bleibt nur die Korrelation, dass je größer der Defekt ist, desto größer ist die Energie, mit der das alpha-Teilchen im Detektor deponiert wurde[16][19].

Zudem lässt die durchgeführte alpha-Track Analyse nur Aussagen über eine Seite der Pechblende-Probe zu. Da es sich bei dem Detektor um ein Plättchen handelt und dieser nicht die vollständige Zählrate der Probenoberfläche auffangen kann, ist die Aussagekraft über die tatsächliche alpha-Aktivität der Pechblende-Probe eingeschränkt.

## 3.2 Gitterionisationskammer

Die Gitterionisationskammer (GIK) kann energieaufgelöste Spektren im Bereich von einigen MeV abbilden.

### 3.2.1 Aufbau

In Abbildung 13 ist eine Außenaufnahme der verwendeten GIK zu sehen. Die GIK besteht aus einem metallischen Zylinder, an dem sich an der Unterseite eine Klappe befindet, womit Proben auf einem Teller in die Kammer geschoben werden können. Die Oberseite des Zylinders besteht aus einer Messanode, die freie Elektronen in der Kammer detektiert. Auf dem Zylinder befinden sich ein Manometer für den Druck innerhalb, Ventile für die Evakuierung und Befüllung und ein Vorverstärker, der später näher erläutert wird.

Die GIK soll für alpha-spektrometrische Analysen verwendet werden. alpha-Teilchen sind kurzreichweitig und werden schon von dünnem Material vollständig absorbiert. Um alpha-Teilchen messen zu können, sollte möglichst wenig Distanz zwischen Probe und Detektor sein. Wenn die Probe direkt im Detektor platziert wird, dann wird die Effizienz des Detektors nicht durch eventuelle Eintrittsfenster verringert, wie z.B. bei einem Geiger-Müller-Zählrohr.



Abb. 13: Bild der GIK von außen

Die GIK hat in der Mitte des Zylinders in der Messkammer ein sogenanntes Frisch-Gitter. Die nähere Beschreibung des Frisch-Gitters ist im darauffolgenden Absatz 3.2.2.1 aufgeführt.

### 3.2.2 Funktionsweise



Abb. 14: Bild einer Probe auf dem Probenteller der GIK

Für die Analyse wird die zu untersuchende Probe auf den Probenteller der GIK gelegt (siehe Abbildung 14). Danach wird die Kammer evakuiert und ein Zählgas eingefüllt. Bei dem Zählgas handelt es sich um P10, ein Gasgemisch, das sich aus 90% Argon und 10% Methan zusammensetzt. P10 wird verwendet, da die Driftgeschwindigkeit der Elektronen in diesem Gasgemisch verglichen mit ihrer Diffusionsgeschwindigkeit sehr hoch ist. Dadurch rekombinieren nur wenige Elektronen mit ihren ursprünglichen oder mit auf dem Weg zur Messanode neu entstandenen Ionen. Das führt zu einer höheren Detektoreffizienz[20].

Das Zählgas wird nun von den alpha-Teilchen aus der Probe ionisiert.

Argon hat eine Ionisationsenergie von 15,7 eV und Methan eine von 14,5 eV[21]. Die Ionisationsenergie hängt von der Bindungsenergie der Elektronen in der äußersten Schale der Moleküle ab. Typische Zerfallsenergien von alpha-Teilchen liegen zwischen 4 und 7 MeV. Manche Nuklide emittieren alpha-Teilchen auch mit Energien mit bis zu 10 MeV. Ein alpha-Teilchen ionisiert somit eine Vielzahl an Gasmolekülen. Die freigesetzten Elektronen werden von der angelegten Hochspannung zur Messanode beschleunigt (direkte Ionisation). Die Driftgeschwindigkeit ist dabei proportional zu der Stärke des angelegten Feldes. Ist die Betriebsspannung und somit das erzeugte elektrische Feld im Inneren der Kammer höher, können die bei der Ionisation herausgelösten Elektronen auch Gasmoleküle ionisieren (indirekte Ionisation). Das wird bei Detektoren, wie dem Geiger-Müller-Zählrohr, ausgenutzt. Bei Ionisationskammern werden nur direkt ionisierte Elektronen detektiert.

**3.2.2.1 Frisch-Gitter** Abbildung 15 zeigt eine schematische Skizze der GIK mit dem Frisch-Gitter.

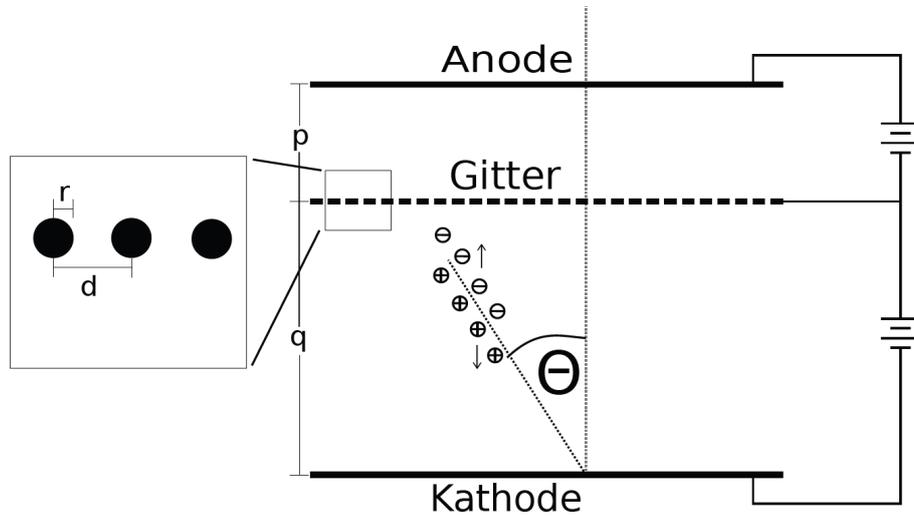


Abbildung 15: Schematische Skizze GIK (F. Krüger, 2013, S. 24 [20])

Die Ionisation der Gasmoleküle durch die alpha-Teilchen findet aufgrund der geringen Reichweite der alpha-Teilchen im Gas nur zwischen Kathode und Frisch-Gitter statt. An dem Gitter liegt durch die Betriebsspannung ein Potential an, das Elektronen durch das Gitter hindurch passieren lässt. Die Ionenrümpfe werden wegen ihrer positiven Ladung unterdrückt und vom Gitter absorbiert. Somit sind Weg und Geschwindigkeit für alle Elektronen, die das Gitter passiert haben, gleich groß und die auf der Anode induzierte Spannung ist nur von der Anzahl der Elektronen abhängig. Das führt zu einer erheblichen Verbesserung der Energieauflösung im Spektrum[22].

Die innerhalb einer Abklingzeit an der Anode auftreffenden Elektronen werden gezählt und als ein Ereignis einem Kanal im Spektrum zugeordnet.

### 3.2.3 Signalverarbeitung

Abbildung 16 zeigt ein Foto der Bauelemente der Ausleseelektronik der GIK. Auf dem Bild ist links ein Vielkanalanalysator, in der Mitte ein Verstärker und rechts eine Hochspannungsquelle zu sehen. Die Hochspannungsquelle legt ein elektrisches Feld in der Kammer an, welches die Elektronen zur Messanode beschleunigt.

Die Messanode der GIK ist im Prinzip ein Kondensator mit einer begrenzten Kapazität  $C$ . Der Vorverstärker auf der Messanode schickt im Idealfall alle Ladungsträger vom Kondensator weiter zum Verstärker. Geschieht das innerhalb der Abklingzeit  $\tau = R \cdot C$ , mit  $R$  dem inneren Widerstand, dann können alle einkommenden Ereignisse verarbeitet werden. Bei einer zu hohen Probenaktivität wird die GIK mit Ladungsträgern gesättigt und es können keine weiteren Elektronen registriert werden.



Abb. 16: Signalverarbeitung GIK

Der Verstärker verstärkt das Signal vom Vorverstärker und leitet es zum Vielkanalanalysator weiter. Dieser teilt ankommenden Ladungsträgern anhand ihrer Impulsamplitude proportional Kanalnummern zu und führt sie in einem Histogramm auf. Das bei der Messung entstehende Histogramm stellt das Spektrum der zu untersuchenden Probe dar<sup>[20]</sup>.

### 3.2.4 Eigenschaften

Im Folgenden wird die verwendete GIK auf ihrer Eigenschaften untersucht und alle Vorbereitungen für die Vermessung der Pechblende-Proben getroffen und diskutiert.

**3.2.4.1 Betriebsspannung** Die GIK ist eine Ionisationskammer, in der nur direkt ionisierte Elektronen detektiert werden sollen. Wie im [Abschnitt 3.2.2](#) Funktionsweise schon erklärt, ist die Spannung proportional zur Driftgeschwindigkeit der Elektronen. Um die optimale Betriebsspannung heraus zu finden, werden Spektren einer  $^{241}\text{Am}$ -Probe bei unterschiedlichen Spannungen aufgenommen.

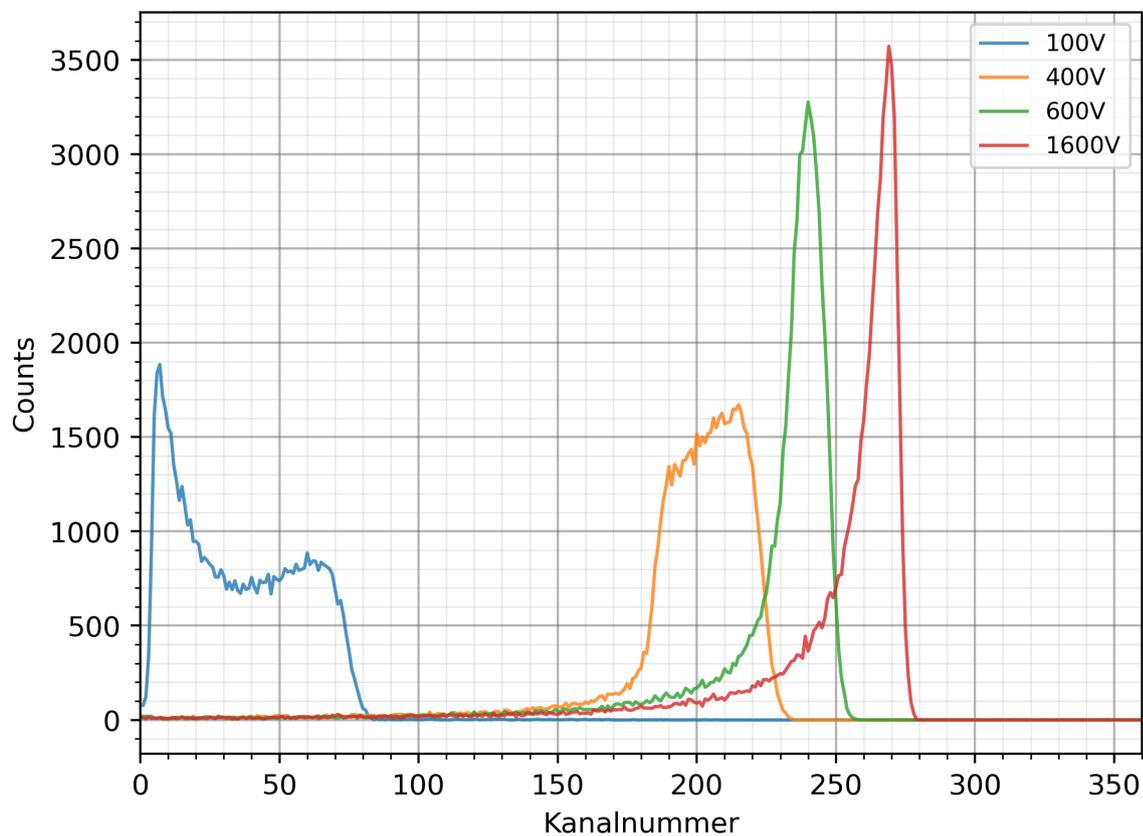


Abbildung 17: Spektren von  $^{241}\text{Am}$  bei unterschiedlichen Betriebsspannungen

Die geringste Halbwertsbreite und damit auch die höchste Auflösung des  $^{241}\text{Am}$ -Peaks wird bei 1600 V erreicht. Somit wird im Folgenden die GIK mit 1600 V betrieben. Eine Betriebsspannung von über 1600 V führt zu dauerhaften Beschädigungen am Frisch-Gitter. Die gesamte Grafik mit Spannungen in 100 V Schritten ist im Anhang aufgeführt (siehe [Abbildung 43](#)).

**3.2.4.2 Energiekalibrierung** Die Kanäle stehen für eine bestimmte Anzahl an detektierten Ladungsträgern. Die Kanalnummern steigen somit linear zur Anzahl der Elektronen an.

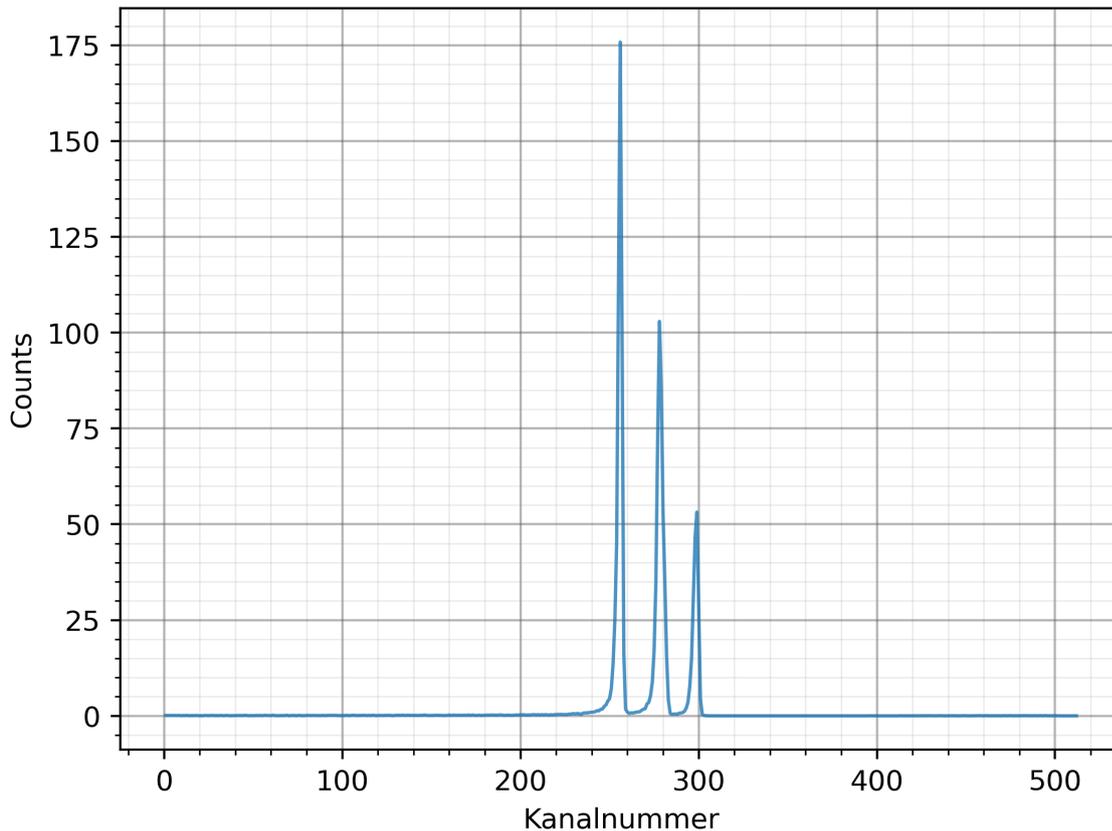


Abbildung 18: Spektrum des Energiekalibrierstandards

Der verwendete Energiekalibrierstandard besteht aus  $^{239}\text{Pu}$  (5096 keV),  $^{241}\text{Am}$  (5458 keV) und  $^{244}\text{Cm}$  (5729 keV). Damit können den Peakmaxima die korrespondierenden Zerfallsenergien zugeordnet und eine lineare Regression für alle anderen Kanalnummern erstellt werden.

Für die Pechblende-Proben wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Energiekalibrierungen verwendet.

Tabelle 1: Energiekalibrierungen der GIK anhand des Energiekalibrierstandards

Kalibrierung	EK1 (vom 06.09.)	EK2 (vom 16.09.)	EK3 (vom 23.09.)
Steigung [keV/Kanalnummer]	15.0689	15.0689	15.4207
Startwert [keV]	1298.55	1283.48	1236.84
$R^2$	99.76	99.85	99.53

**3.2.4.3 Untergrundmessungen** Aufgrund der massiven Außenwand der Kammer ist keine von außen einfallende Strahlung, die im Spektrum stören könnte, zu erwarten. Dennoch kann ein alpha-Untergrund in der Kammer vorhanden sein. Bei der Messung von Pechblende-Proben kommt in den Uran Zerfallsreihen Radon vor. Radon ist ein Gas, das, anders als alle anderen Zerfallstöchter, aus der Pechblende-Probe heraus migrieren, sich in der Kammer ansammeln und zerfallen kann. Problematisch wird es, wenn sich Radon-Folgeprodukte an der Wand der GIK anreichern und weitere Zerfallsprozesse machen. Das verursacht einen nicht zu vernachlässigen Untergrund in der GIK. Besonders fällt hier das  $^{210}\text{Pb}$  mit 22,2 a Halbwertszeit ins Gewicht, da es mit zwei beta-minus-Zerfällen zum  $^{210}\text{Po}$  wird und  $^{210}\text{Po}$  eine 5304 keV alpha-Linie hat, die deutlich in den Untergrundmessungen zu sehen ist.

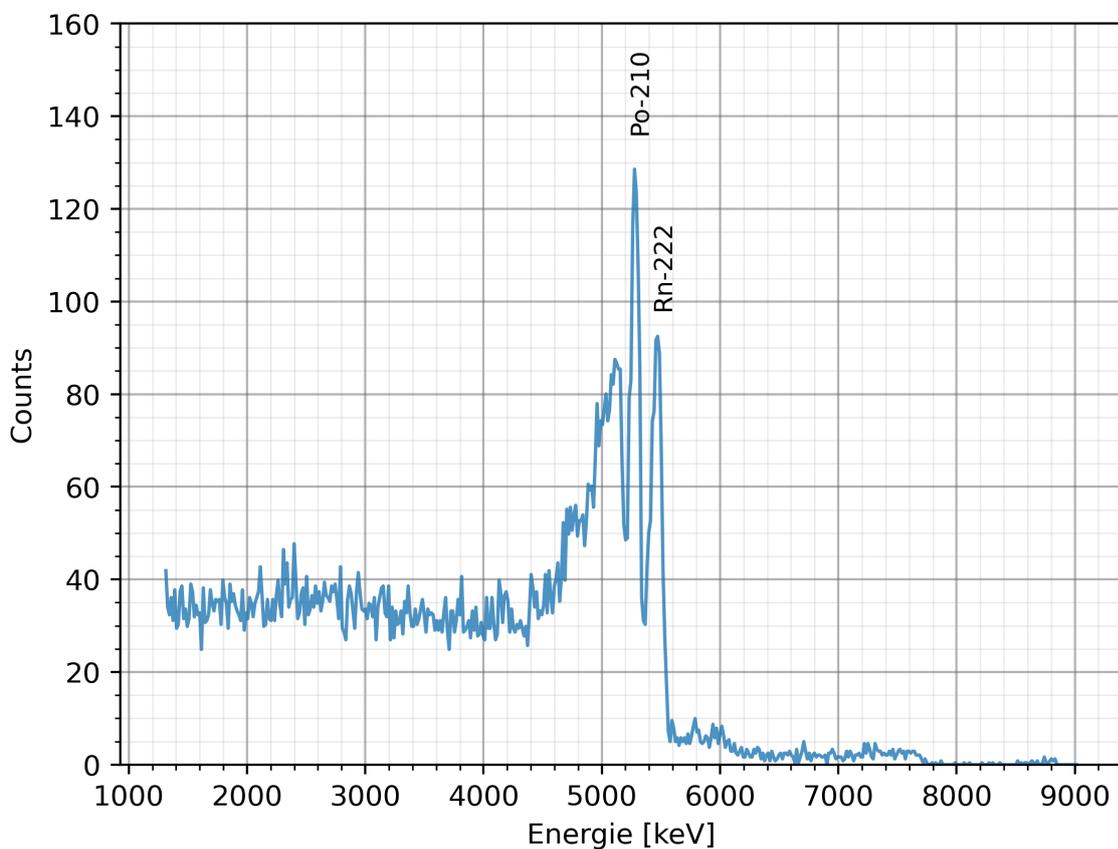


Abbildung 19: Untergrundmessung GIK vom 20.09., 241111s Messzeit, Energiekalibrierung EK2

Durch Evakuieren und Spülen der GIK kann ein Großteil des Untergrundes unterdrückt werden, aber bei langen Untergrundmessungen ist vor allem die  $^{210}\text{Po}$  Linie deutlich sichtbar. Aufgrund dessen werden regelmäßig Untergrundmessungen durchgeführt und der Untergrund von jedem aufgenommenen Spektrum abgezogen.

**3.2.4.4 Effizienzabschätzung** Ein Ziel dieser Arbeit ist die Vergleichbarkeit der beiden Messmethoden mit alpha-Track Analyse und GIK. Dafür soll auch mit der GIK eine Zählrate für die Pechblende-Proben abgeschätzt werden. Idealerweise würde hierfür die GIK mit einem Effizienzkalibrierstandard vermessen werden, um die kanalabhängige Effizienz bestimmen zu können. Diese ist nicht linear, wie bei der Energiekalibrierung, sondern folgt dem Jäckel-Westmeier-Fit, der mit Exponentialfunktionen beschrieben wird. Ein solcher Effizienzkalibrierstandard liegt aber nicht vor. Daher wird die Effizienz mit einer  $^{238}\text{Pu}$ - und einer  $^{242}\text{Pu}$ -Probe, deren Aktivitäten bekannt sind, abgeschätzt.

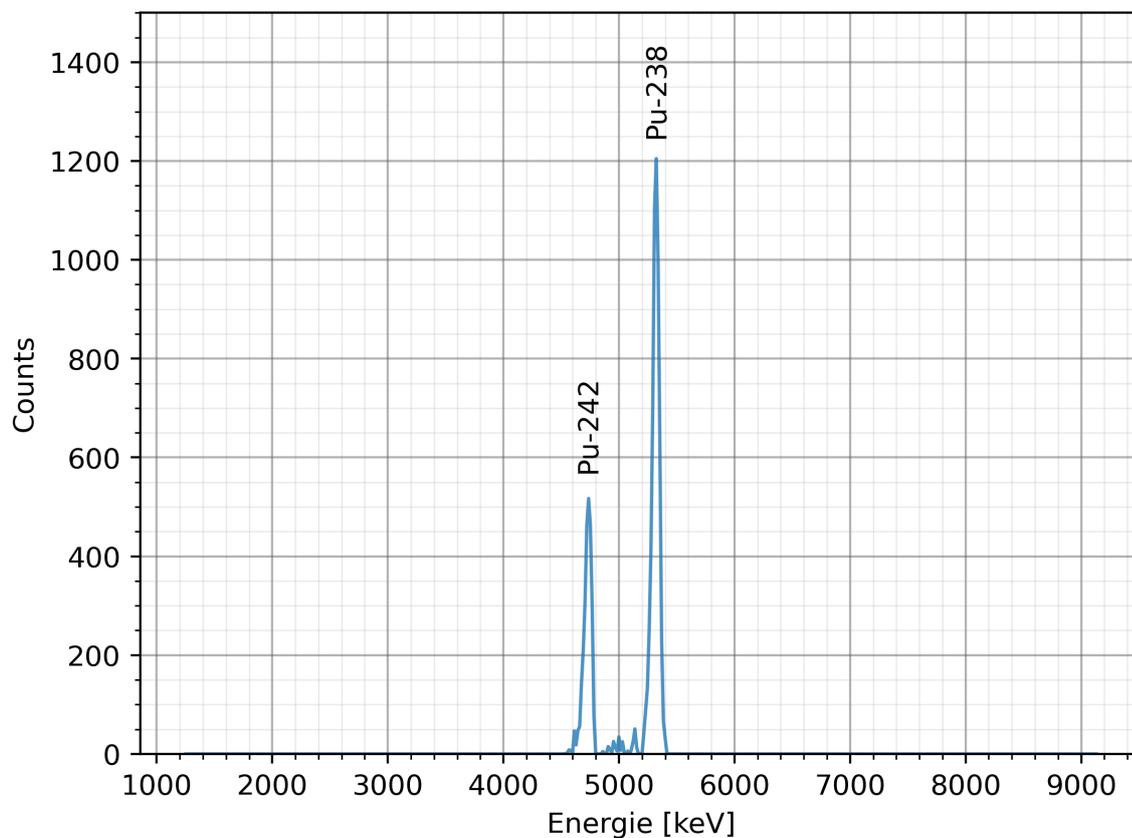


Abbildung 20: Spektrum elektrodeponierter  $^{238}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}$  Proben, 81574s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Die Proben haben eine bestimmte Aktivität von

$^{238}\text{Pu}$ :	$\approx 200 \text{ mBq}$ (08.02.2016)	$T_{1/2} = 87,7 \text{ a}$
$^{242}\text{Pu}$ :	$103,9 \text{ mBq}$ (23.05.2017)	$T_{1/2} = 3,75 \times 10^5 \text{ a}$

Die Plutoniumproben liegen bei den Kanälen 226 und 265, sodass eine Zählratenabschätzung im Bereich dieser Kanäle für andere Proben vorgenommen werden kann.

Die Aktivität der  $^{242}\text{Pu}$  Probe kann, wegen der langen Halbwertszeit, als gleichbleibend angesehen werden. Bei dem  $^{238}\text{Pu}$  macht die seit der Aktivitätsbestimmung vergangene Zeit einen Unterschied. Die Plutoniummessung mit der GIK erfolgte im August 2021, weshalb mit der Formel für exponentiellen Zerfall

$$A(t) = N_0 \cdot \exp\left(\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot t\right)$$

die noch verbleibende Aktivität abgeschätzt wird. Für  $^{238}\text{Pu}$  bedeutet das

$$A(5,5 \text{ a}) = 200 \text{ mBq} \cdot \exp\left(\frac{\ln(2)}{87,7 \text{ a}} \cdot 5,5 \text{ a}\right) = 191,5 \text{ mBq}$$

Um die Effizienz  $\varepsilon$  abzuschätzen, werden die gemessenen Nettozählraten der Plutoniumpeaks durch die angegebenen Aktivitäten geteilt. Für  $^{238}\text{Pu}$  ist  $\varepsilon = 36.9\%$  und für  $^{242}\text{Pu}$   $\varepsilon = 31.5\%$ . Da die Aktivität für  $^{242}\text{Pu}$  viel genauer angegeben wurde, wird im Folgenden die Äquivalenzzählrate der GIK mit der Effizienz  $\varepsilon = 31.5\%$  angegeben. Das ist eine sehr ungenaue Abschätzung, jedoch dient sie dafür, die Messungen der GIK mit denen der alpha-Track Analyse grob vergleichen zu können.

**3.2.4.5 Beispielproben** Im Folgenden sind Spektren von Beispielproben aufgeführt, die als Vergleichsspektren für die Messungen der Pechblende-Proben hilfreich sind. Bei Proben, die eine geringe Aktivität und gleichzeitig eine hohe Selbstabsorption haben, gehen viele Peaks im Spektrum unter. Für eine Orientierung sind dabei die Beispielspektren besonders nützlich.

Die Wiikit-Proben bestehen zum Großteil aus Thorium und nicht aus Uran. Daher ist hier auch ein Thoriumspektrum mit  $^{232}\text{Th}$ -Zerfallsprodukten aufgeführt.

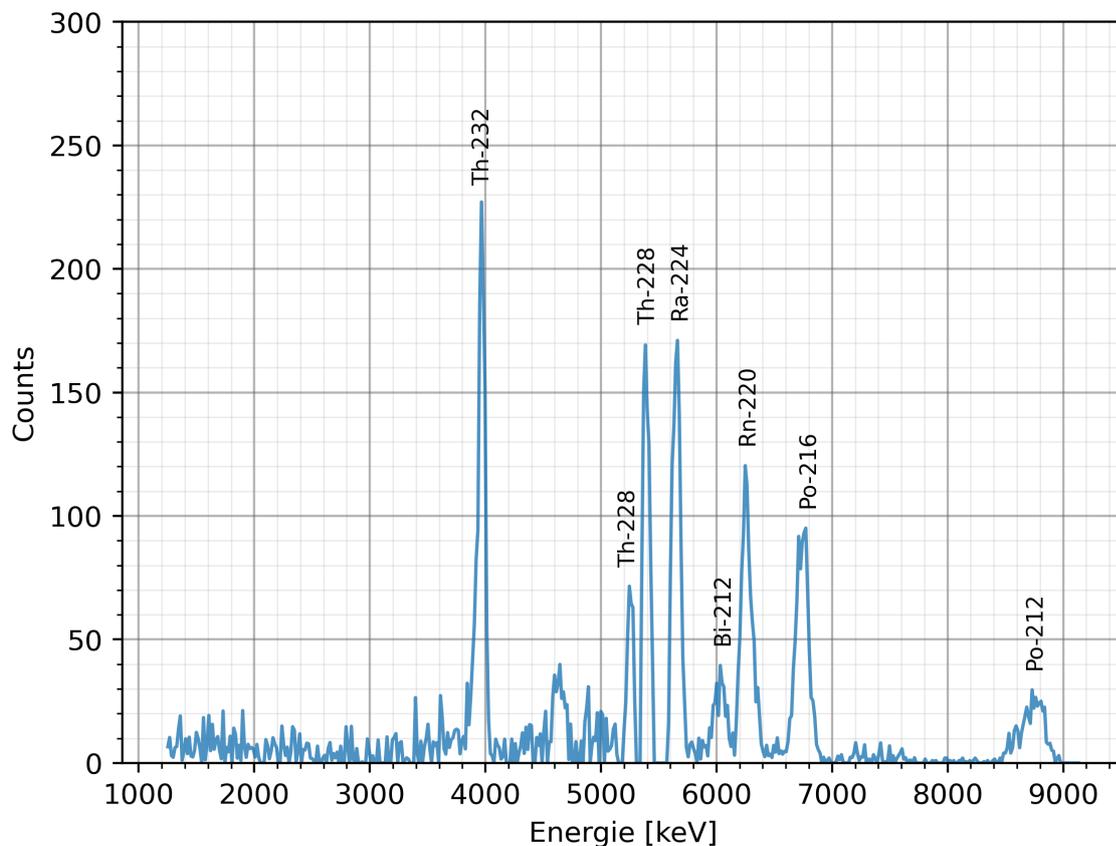


Abbildung 21: Spektrum elektrodeponierter Thoriumprobe, 98976s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

In Abbildung 22 ist das Spektrum einer elektrodeponierten Natururan-Probe dargestellt. Beide Proben, die Thorium- und die Natururan-Probe sind künstlich hergestellt worden. Beim Thorium sind im Gegensatz zum Uran die Töchter aus der Zerfallsreihe sichtbar, da diese in der Probe schon eingewachsen sind. Das ist bei der Natururanprobe nicht der Fall. Somit sind nur  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  und  $^{235}\text{U}$  im Spektrum zu sehen. Trotzdem ist das Spektrum der Natururan-Probe interessant, da die drei Peaks in Gänze erkennbar sind, die sonst in den Pechblende-Proben durch Selbstabsorption größtenteils überdeckt werden.

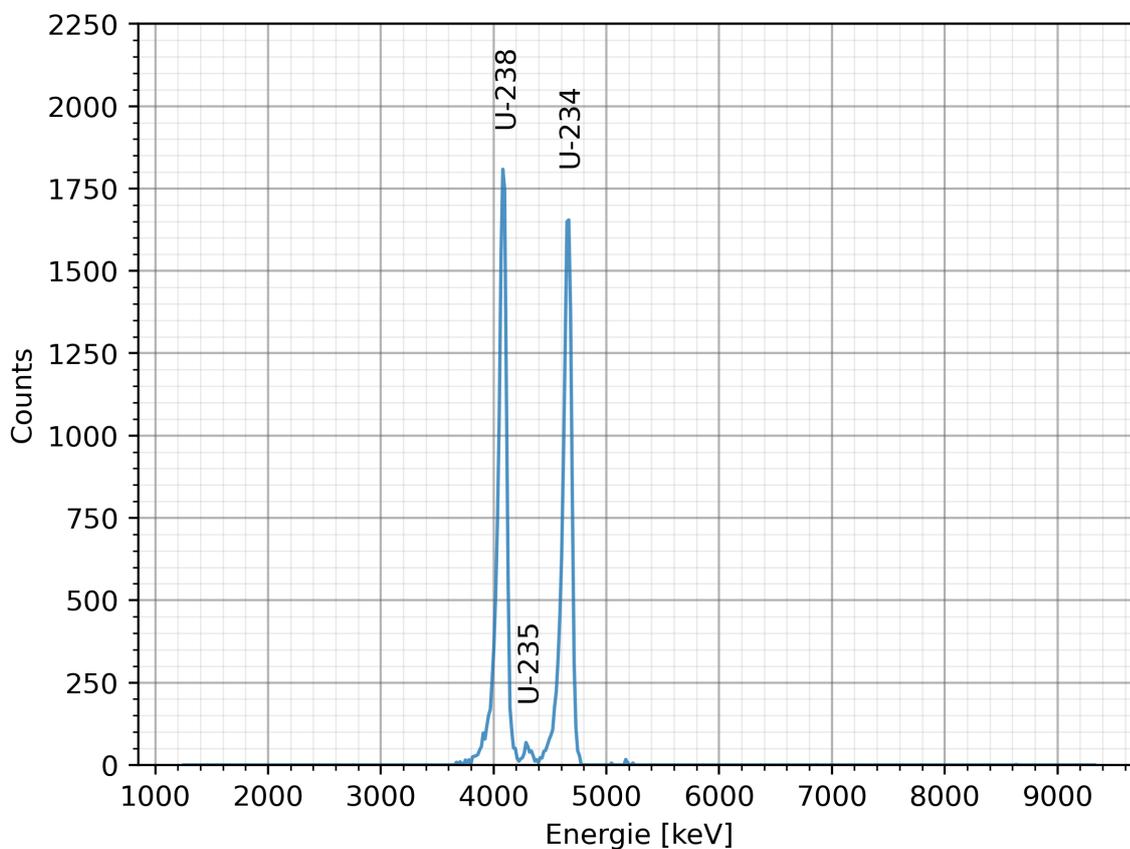


Abbildung 22: Spektrum elektrodeponierter Uranprobe, 57226s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

**3.2.4.6 Aufgetretene Probleme** Bei der Messung einiger Beispielproben sind Aufladeeffekte aufgetreten. Das äußert sich darin, dass die aufgenommenen Peaks mit zunehmender Messzeit zu kleineren Energien wandern. Das macht bei einigen Messungen eine Änderung von bis zu 300 keV aus. Grund hierfür ist, dass sich in kurzer Zeit ein elektrostatisches Feld in der Kammer oberhalb der Probe ausbildet, wenn die Probe nichtleitend ist. Das Feld fängt freie Elektronen ab und sorgt somit für weniger detektierbare Elektronen an der Messanode, das zu einer Peakverschiebung im Spektrum führt.

Bei den Beispielproben treten Aufladeeffekte bei den Proben auf, die auf eloxiertem Aluminium deponiert sind. Eloxiertes Aluminium ist aufgrund der vor Korrosion schützenden Oxidschicht ein Nichtleiter. Bei den Pechblende-Proben kann es auch auftreten, dass manche Porben nichtleitend sind. Zum Beispiel die Probe M, dessen Spektrum in [Abbildung 23](#) nach der Messzeit aufgelöst die Peaksverschiebung dokumentiert.

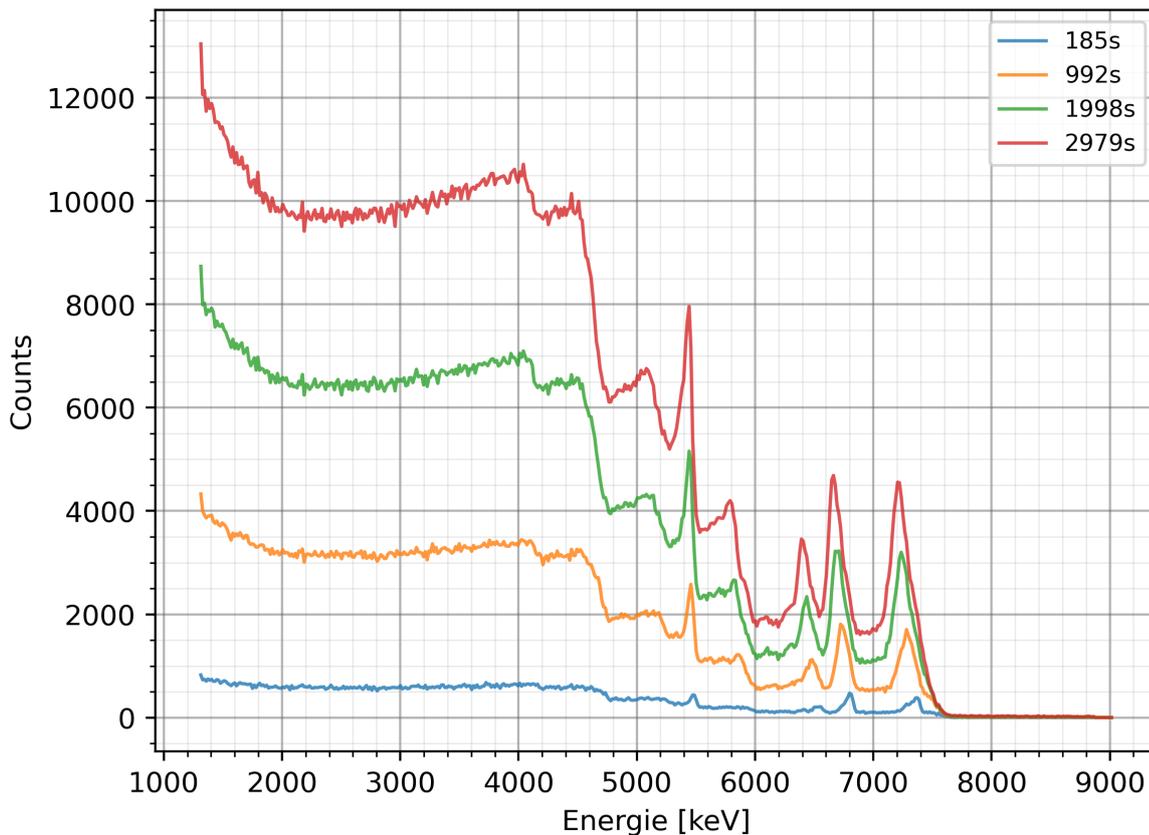


Abbildung 23: Aufladeeffekte bei Probe M, Wanderung der Peaks bei zunehmender Messzeit zu kleineren Energien

Ein weiteres Problem tritt bei den Beispielproben während der Messung in der GIK auf. Bei elektrodeponierten Proben wurden bei ihrer Herstellung mehrere Lagen auf das Trägermaterial aufgetragen, sodass ihre Gesamtdicke Selbstabsorption führt. Das äußert sich in einer leichten Peakverschiebung zu geringeren Energien.

In [Abschnitt 2.2](#) wurde die Selbstabsorption der Pechblende erklärt. [Abbildung 24](#) zeigt die Energiestufen eines Festkörperspektrums und die damit verbundene Überlagerung und Konsequenz der Selbstabsorption in den Spektren der GIK[4].

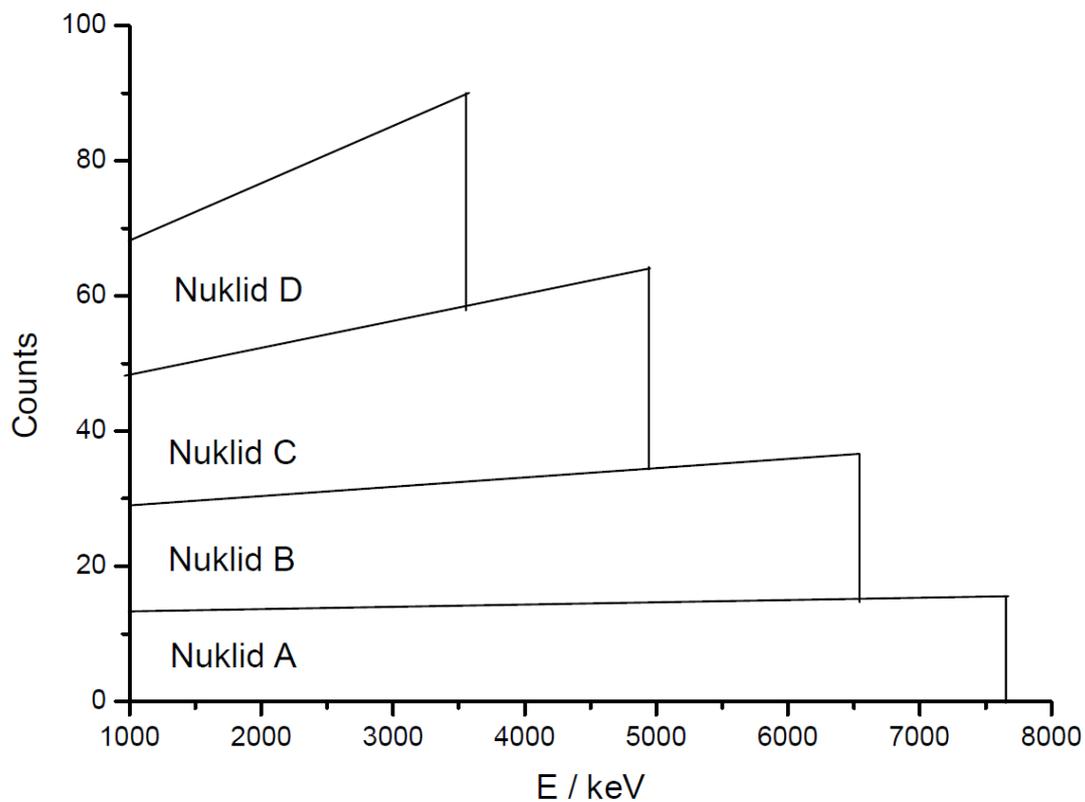


Abbildung 24: Schema eines Festkörperspektrums (S. Bister, 2007, S. 32 [4])

## 4 Ergebnisse

Es wurden in dieser Arbeit 30 Pechblende-haltige Erze mit der alpha-Track Analyse und mit der GIK vermessen. Für jede Probe wurden die Ergebnisse von alpha-Track und GIK vergleichend gegenüber gestellt. Ein Ergebnis der alpha-Track Analyse ist die orts aufgelöste Darstellung der alpha-Emitter auf der Probenoberfläche. Diese ist für jede Probe abgebildet, aber aufgrund des Größenunterschieds zwischen einem alpha-Track, der 10  $\mu\text{m}$  im Durchmesser groß ist und der Probenoberfläche, die mehrere Zentimeter betragen kann, sind die alpha-Tracks auf den Mikroskopbildern nicht erkennbar. Des Weiteren werden die Probenoberfläche und die Ergebnisse der Zählrate durch ImageJ aufgeführt. Daraus ergibt sich eine Flächenzählrate für die jeweiligen Pechblende-Proben. Anschließend werden die GIK Spektren abgebildet. Dazu gehören die Tabellen, die die Zerfallsenergien der Produkte aus den Zerfallsreihen mit den gemessenen Werten vergleichen.

Die Ergebnisse der Pechblende-Proben wurden zusammen in Güteklassen eingeteilt. Die Güteklassen richten sich überwiegend an der Auflösung und Differenzierbarkeit einzelner Nuklide in den GIK Spektren. Bei der alpha-Track Analyse konnten, mit Berücksichtigung der Belichtungszeit, alle Detektoren gleichermaßen ausgewertet und quantifiziert werden. Bei der Auswertung der GIK Spektren gibt es andererseits große Abweichungen untereinander. Die Güteklassen teilen sich auf in sehr gut, gut und schlecht auswertbare Proben. Von insgesamt 30 Proben sind 15 als sehr gut, 6 als gut und 9 als schlecht auswertbare Proben klassifiziert worden.

Anhand einiger ausgewählter Proben werden Korrelationen in den Ergebnissen herausgearbeitet und aufgeführt.

Eine sehr gut auswertbare Probe ist die Probe B.



Abbildung 25: Foto Pechblende der Probe B



Abbildung 26: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe B

Tabelle 2: alpha-Track Auswertung Probe B

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
1,28 ± 0,33	1	260,8 ± 17,9	203,3 ± 54,6

B ist eine kleine, flache Probe mit ebener Oberfläche. Die alpha-Track Analyse gibt für die Probe B eine hohe Flächenzählrate an. B hat eine annähernd homogenen Verteilung von alpha-Emittern auf der Probenoberfläche, wie in der Vergrößerung des alpha-Track Detektors in [Abbildung 27](#) zu sehen ist. Diese gleichmäßige Verteilung erstreckt sich über die gesamte Probe.



Abbildung 27: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe B - Vergrößerung auf alpha-Tracks

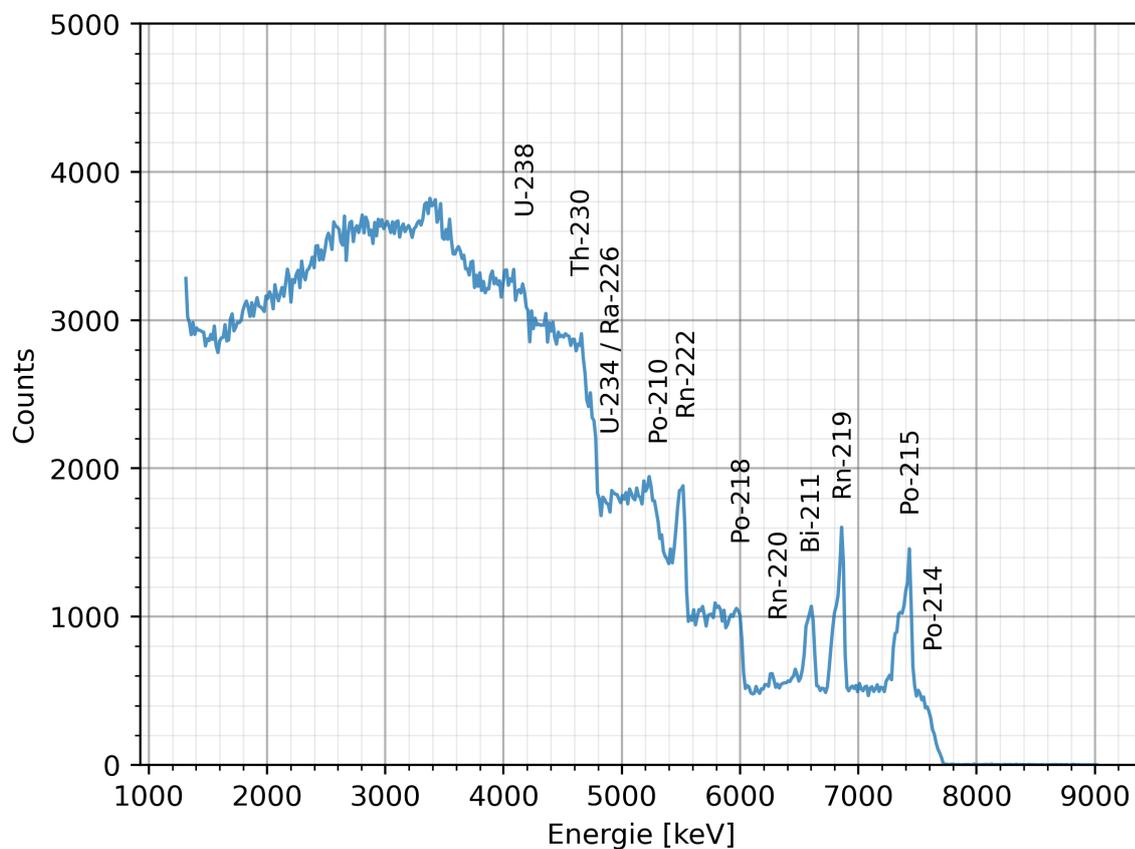


Abbildung 28: Spektrum der Probe B, 5000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 3: GIK Auswertung Probe B

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4172	4660	4739	5243	5506	6018	6601	6865	7440	7592
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-26	-27	-36	-61	17	16	-22	46	54	-95

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe B  $(627,6 \pm 24,6)$  cps.

Aus den verwendeten Energiekalibrierungen folgt, dass ein Kanal durchschnittlich 15 keV entspricht. Das gesamte GIK-Spektrum ist 512 Kanäle breit. Aus Tabelle 3 geht somit hervor, dass die Abweichungen zwischen Messung und Literatur wenigen Kanälen entsprechen. Der Energiekalibrierungsstandard, bestehend aus  $^{239}\text{Pu}$  (5096 keV),  $^{241}\text{Am}$  (5458 keV) und  $^{244}\text{Cm}$  (5729 keV), deckt jedoch nicht Nuklide mit höheren Zerfallsenergien ab. Für  $^{215}\text{Po}$  (7386 keV) und  $^{214}\text{Po}$  (7687 keV) wird die Energiekalibrierung daher ungenau, was zu höheren Abweichungen führt. Besonders auffällig ist, dass  $^{215}\text{Po}$  fast immer eine um mehrere Dutzend keV höhere und  $^{214}\text{Po}$  eine niedrigere Energie im Spektrum hat, als von der Literatur vorgegeben.

Die genauen Peaks von  $^{238}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  und  $^{210}\text{Po}$  sind im Spektrum nicht exakt bestimmbar, da sich deren Zerfallsenergien mit der Selbstabsorption der Festkörperprobe überlagern. Dadurch stechen ihre Peaks nicht scharf heraus und es kann, wie in Abbildung 24 gezeigt, die Kante des Peaks als Zerfallsenergie der Nuklide angegeben werden. Dadurch werden die Abweichungen von den Literaturwerten kleiner.

Radon wird in der GIK mit einer höheren Effizienz gemessen. Es liegt in der Pechblende-Probe selbst vor, verteilt sich aber auch in der Kammer mit dem Zählgas, da Radon gasförmig ist. Somit können Zerfälle in der gesamten Kammer und nicht nur von der Festkörperprobe ausgehend stattfinden. Es werden dadurch mehr Elektronen freigesetzt, wodurch Radon höhere Kanäle im Spektrum zugeordnet bekommt, als mit der Energiekalibrierung zu erwarten gewesen wäre. Durch die Anwesenheit von Radon im Zählgas können Radon und Folgeprodukte mit einer erhöhten relativen Häufigkeit in der Kammer gemessen werden[23].

Alle genannten Symmetrien sind in den nachfolgenden Spektren wiederzufinden.

B ist somit eine sehr gut auswertbare Probe, da im GIK-Spektrum alle erwarteten Nuklide klar erkennbar sind. Außerdem haben die Peaks eine geringe Abweichung vom Erwartungswert der Zerfallsenergien.

Die Probe S wurde der Klasse der gut auswertbaren Proben zugeordnet.



Abbildung 29: Foto Pechblende der Probe S

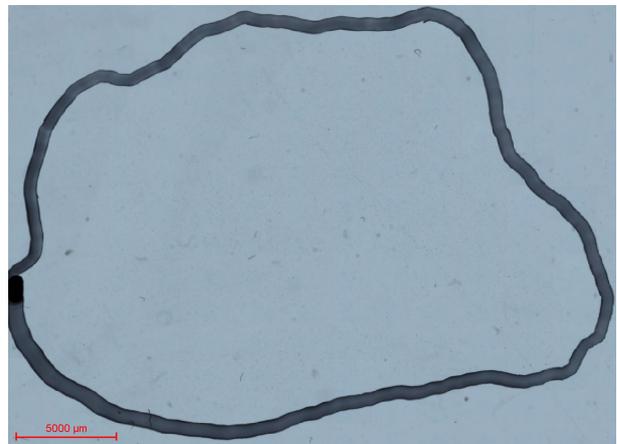


Abbildung 30: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe S

Tabelle 4: alpha-Track Auswertung Probe S

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
4,52 ± 0,73	5	185 ± 3	40,9 ± 6,7

Die Probe S ist eine eher kleine Probe und hat eine flache, ebene Oberfläche. Sie hat auch eine homogene Ortsauflösung und eine hohe Flächenzählrate.



Abbildung 31: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe S - Vergrößerung auf alpha-Tracks

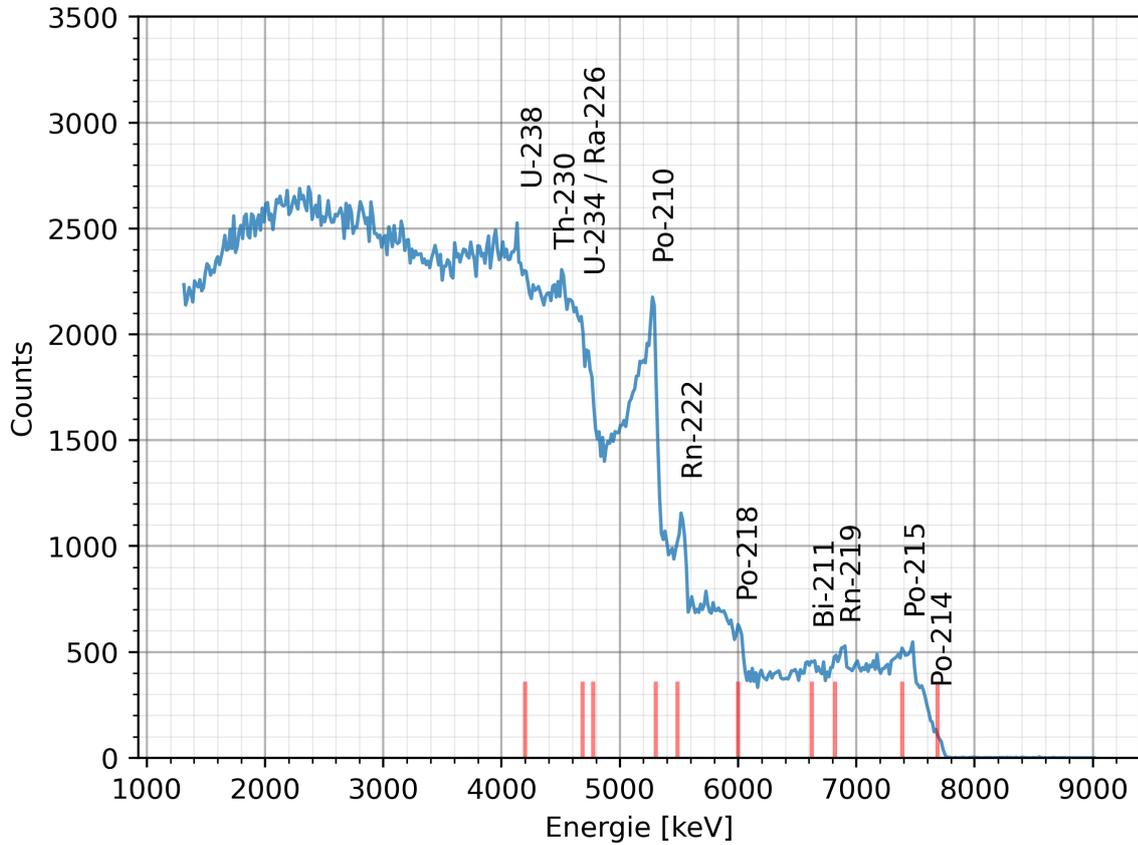


Abbildung 32: Spektrum der Probe S, 3628 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1, Senkrechte rote Striche geben die Erwartungswerte der Nuklidpeaks an

Tabelle 5: GIK Auswertung Probe S

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4140	4628	4716	5283	5530	6010	6625	6897	7464	7664
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-58	-59	-59	-21	41	8	2	78	78	-23

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe S ( $639,6 \pm 25,3$ ) cps.

Die Probe S hat kaum sichtbare Ausschläge bei den Energien, wo Töchter der  $^{235}\text{U}$ - Zerfallsreihe erwartet werden. Töchter der  $^{238}\text{U}$ - Zerfallsreihe sind gut zu erkennen. Somit wird die Probe S nur als gut auswertbare Probe klassifiziert.

Die senkrechten roten Striche in Abbildung 32 stellen die Erwartungswerte der Nuklidpeaks dar. Sie sind in den Spektren aufgeführt, wo die Nuklidpeaks entweder nicht klar herausstechen oder die Peaks sich aufgrund von Aufladeeffekten hin zu kleineren Energien verschoben haben. In sehr gut auswertbaren Spektren sind die roten Striche nicht aufgeführt, da dort die tatsächlichen Zerfallsenergien von den gemessenen Nuklidpeaks genau genug abgebildet werden.

Anhand Probe R können nun besonders auffällige Korrelationen aufgestellt werden.



Abbildung 33: Foto Pechblende der Probe R

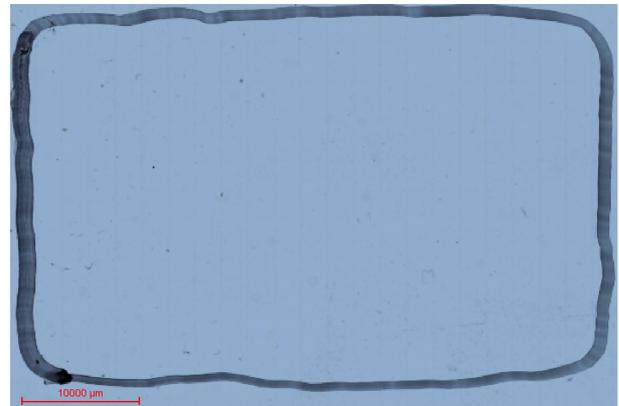


Abbildung 34: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe R

Tabelle 6: alpha-Track Auswertung Probe R

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
16,7 ± 1,6	60	6,2 ± 0,1	0,37 ± 0,04

R ist eine Probe mit großer Oberfläche und einer Höhe von  $\approx 1,5$  cm. Der alpha-Track Detektor der Probe R ist sehr auffällig. Entlang des schwarzen Streifens der Probe (rechts in [Abbildung 33](#)), die auf Uraninit schließen lässt, gibt es ein hohes und homogenes Aufkommen an alpha Teilchen. Das ist in [Abbildung 35](#) zu sehen.

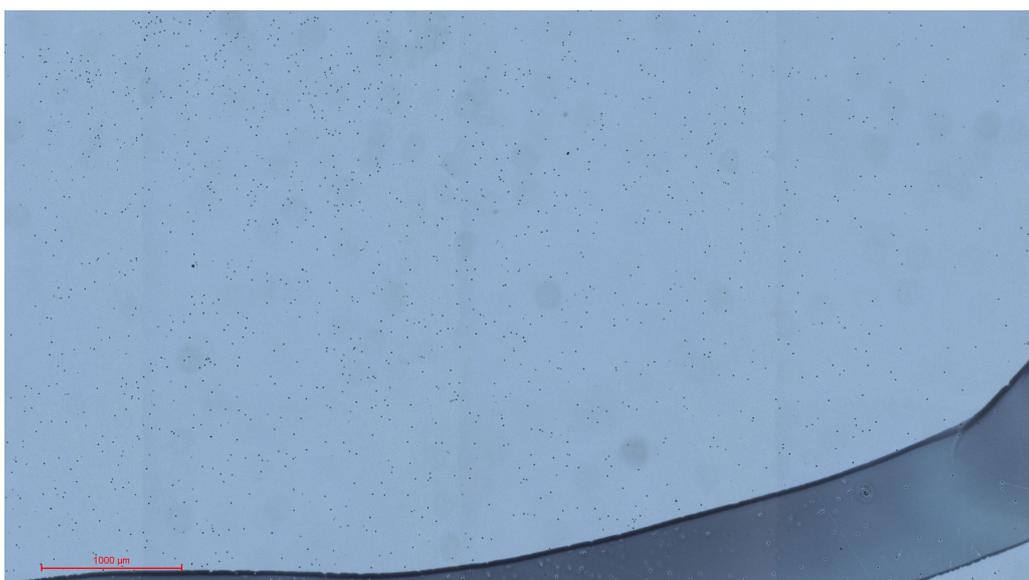


Abbildung 35: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe R - Zoom auf Uraninit

Auf der restlichen Detektorfläche ist nahezu keine alpha-Aktivität erkennbar. Das bedeutet, dass es sich beim Backstein-farbenden Teil der Probe R um Taubgestein handelt, das keine alpha-Teilchen emittiert. Abbildung 36 ist hierbei stellvertretend für den gesamten restlichen Detektor.

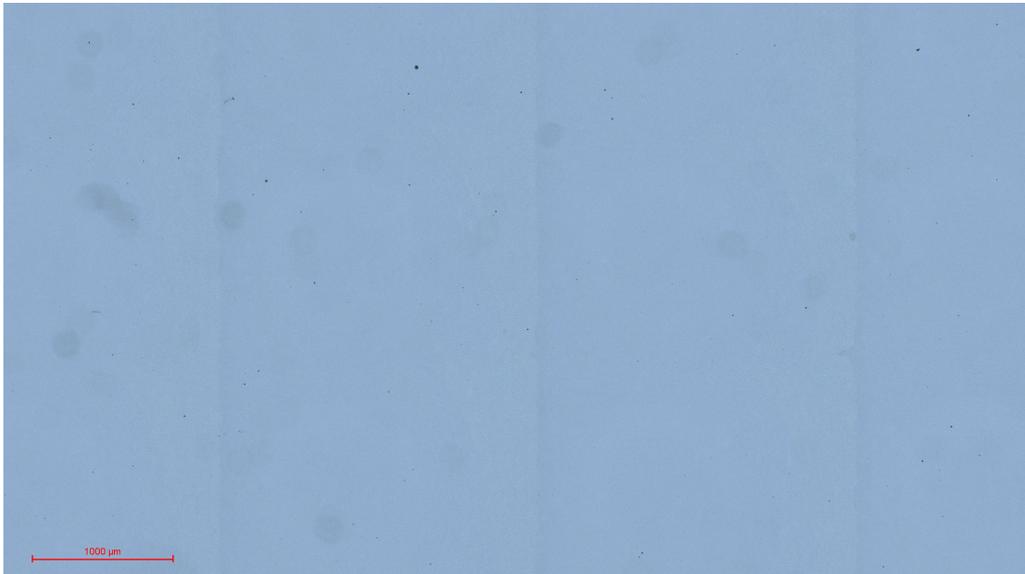


Abbildung 36: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe R - Zoom auf Taubgestein

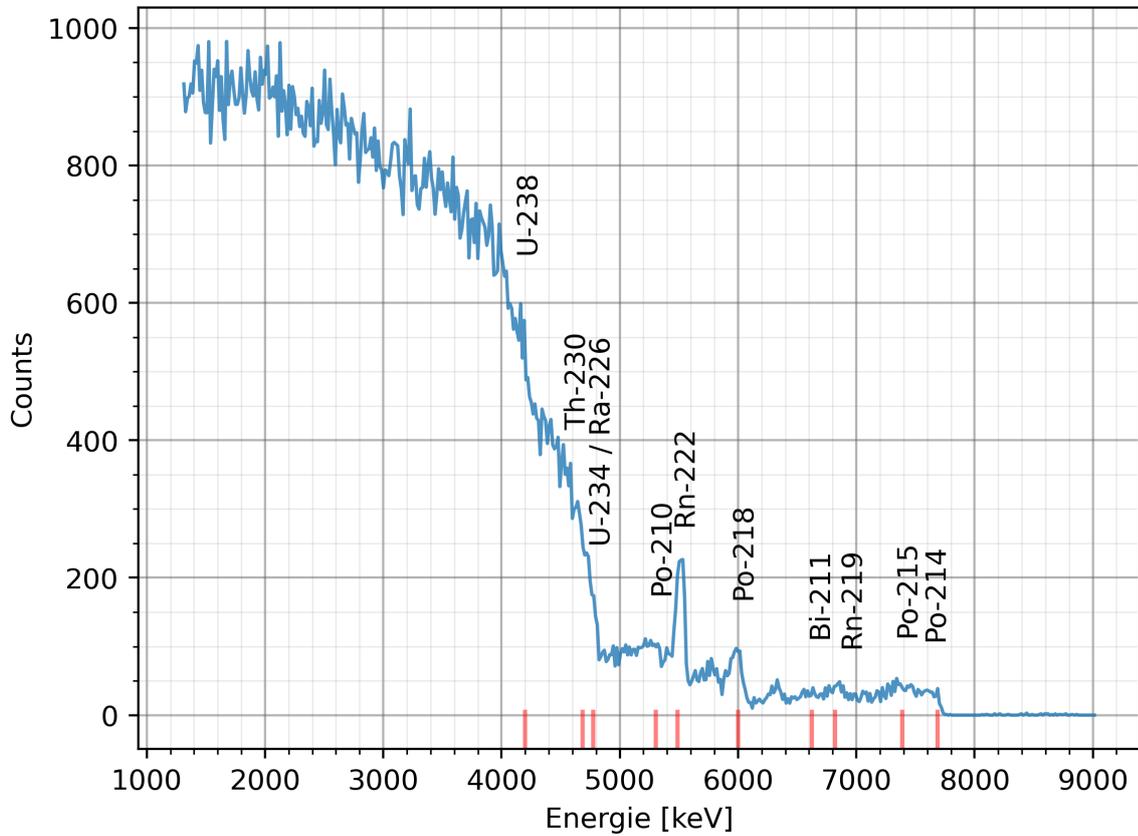


Abbildung 37: Spektrum der Probe R, 20 000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2

Tabelle 7: GIK Auswertung Probe R

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4172	4644	4771		5498	5994				
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-26	-43	-4		9	-8				

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe R  $(30,4 \pm 5,5)$  cps.

Im Spektrum der Probe R bilden sich Töchnernuklide des  $^{219}\text{Rn}$  der  $^{235}\text{U}$ -Zerfallsreihe nicht so präsent aus, wie es zu erwarten gewesen wäre. Zudem nimmt die Selbstabsorption einen dominanten Part im Spektrum ein, sodass kleinere Peaks im Gesamtbild unterdrückt werden.

Bei einer Probe mit geringer Verteilung von alpha-Emittern ist ein hoher Grad an Selbstabsorption im Spektrum erkennbar. Das rührt daher, dass bei der alpha-Track Analyse nur die alpha-Teilchen detektiert werden können, die einen genügend großen Defekt im Detektor hinterlassen, also ein Mindestmaß an Energie beim Austritt aus der Pechblende haben. Das sind unter anderem die alpha-Teilchen, die im Spektrum der GIK ihrem jeweiligen Nuklid zugewiesen werden können. alpha-Teilchen, die durch Selbstabsorption die geringeren Energien ausmachen, werden mit der alpha-Track Analyse nicht detektiert. Eine homogenere Verteilung auf der direkten Probenoberfläche führt somit zu einer hohen Auflösung der Peaks im GIK-Spektrum. Die Probe kann auch homogene Verteilungen in tiefer liegenden Schichten haben, jedoch überlagern sich dann Energien von unterschiedlich starker Selbstabsorption im GIK Spektrum. Das schließt eine Beurteilung der Verteilung der alpha-Emitter in tiefer liegenden Schichten aus.

Die Proben, die eine Höhe von ca. 1,5 cm haben, haben einen vergleichsweise hohen Anteil an Counts im niederenergetischen Bereich des GIK Spektrums. Das kann daran liegen, dass aufgrund ihrer Höhe ein größerer Teil an alpha-Teilchen aus den Seitenflächen der Proben emittieren. Dieser Anteil an emittierten alpha-Teilchen fällt bei flacheren Proben, die ca. 0,5 cm hoch sind, weg. Die alpha-Teilchen, die aus den Seitenflächen emittieren, werden mit einer höheren Wahrscheinlichkeit absorbiert, da die Elektronen nicht senkrecht nach oben, sondern erst um  $90^\circ$  gedreht zur Messanode beschleunigt werden. Die seitlich der Probe freigesetzten Elektronen haben ein längeren Weg zur Messanode, als die oberhalb der Probe. In diesem Fall können die Elektronen wieder mit der Probe kollidieren, was zu Ausschlägen in niedrigeren Energien im Spektrum führt. Das ist in [Abbildung 37](#) zu sehen.

Von Uraninit, also von den pechschwarzen Oberflächen, ist die meiste alpha-Aktivität zu erwarten. Das wurde bei den Betrachtungen der Proben R und Q in diesem Kapitel besonders deutlich.

Proben gleicher Herkunft weisen, mit Ausnahme der später diskutierten Probe Q, das selbe Nuklidverhältnis im Spektrum auf. Das gilt insbesondere für die Proben E bis K. Diese Proben sind alle Teil eines größeren Bruchstücks. Ihr GIK Spektrum ist für alle Proben nahezu identisch, da die mineralische Zusammensetzung gleicher Bruchstücke lokal betrachtet die selbe ist. Das gleiche gilt für die Proben V und W, AA und AB, sowie L und M, wobei für M eine Korrektur der Peakverschiebung wegen den Aufladeeffekten berücksichtigt werden muss. Im Anhang sind die Proben mit ihren Spektren einzeln nacheinander aufgelistet.

Bei Proben mit polierten Oberflächen ist die Auflösung der Peaks im Spektrum höher, da die emittierten alpha-Teilchen, direkt nach Austritt aus dem Festkörper, weniger Möglichkeiten haben von der Pechblende absorbiert zu werden.

Zum Schluss ist anhand der Probe Q aufgeführt, was eine schlecht auswertbare Probe ausmacht.



Abbildung 38: Foto Pechblende der Probe Q

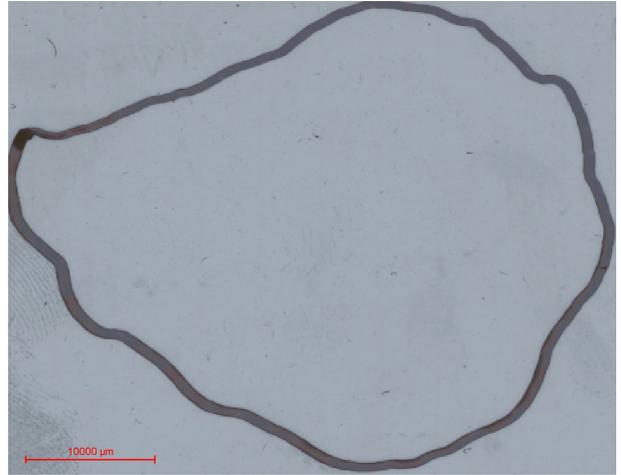


Abbildung 39: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe Q

Tabelle 8: alpha-Track Auswertung Probe Q

alpha-Track Auswertung Probe Q			
Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
11,7 ± 1,3	31	17,2 ± 0,2	1,47 ± 0,17

Im Vergleich zu den Proben B und S ist Q eine etwas größere Probe mit einer polierten Oberfläche. Q ist zusammen mit den Proben O und P ein Bruchstück eines größeren Pechblendestücks.



Abbildung 40: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe R - Zoom auf Uraninit

Die alpha-Emitter sind auf der Probenoberfläche wieder größtenteils im Uraninit und nicht im Taubgestein ansässig, worauf Abbildung 38 schließen lässt und in Abbildung 40 und 41 zu sehen ist. Die Probe Q hat dabei keine homogene Verteilung wie Proben B und S. Bei Q sind die alpha-Tracks eher in einigen Hotspots zentriert.



Abbildung 41: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe R - Zoom auf Taubgestein

Die Flächenzählrate ist im Vergleich zu den vorherigen Proben gering.

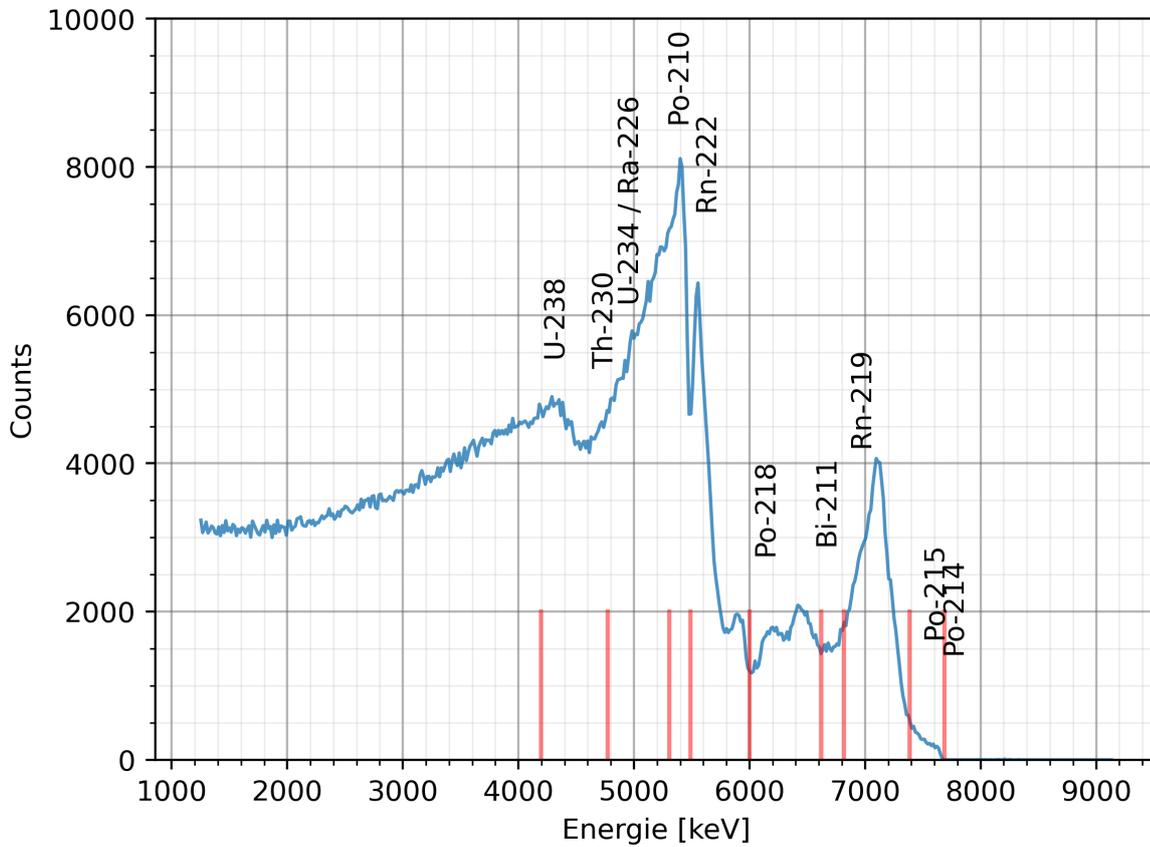


Abbildung 42: Spektrum der Probe Q, 74 000s Messzeit, Energiekalibrierung EK3, Senkrechte rote Striche geben die Erwartungswerte der Nuklidpeaks an

Tabelle 9: GIK Auswertung Probe Q

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]										
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]										

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe Q  $(64,7 \pm 8,0)$  cps.

Die Tabelle ist nicht mit Energiewerten aus dem Spektrum gefüllt, da das Spektrum keine charakteristischen Peaks der  $^{238}\text{U}$ - und  $^{235}\text{U}$ - Zerfallsreihe aufweist. Daher wurde Q als schlecht auswertbare Probe klassifiziert.

Dass die Probe Q so ein schlechtes Spektrum aufweist, ist ungewöhnlich, da Q zusammen mit O und P die selbe Gesteinsherkunft haben. Q ist zudem vergleichbar groß wie O und P. Sie haben gemeinsame Auffälligkeiten in ihrem alpha-Track und wurden nacheinander mit ähnlich langen Messzeiten in der GIK vermessen wurden. O und P weisen hochaufgelöste und differenzierte Spektren, im Gegensatz zur Probe Q auf. Deshalb ist anzunehmen, dass es sich bei der Probe Q um ein Messartefakt handeln müsste. Für zukünftige Untersuchungen sollte daher die Messung der Probe Q mit der GIK wiederholt werden.

## 5 Diskussion

Alle vorliegenden Pechblende-Proben konnten mit den Messmethoden der alpha-Track Analyse und der GIK gemessen und teilweise untereinander verglichen werden. Die dadurch entstandenen Ergebnisse sind im Anhang ausführlich aufgeführt und kompakt in einer Tabelle im Anhang (Tabelle 11) zusammengefasst. Manche Proben sind aufgrund der jeweils aufgeführten Probleme für einen Vergleich ungeeignet. Jedoch ist es gelungen, für alle Proben eine Flächenzählrate mit beiden Messmethoden bestimmen zu können. Das war das primäre Ziel dieser Arbeit.

Im Folgenden ist eine Tabelle mit den für das Projekt geeigneten Proben aufgeführt. Wie geeignet eine Probe ist, richtet sich ausschließlich nach ihrer Flächenzählrate.

Tabelle 10: Oberflächen und Zählraten der alpha-Track Analyse und GIK aller geeigneten Proben

Probe	Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Zählrate alpha-Track [cps]	Zählrate GIK [cps]
A	2,34 ± 0,51	189 ± 13	607 ± 25
B	1,28 ± 0,33	260,8 ± 17,9	627,6 ± 24,6
E	3,60 ± 0,65	174,3 ± 3,1	409,4 ± 20,2
F	3,97 ± 0,71	195,9 ± 3,5	447,5 ± 21,2
G	2,44 ± 0,51	220,5 ± 8,0	382,9 ± 19,6
J	14,5 ± 1,5	1421 ± 93	3190 ± 56
K	13,1 ± 1,4	2006 ± 131	2793 ± 53
L	6,55 ± 0,94	931 ± 63	1289 ± 36
M	7,59 ± 1,00	1725 ± 117	1967 ± 44
S	4,52 ± 0,73	185 ± 3	639,6 ± 25,3

Ein großer Punkt, der die Vergleichbarkeit der Proben erschwert, ist die Kurzreichweitigkeit der alpha-Strahlung. Das spiegelt sich in der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit der alpha-Track Analyse wieder. Bei der alpha-Track Analyse werden die Pechblende-Proben auf den Detektor gelegt. Proben, die keine plane Oberfläche haben, können leicht auf dem Detektor wackeln und somit immer abweichende Ergebnisse erzielen. Außerdem liegen diese Proben nicht mit ihrer gesamten Seitenfläche auf dem Detektor auf, wodurch sich an vielen Stellen Luft zwischen Probe und Detektor befindet. Das führt zu Absorption in der Umgebungsluft, bevor das alpha-Teilchen den Detektor erreicht hat. Das bedeutet, dass für die angegebene Flächengröße die ermittelte Zählrate für die Probe nach unten abgeschätzt ist, da die Probe nicht an allen Stellen gleichmäßig auf dem Detektor aufliegt.

Aus der Kurzreichweitigkeit der alpha-Strahlung ergibt sich eine weitere Unsicherheit bei der Abschätzung der Zählrate bei der alpha-Track Analyse. Die alpha-Teilchen müssen bei der alpha-Track Analyse eine bestimmte Energieschwelle erreichen, um im Detektor eine sichtbare Spur zu hinterlassen. Damit ist

der Großteil der Selbstabsorption mit der alpha-Track Analyse quantitativ nicht bestimmbar. Es muss somit abgeschätzt werden, wie groß diese Energieschwelle ist. Ab diesem Energiewert könnten in der GIK die Nettozählraten aufsummiert und mit den Ergebnissen der alpha-Track Analyse verglichen werden. Das Verhältnis aus gemessener Zählrate mit der alpha-Track Analyse und mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt gemittelt über alle Pechblende-Proben  $\approx 40\%$ . Das bedeutet, dass bis zu der Schwellenenergie alpha-Teilchen mit der alpha-Track Analyse nicht detektiert werden können, bis zu der die Nettozählrate des GIK Spektrums aufsummiert 60% beträgt. Diese Schwellenenergie liegt im Mittel bei 3500 keV. Das ist sehr grob abgeschätzt, da das Spektrum für unterschiedliche Proben sehr verschieden ausgeprägt ist. In Probe R (Abbildung 37) gehören 90% der gemessenen Zählrate zu Energien kleiner 4000 keV, wo es hingegen bei Probe A (Abbildung 103) 50% sind.

Außerdem ist die Probenfläche, die zur Zählrate beiträgt, bei beiden Messmethoden leicht unterschiedlich anzusetzen. In der GIK werden von der Probe aus in alle Richtungen alpha-Teilchen emittiert. Die aus der oberen Halbkugel der Probe emittierten Teilchen können potentiell das Zählgas ionisieren. Nur Teilchen, die in den Aluminiumteller oder in die Pechblende migrieren, können dies nicht. Könnten bei der alpha-Track Analyse nur alpha-Teilchen aus der Oberseite der Probe detektiert werden, spielen bei der GIK auch die seitlich emittierten alpha-Teilchen eine Rolle. Das bedeutet, dass die Fläche, von der die GIK alpha-Teilchen detektiert, von Grund auf größer ist, als die von der alpha-Track Analyse bestimmten, da die betrachteten Proben alle eine nicht vernachlässigbare Stärke haben.

Für die Durchführung einer Messung der Pechblende-Probe mit dem Fernmesssystem sollten die angegebenen Zählraten als untere Grenze angesehen werden. Das heißt, dass im Idealfall mindestens so viele UV-Photonen detektierbar sein müssten, wie sich rechnerisch aus der Zählrate und Energie der alpha-Teilchen der Pechblende-Proben ergeben. Um eine genauere Vorhersage an emittierten UV-Photonen treffen zu können, sollten alpha-Präparate hergestellt werden, bei denen die Kenngrößen genau bekannt sind. Da das Projekt aber an der Vermessung von Umweltproben interessiert ist, sind Naturproben, wie die hier behandelte Pechblende, für Testmessungen besonders gut geeignet.

Für die Thorium-haltigen Proben wurden ebenfalls die Messergebnisse aufgenommen und sind im Anhang aufgelistet. Der Vergleich dieser Proben untereinander oder mit anderen Uran-haltigen Proben bleibt an dieser Stelle aus. Die untersuchten Thorium-haltigen Proben weisen im GIK Spektrum zum Einen kein Uran und zum Anderen keine bzw. nur schwach ausgeprägte Peaks der Töchternuclide der  $^{232}\text{Th}$ -Zerfallsreihe auf. Das ist im Anhang in Abbildung 121 zu sehen. Neben Pechblende hat Thorium-haltiges Monazit auch eine hohe Umweltaktivität, weshalb es für die Betrachtung im Forschungsprojekt auf jeden Fall eine Rolle spielen sollte. Die hier aufgeführten Proben haben aber eine so geringe Flächenzählrate, dass sie für eine mögliche Detektion der UV-Photonen nicht in Frage kommen.

In dieser Arbeit ist bei der Betrachtung der alpha-Aktivität ausschließlich von Zählraten der jeweiligen Messungen die Rede. Eine Bestimmung der alpha-Aktivität ist aus mehreren Gründen mit den verwendeten Messmethoden nicht möglich. Zunächst fehlt für die GIK ein Effizienzkalibrierstandard um genauere Aussagen über die aufgenommenen Messwerte zu erhalten. Außerdem verfügen beide

Messmethoden über eine begrenzte Energieauflösung. alpha-Teilchen kleiner 1300 keV werden mit den Messmethoden dieser Arbeit nicht detektiert. Ein wichtiger Punkt ist zudem, dass nur die alpha-Teilchen detektiert werden können, die aus der Probenoberfläche heraus emittieren. alpha-Teilchen, die nach ihrer Bildung weiter in die Probe hinein migrieren, können nicht detektiert werden. Das ist für diese Arbeit aber nicht von großer Bedeutung, da im Forschungsprojekt auch nur die alpha-Teilchen von näherem Interesse sind, die aus der Probe migrieren und mit der Umgebung und nicht mit der Probe selbst wechselwirken.

## 6 Fazit

Die beschriebenen Methoden sind eine Möglichkeit, orts aufgelöst alpha-Spektrometrie zu betreiben. Das Ziel dieser Arbeit war es, eine Flächenzählrate für die gegebenen Pechblende-Proben zu bestimmen. alpha-Track Analyse und alpha-spektrometische Betrachtung mit einer GIK sind dafür geeignet, mit wenig Aufwand und Material, in kurzer Zeit handhabbar große Probenstücke zu untersuchen. Die Probenstücke werden bei den Messungen nicht beschädigt oder äußerlich verändert. Sie stehen somit nach der Messung für weitere Analysen unverändert zur Verfügung.

Mit den bestimmten Flächenzählraten sollen Tests für das in der Einleitung beschriebene, optische Fernmesssystem durchgeführt werden. Hierfür kommen die Proben in Frage, die eine besonders hohe Flächenzählrate aufweisen. Die Anzahl der durch Radiolumineszenz emittierten Photonen korreliert mit der Anzahl an frei gesetzten alpha-Teilchen und somit mit der Flächenzählrate einer Probe. Eine höhere Flächenzählrate sorgt somit für eine Detektierbarkeit der emittierten UV-Strahlung, die insgesamt aus nur  $19 \pm 3$  Photonen pro MeV alpha-Aktivität besteht. Dabei war es wichtig, ausschließlich die alpha-Aktivität der Umweltproben zu bestimmen, da nur alpha-Strahlung die UV-Emission von Stickstoff verursacht. Das konnte mit der alpha-Track Analyse und der GIK gut realisiert werden, da beide Messmethoden aufgrund ihrer Konstruktion reine alpha-Detektoren und keine gamma-Strahlung detektieren können.

Für eine bessere Vergleichbarkeit der beiden Methoden sollte der Schwellenwert bei alpha-Track Detektoren bestimmt werden, ab wann die Energie eines alpha-Teilchens groß genug ist um einen Defekt im Detektor zu hinterlassen. Damit kann die Nettofläche im GIK Spektrum ab der Energieschwelle aufsummiert werden, um die beiden ermittelten Zählraten adäquat miteinander vergleichen zu können. Für die Vorhersage, wie viele UV-Photonen durch die Pechblende-Probe erzeugt werden, sollte daher zunächst die Zählrate der GIK verwendet werden. Die GIK kann Energien ab 1300 keV auflösen, wohingegen mit der alpha-Track Analyse, nach vorangegangener Abschätzung, alpha-Teilchen ab 3500 keV detektiert werden.

Sollte eine solche Untersuchung erneut mit Naturproben durchgeführt werden, dann sollten die Proben für die alpha-Track Analyse gegebenenfalls anders vorbereitet werden. Die Pechblende-Proben wackelig auf den alpha-Track Detektor zu legen, kann Probleme bei der genauen Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hervorbringen. Ein Beispiel dem entgegen zu wirken, ist das Eingießen der Pechblende-Proben in Epoxidharz. Der Grund, weshalb das in dieser Arbeit nicht gemacht wurde, sind die dabei in der GIK auftretenden Aufladeeffekte, da Epoxidharz nicht-leitend ist. Außerdem wird die alpha-Aktivität der Proben mit dem Eingießen reduziert, da das Epoxidharz die seitlich emittierenden alpha-Teilchen absorbieren würde.



## 7 Anhang

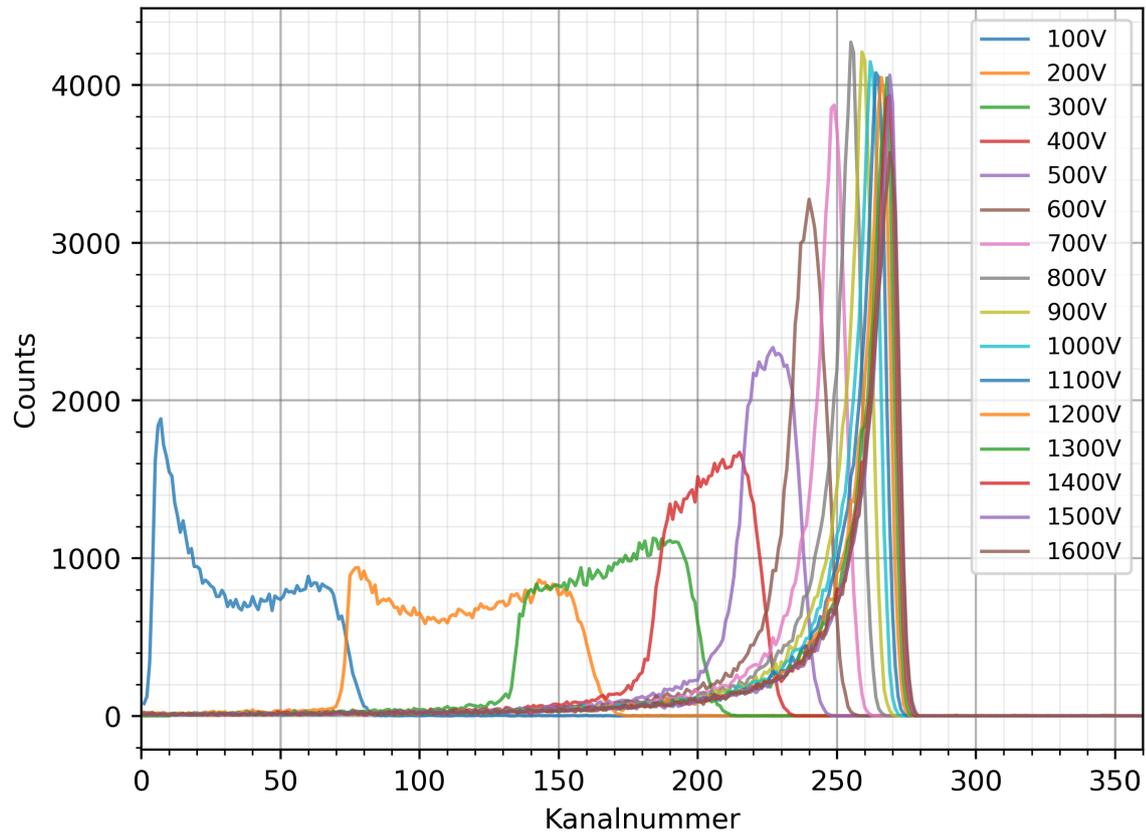
Abbildung 43: Spektren von  $^{241}\text{Am}$  bei unterschiedlichen Betriebsspannungen

Tabelle 11: Oberflächen und Zählraten der alpha-Track Analyse und GIK aller Proben

Probe	Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Zählrate alpha-Track [cps]	Zählrate GIK [cps]
A	2,34 ± 0,51	189 ± 13	607 ± 25
B	1,28 ± 0,33	260,8 ± 17,9	627,6 ± 24,6
C	2,14 ± 0,46	1,60 ± 0,04	10,8 ± 3,3
D	3,40 ± 0,63	4,15 ± 0,09	15,2 ± 3,9
E	3,60 ± 0,65	174,3 ± 3,1	409,4 ± 20,2
F	3,97 ± 0,71	195,9 ± 3,5	447,5 ± 21,2
G	2,44 ± 0,51	220,5 ± 8,0	382,9 ± 19,6
H	1,73 ± 0,40	55,6 ± 2,2	159,1 ± 12,6
I	2,02 ± 0,45	53,6 ± 2,1	124,8 ± 11,2
J	14,5 ± 1,5	1421 ± 93	3190 ± 56
K	13,1 ± 1,4	2006 ± 131	2793 ± 53
L	6,55 ± 0,94	931 ± 63	1289 ± 36
M	7,59 ± 1,00	1725 ± 117	1967 ± 44
N	14,7 ± 1,5	35,0 ± 2,4	100 ± 10
O	28,8 ± 2,1	30,1 ± 0,4	507 ± 23
P	21,3 ± 1,8	17,7 ± 0,2	54,7 ± 7,4
Q	11,7 ± 1,3	17,2 ± 0,2	64,7 ± 8,0
R	16,7 ± 1,6	6,2 ± 0,1	30,4 ± 5,5
S	4,52 ± 0,73	185 ± 3	639,6 ± 25,3
T	11,7 ± 1,3	16,1 ± 0,2	17,6 ± 4,2
U	3,56 ± 0,64	5,01 ± 0,08	18,0 ± 4,2
V	13,9 ± 1,4	23,4 ± 0,3	150 ± 12
W	7,9 ± 1,0	137 ± 3	174 ± 13
X	7,62 ± 1,01	0,55 ± 0,01	0,74 ± 0,86
Y	12,8 ± 1,3	9,58 ± 0,15	5,7 ± 2,4
Z	5,46 ± 0,82	12,8 ± 0,3	4,7 ± 2,2
AA	1,46 ± 0,36	18,2 ± 0,4	184 ± 14
AB	1,88 ± 0,43	60,6 ± 2,4	170 ± 13
AC	3,23 ± 0,59	21,9 ± 0,4	162 ± 13
AD	62,6 ± 3,2	691 ± 19	1366 ± 37

## Verwendetes Macro zur alpha-Track Analyse für das Programm ImageJ

```
macro "Automated-Hole-Analysis-Alpha-Tracking" {
inputFolder=getDirectory("C:\Users\Aaron_Uni\Desktop\Alpha-Track-Auswertung");
outputFolder=getDirectory("C:\Users\Aaron_Uni\Desktop\Alpha-Track-Macroauswertung");
list=getFileList(inputFolder);
setBatchMode(true);
for(i=0; i<list.length; i++) {
path=inputFolder+list[i];
if(endsWith(path, ".tif")) open(path);
showProgress(i, list.length);
if(nImages>=1) {
if(i==0) {
}
run("8-bit");
setAutoThreshold("Default");
run("Threshold...");
setThreshold(1, 82);
setOption("BlackBackground", false);
run("Convert to Mask");
run("Close");
run("Analyze Particles...", "size=16-256 circularity=0.50-1.00 show=Outlines clear include summarize add");
}
}
selectWindow("Summary");
outputPath=outputFolder+"Summary_ProbeXXX";
fileExtension=lastIndexOf(outputPath, ".");
if(fileExtension!=-1) outputPath=substring(outputPath, 0, fileExtension);
saveAs("Hole-Measurements", outputPath+".csv");
run("Close");
close();
setBatchMode(false);
}
```

**Sehr gut auswertbare Proben**

**C**



Abbildung 44: Foto Pechblende der Probe C

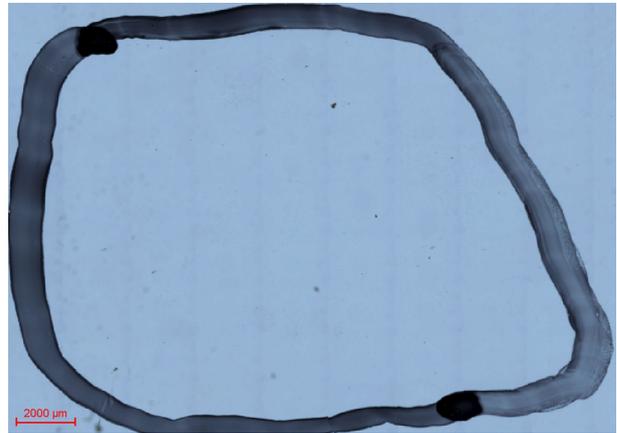


Abbildung 45: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe C

Tabelle 12: alpha-Track Auswertung Probe C

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
2,14 ± 0,46	60	1,60 ± 0,04	0,75 ± 0,16

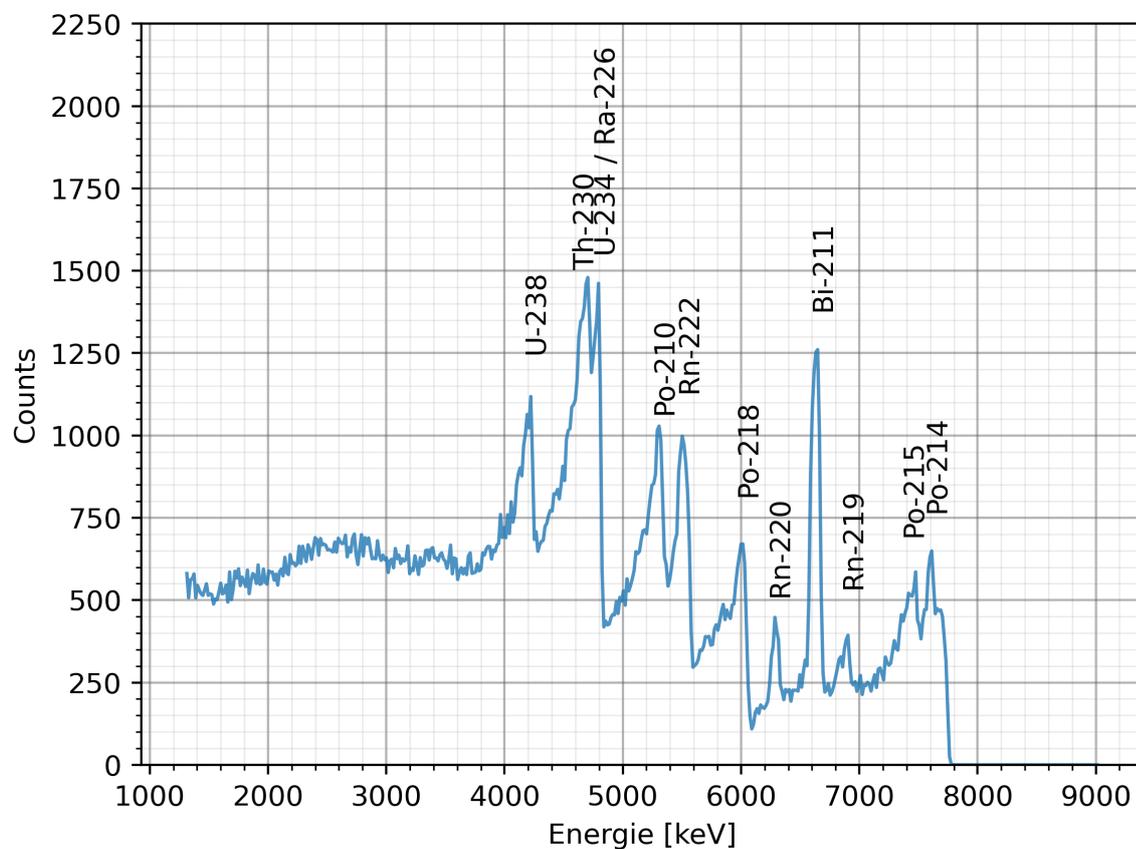


Abbildung 46: Spektrum der Probe C, 77 547 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 13: GIK Auswertung Probe C

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4228	4700	4795	5307	5506	6010	6641	6897	7464	7608
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	30	13	20	3	17	8	18	78	78	-79

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe C  $(10,8 \pm 3,3)$  cps.

**E**



Abbildung 47: Foto Pechblende der Probe E

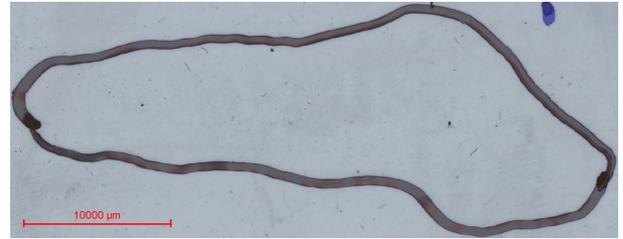


Abbildung 48: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe E

Tabelle 14: alpha-Track Auswertung Probe E

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
3,60 ± 0,65	5	174,3 ± 3,1	48,4 ± 8,8

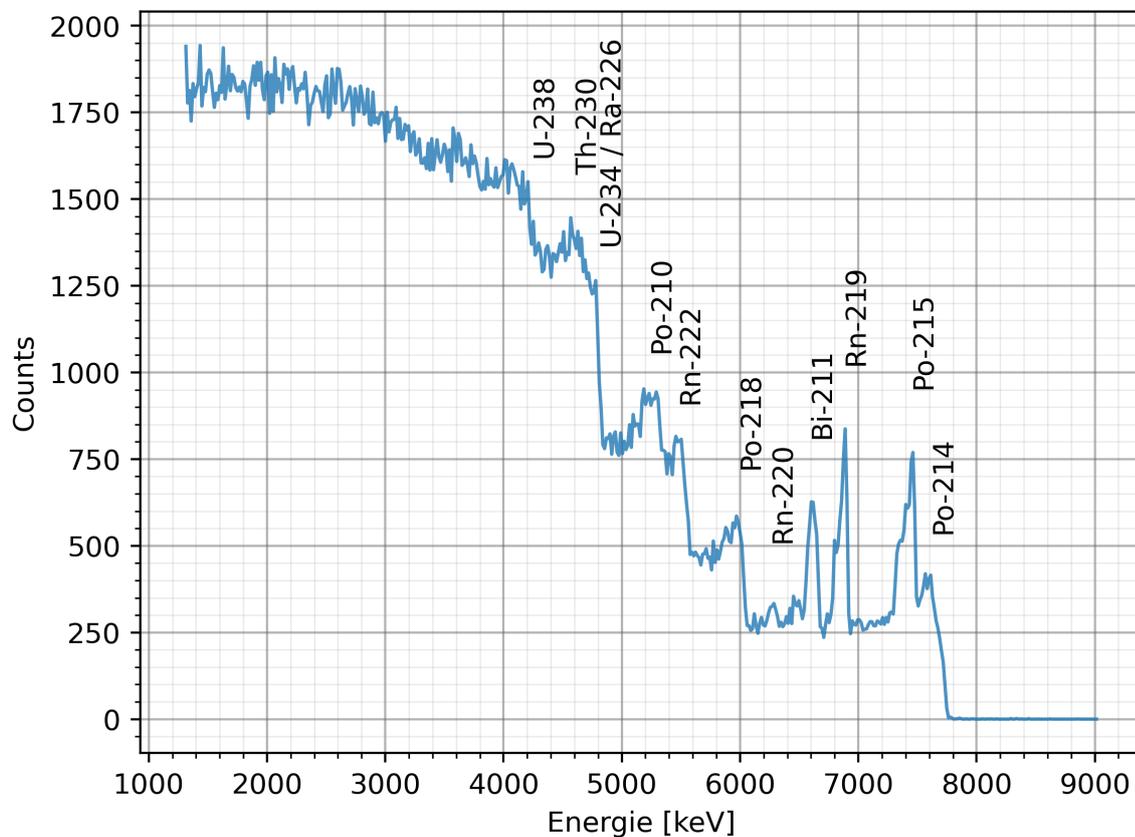


Abbildung 49: Spektrum der Probe E, 3940 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 15: GIK Auswertung Probe E

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4204	4652	4779	5291	5506	6002	6609	6881	7448	7624
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	6	-35	4	-13	17	0	-14	62	62	-63

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe E ( $409,4 \pm 20,2$ ) cps.

**F**



Abbildung 50: Foto Pechblende der Probe F

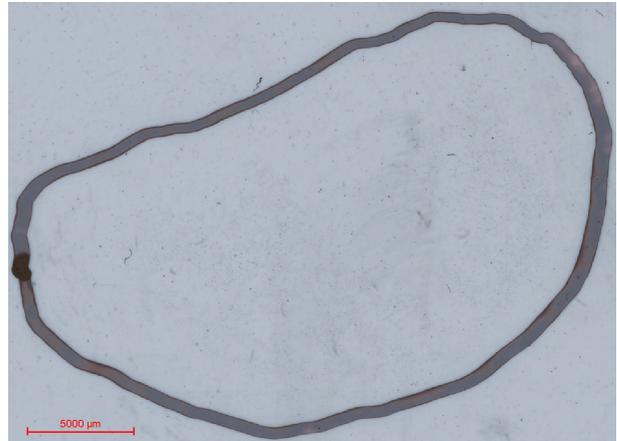


Abbildung 51: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe F

Tabelle 16: alpha-Track Auswertung Probe F

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
3,97 ± 0,71	5	195,9 ± 3,5	49,3 ± 8,8

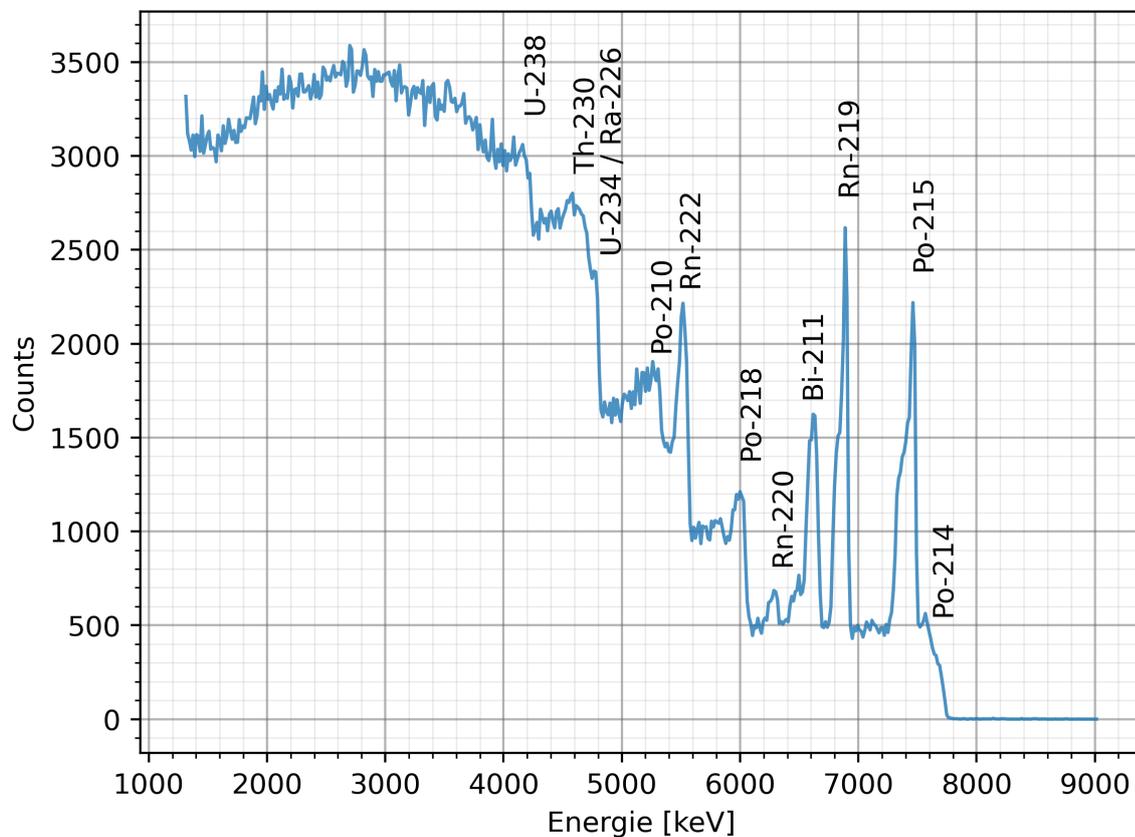


Abbildung 52: Spektrum der Probe F, 7000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 17: GIK Auswertung Probe F

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4188	4636	4779	5267	5522	6010	6625	6881	7472	7624
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-10	-51	4	-37	33	8	2	62	86	-63

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe F ( $447,5 \pm 21,2$ ) cps.

**G**



Abbildung 53: Foto Pechblende der Probe G

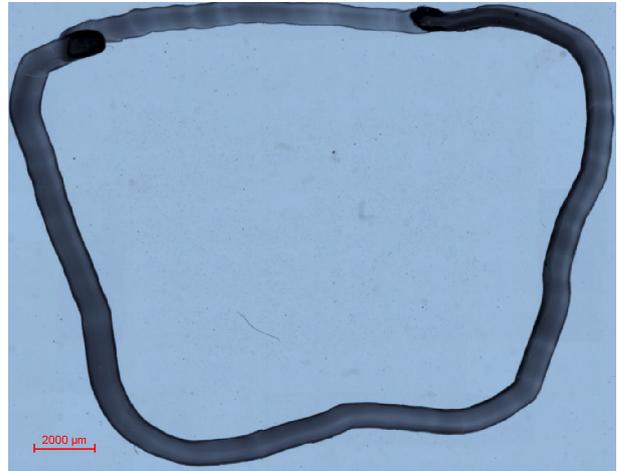


Abbildung 54: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe G

Tabelle 18: alpha-Track Auswertung Probe G

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
2,44 ± 0,51	2	220,5 ± 8,0	90,5 ± 19,2

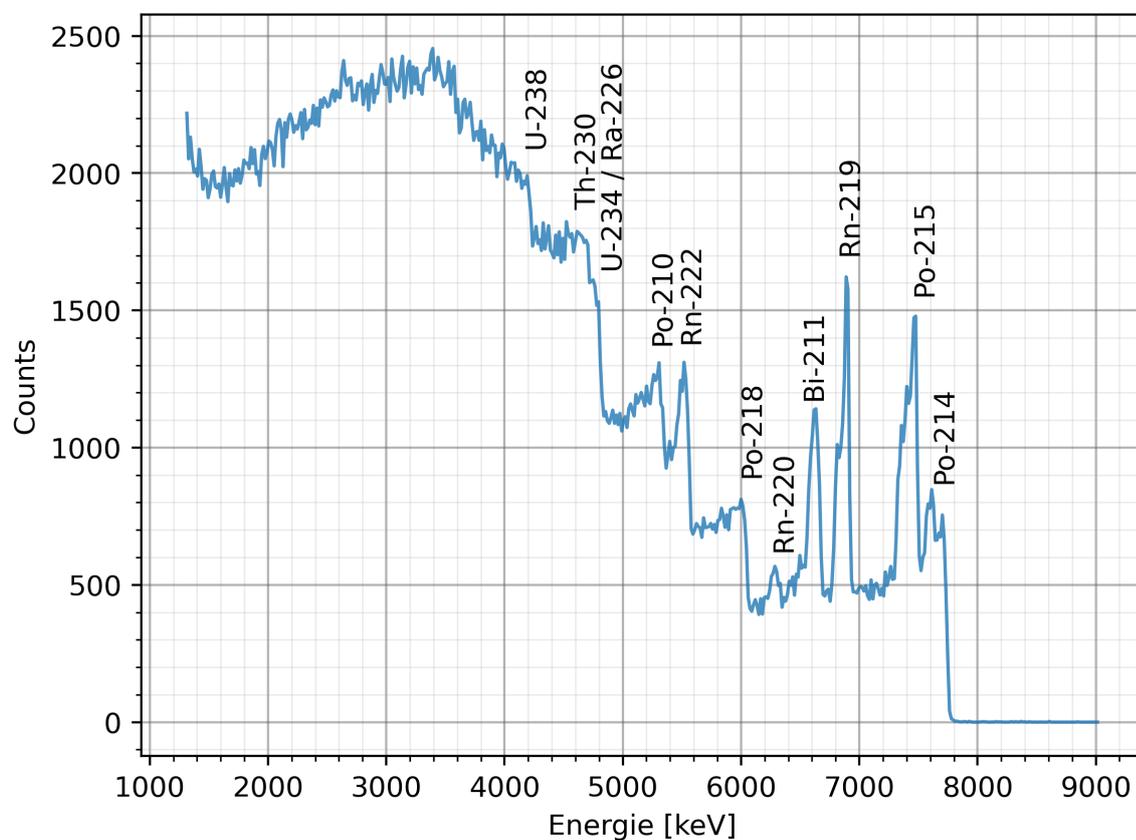


Abbildung 55: Spektrum der Probe G, 5614 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 19: GIK Auswertung Probe G

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4196	4692	4803	5307	5530	6010	6625	6897	7496	7632
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-2	5	28	3	41	8	2	78	110	-55

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe G  $(382,9 \pm 19,6)$  cps.

**H**



Abbildung 56: Foto Pechblende der Probe H

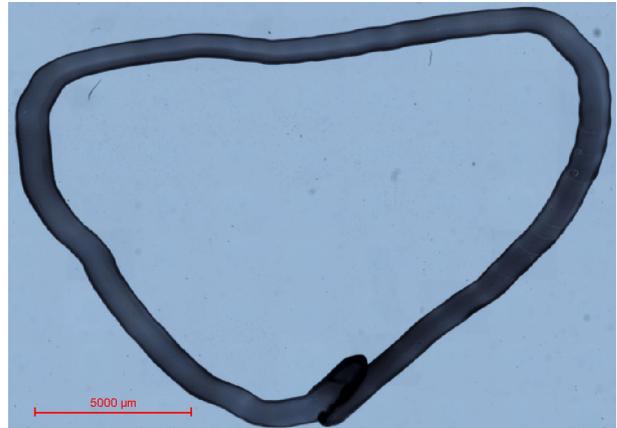


Abbildung 57: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe H

Tabelle 20: alpha-Track Auswertung Probe H

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
1,73 ± 0,40	2	55,6 ± 2,2	32,2 ± 7,6

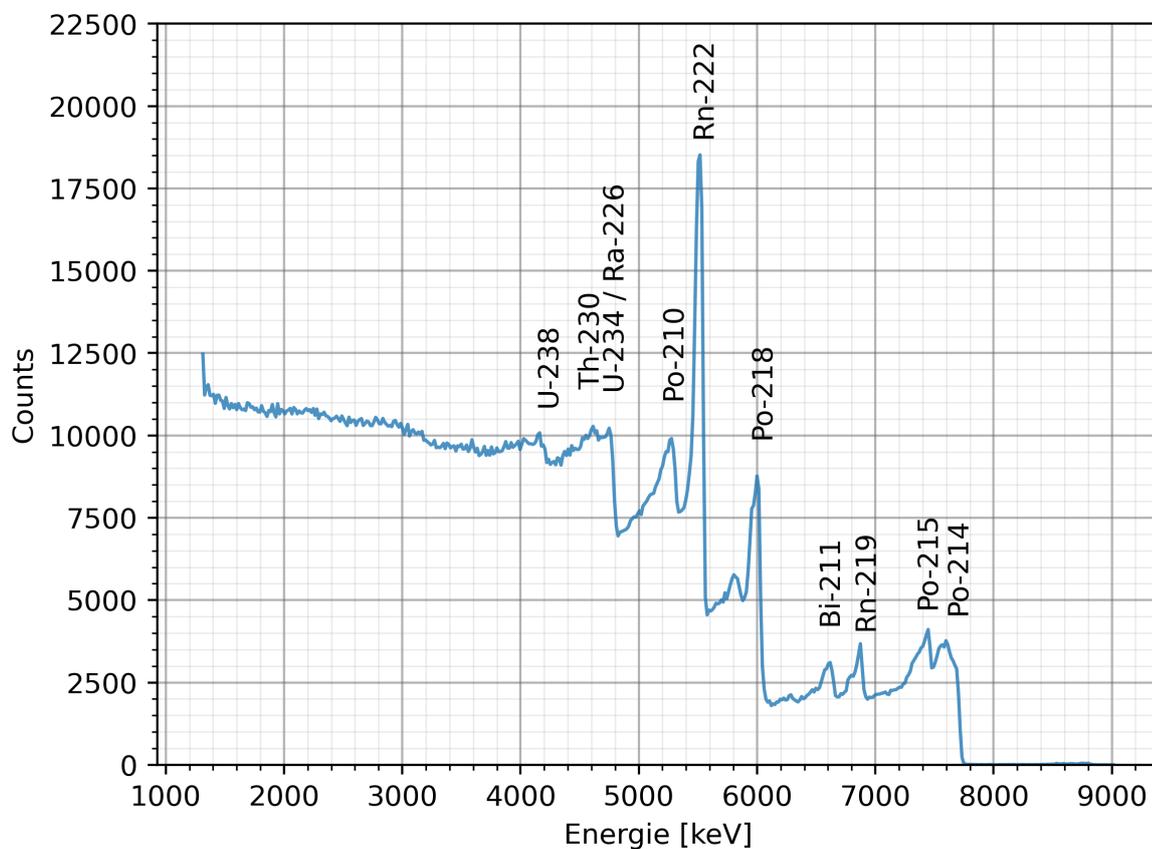


Abbildung 58: Spektrum der Probe H, 68 822 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 21: GIK Auswertung Probe H

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4156	4644	4779	5275	5514	6010	6617	6881	7456	7624
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-42	-43	4	-29	25	8	-6	62	70	-63

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe H  $(159,1 \pm 12,6)$  cps.

I



Abbildung 59: Foto Pechblende der Probe I



Abbildung 60: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe I

Tabelle 22: alpha-Track Auswertung Probe I

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
2,02 ± 0,45	2	53,6 ± 2,1	26,6 ± 6,0

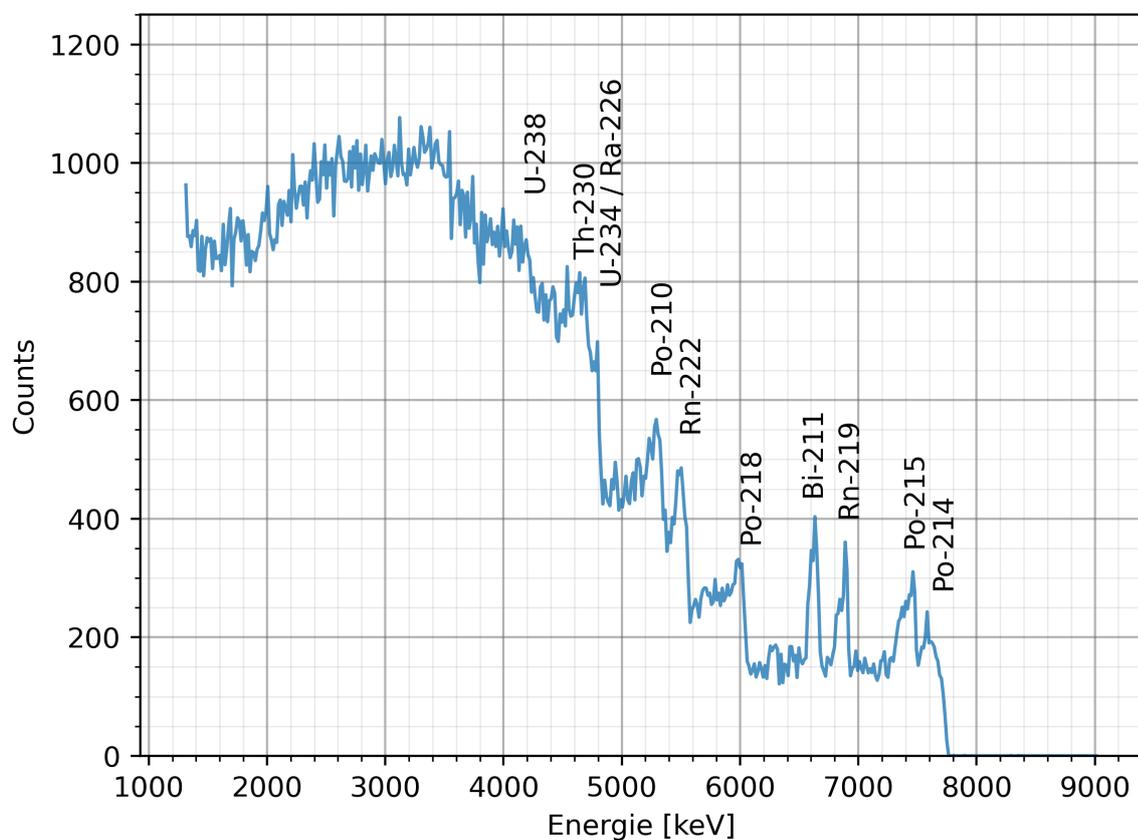


Abbildung 61: Spektrum der Probe I, 7000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 23: GIK Auswertung Probe I

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4156	4644	4795	5291	5506	6002	6625	6897	7472	7640
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-42	-43	20	-13	17	0	2	78	86	-47

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe I ( $124,8 \pm 11,2$ ) cps.

J



Abbildung 62: Foto Pechblende der Probe J

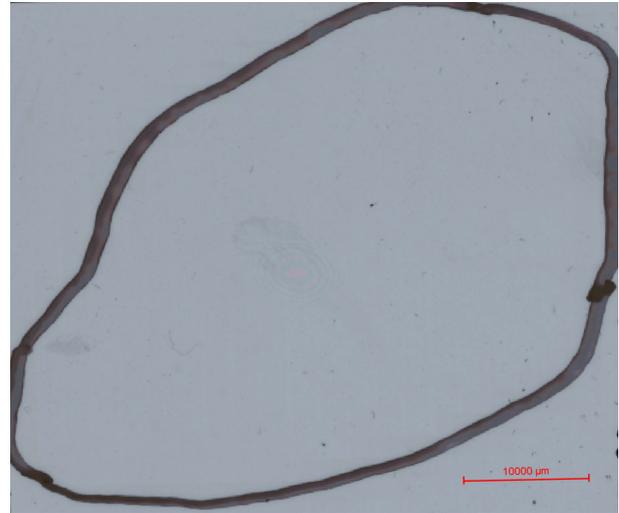


Abbildung 63: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe J

Tabelle 24: alpha-Track Auswertung Probe J

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
14,5 ± 1,5	1,03	1421 ± 93	97,8 ± 11,9

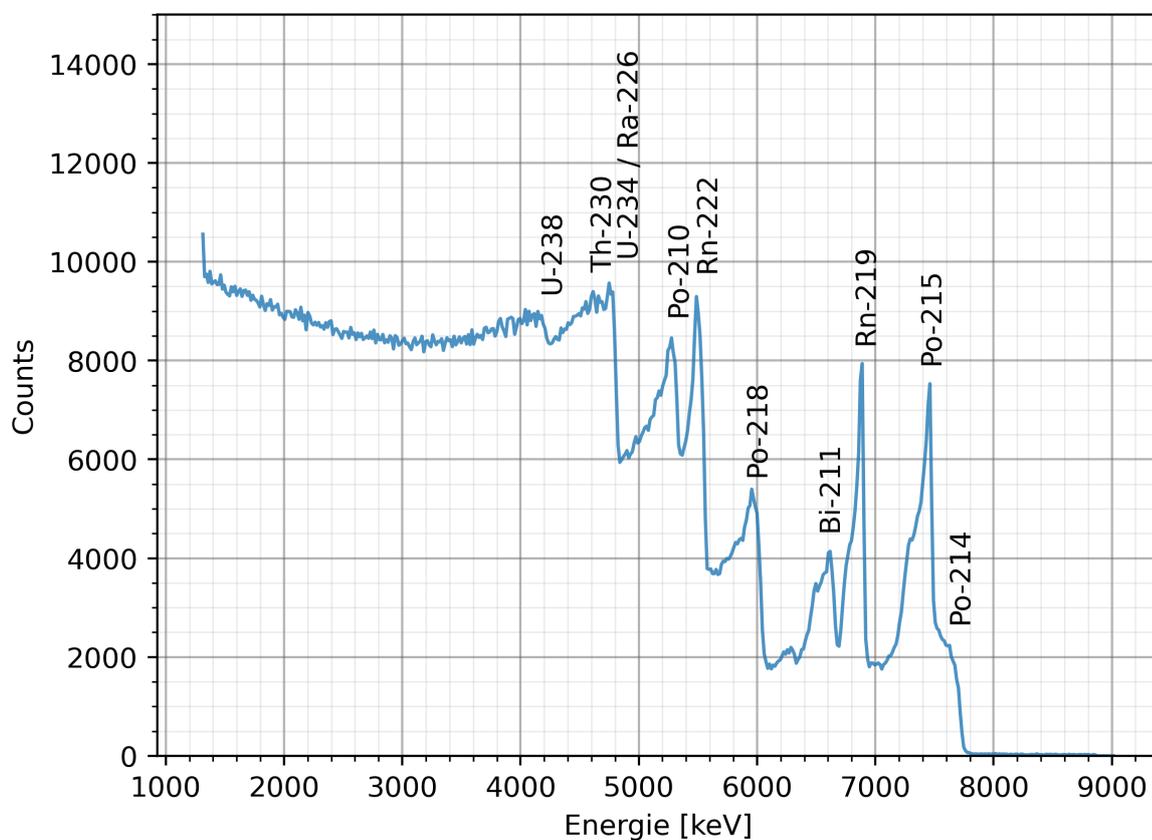


Abbildung 64: Spektrum der Probe J, 3000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 25: GIK Auswertung Probe J

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4172	4628	4771	5299	5490	5954	6617	6897	7456	7624
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-26	-59	-4	-5	1	-48	-6	78	70	-63

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe J ( $3190 \pm 56$ ) cps.

K



Abbildung 65: Foto Pechblende der Probe K

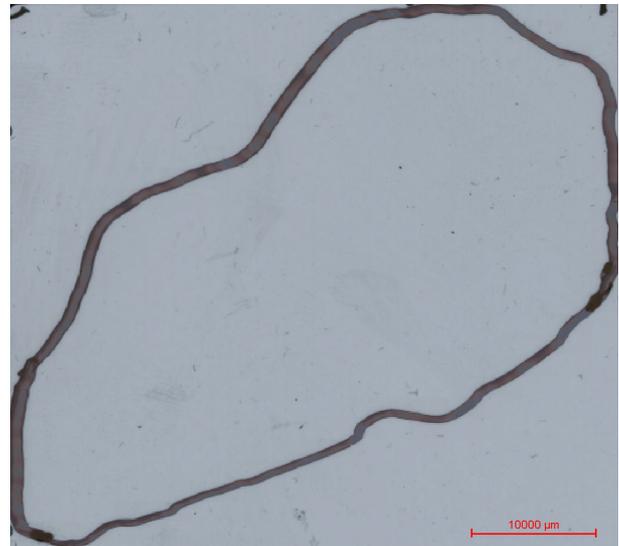


Abbildung 66: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe K

Tabelle 26: alpha-Track Auswertung Probe K

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
13,1 ± 1,4	1,03	2006 ± 131	154 ± 19

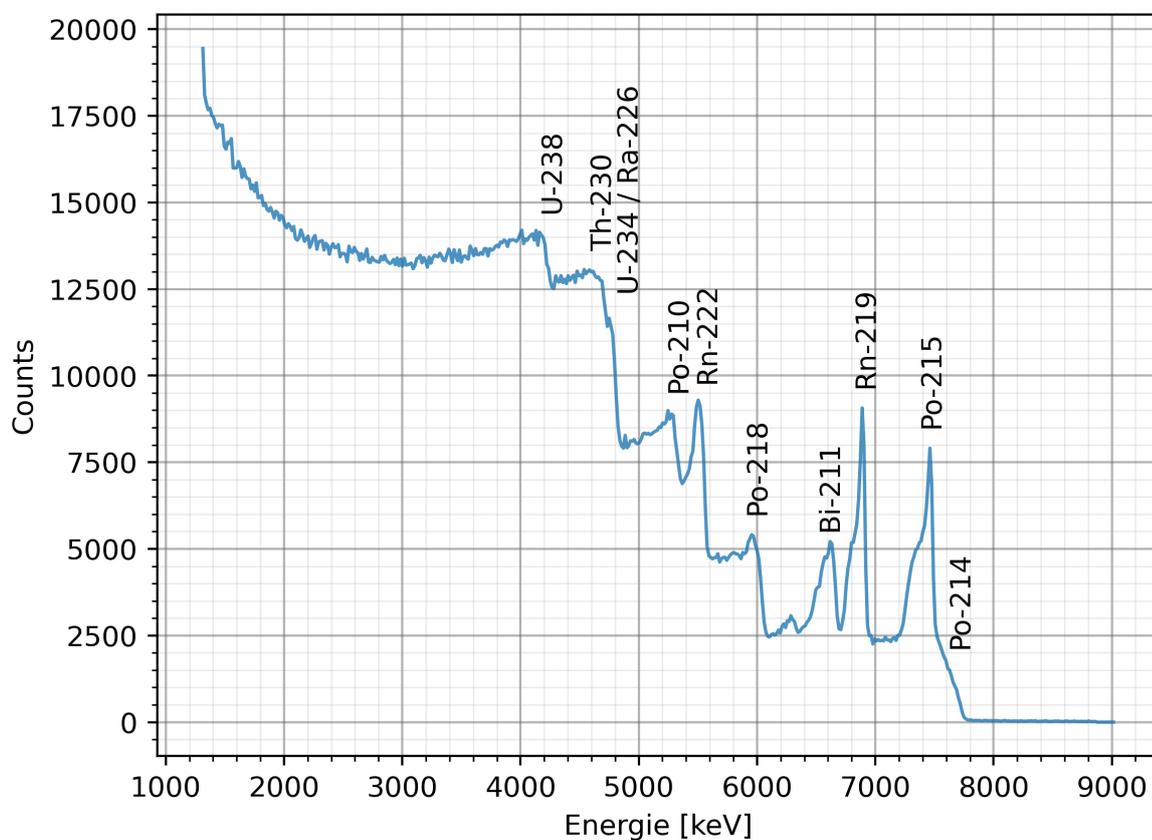


Abbildung 67: Spektrum der Probe K, 5000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 27: GIK Auswertung Probe K

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4196	4628	4763	5275	5514	5962	6625	6897	7464	7640
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-2	-59	-12	-29	25	-40	2	78	78	-47

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe K ( $2793 \pm 53$ ) cps.

L



Abbildung 68: Foto Pechblende der Probe L

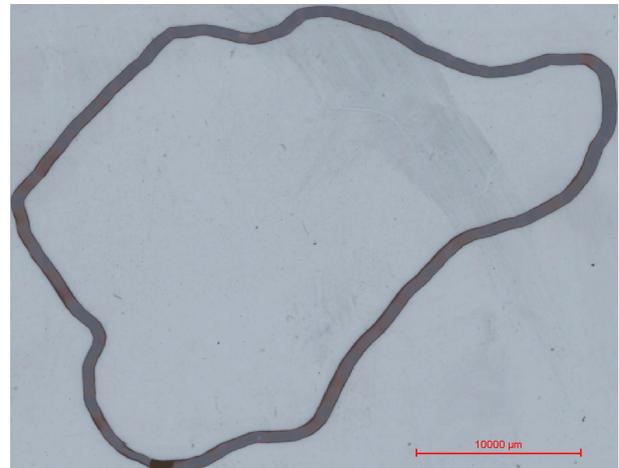


Abbildung 69: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe L

Tabelle 28: alpha-Track Auswertung Probe L

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
6,55 ± 0,94	1	931 ± 63	142 ± 23

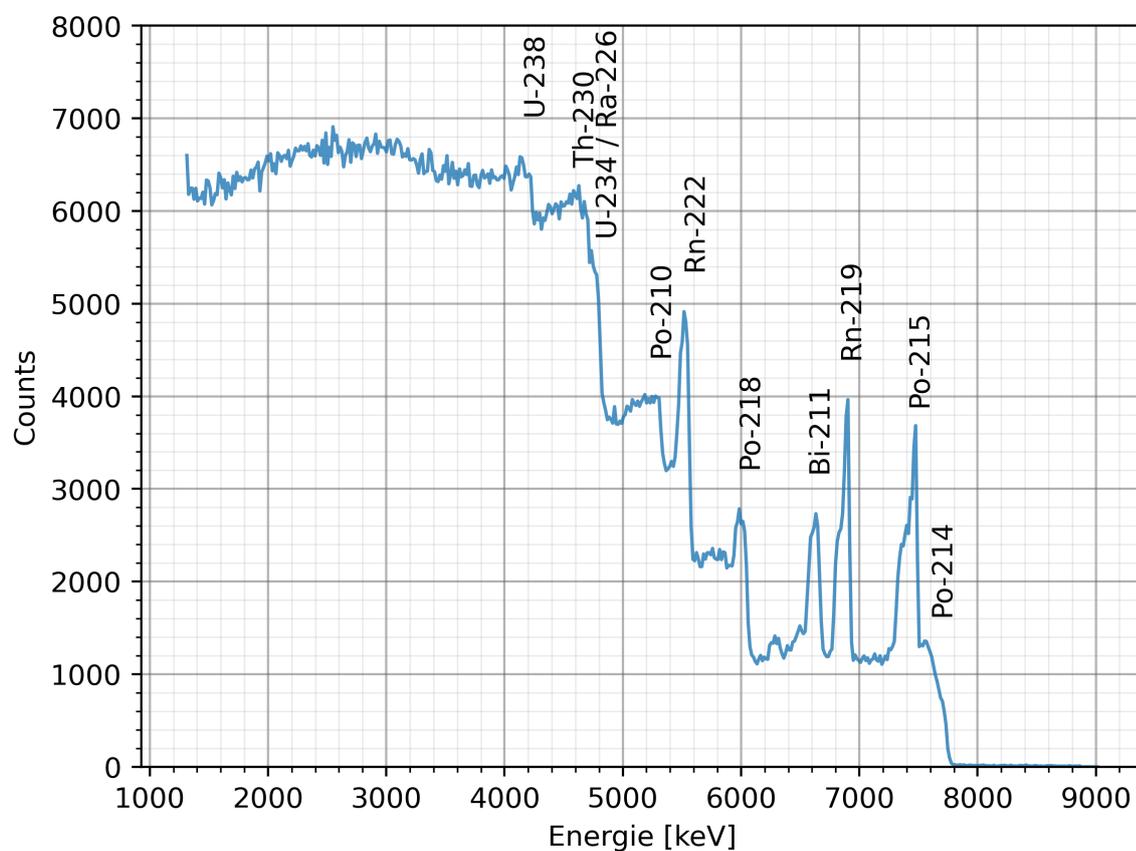


Abbildung 70: Spektrum der Probe L, 3000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 29: GIK Auswertung Probe L

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4148	4644	4755	5307	5546	6002	6649	6905	7480	7632
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-50	-43	-20	3	57	0	26	86	94	-55

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe L ( $1289 \pm 36$ ) cps.

N



Abbildung 71: Foto Pechblende der Probe N

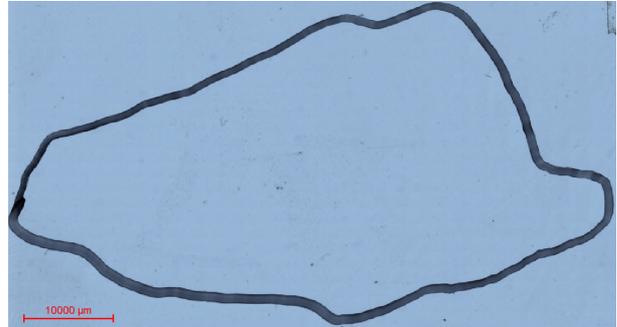


Abbildung 72: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe N

Tabelle 30: alpha-Track Auswertung Probe N

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
14,7 ± 1,5	10	35,0 ± 2,4	2,4 ± 0,2

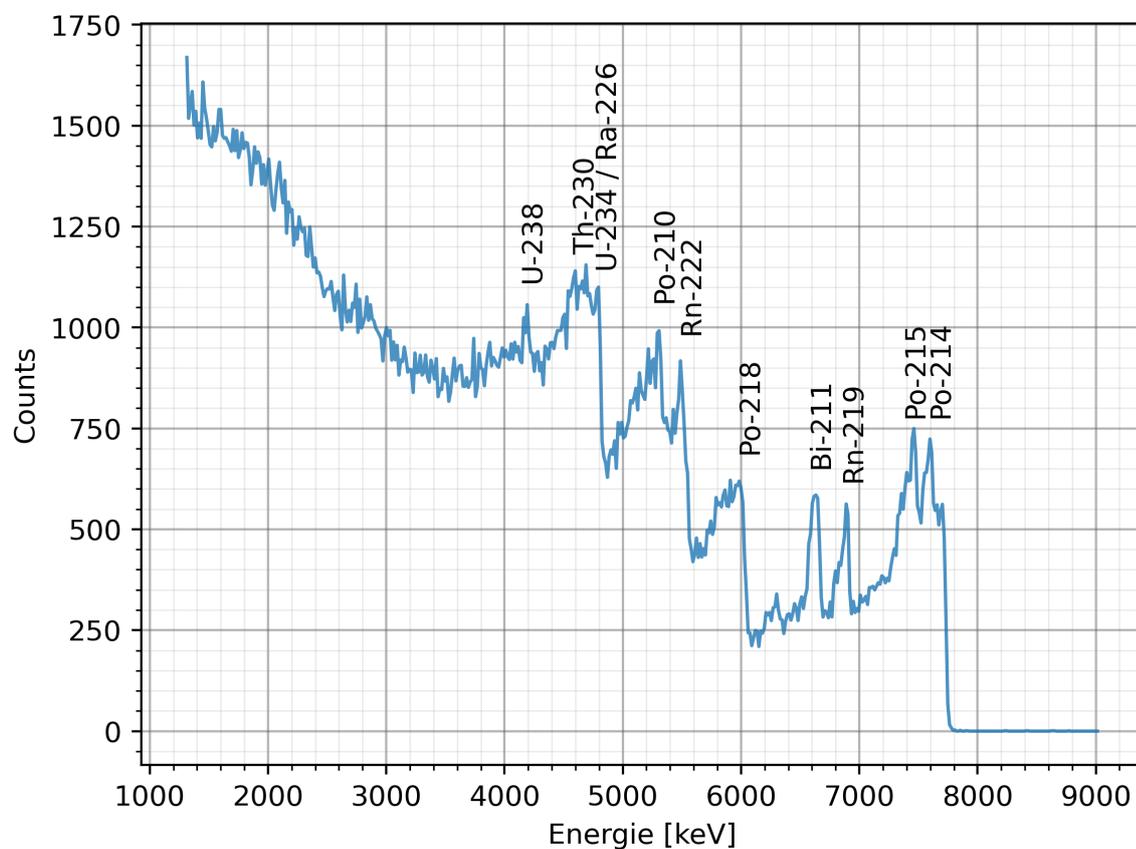


Abbildung 73: Spektrum der Probe N, 12 000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 31: GIK Auswertung Probe N

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4196	4708	4795	5299	5506	5986	6641	6905	7464	7688
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-2	21	20	-5	17	-16	18	86	78	1

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe N ( $100 \pm 10$ ) cps.

O



Abbildung 74: Foto Pechblende der Probe O

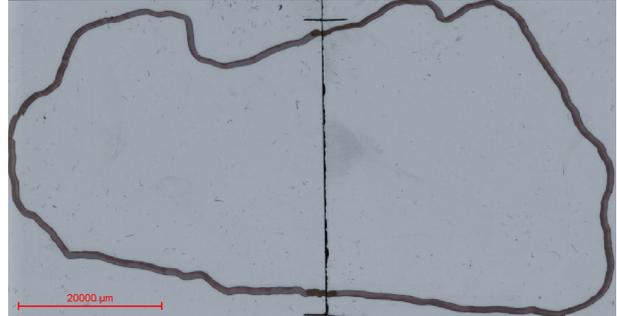


Abbildung 75: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe O

Tabelle 32: alpha-Track Auswertung Probe O

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
28,8 ± 2,1	25	30,1 ± 0,4	1,05 ± 0,08

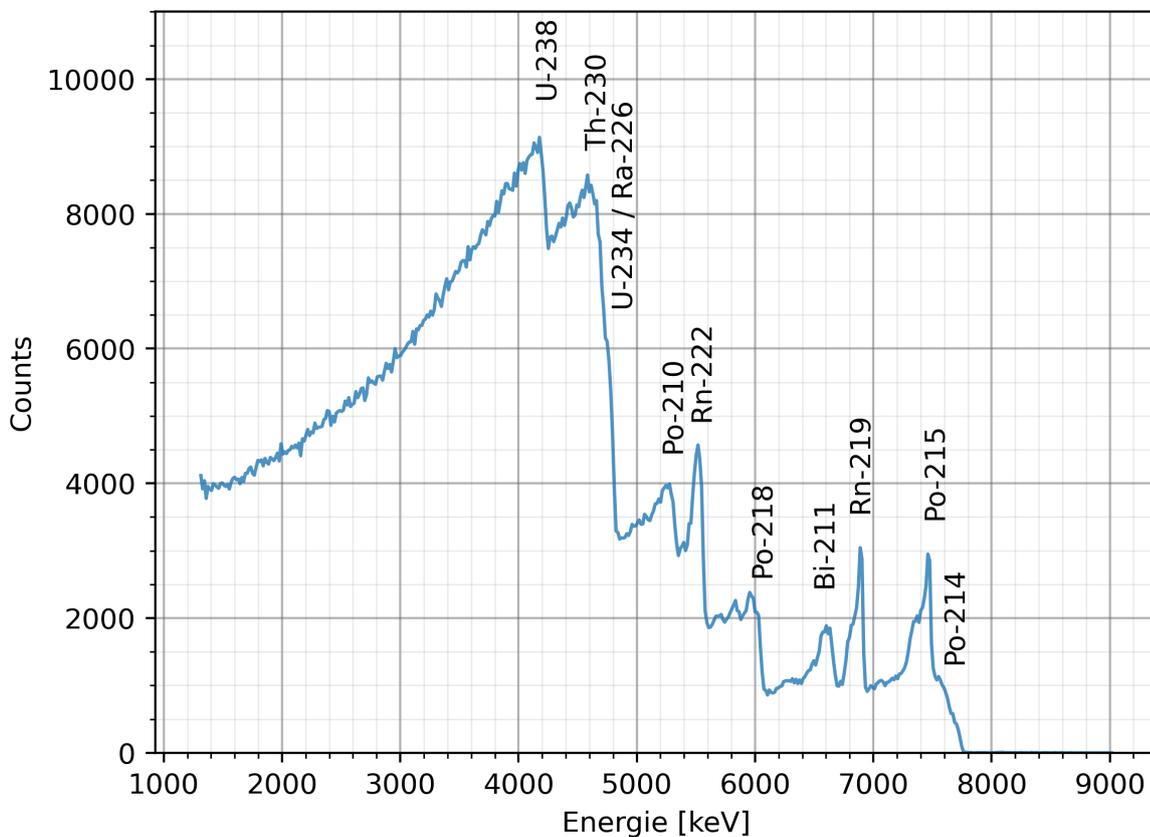


Abbildung 76: Spektrum der Probe O, 12 000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2

Tabelle 33: GIK Auswertung Probe O

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4180	4596	4755	5259	5522	5986	6617	6897	7480	7592
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-18	-91	-20	-45	33	-16	-6	78	94	-95

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe O ( $507 \pm 23$ ) cps.

**P**



Abbildung 77: Foto Pechblende der Probe P

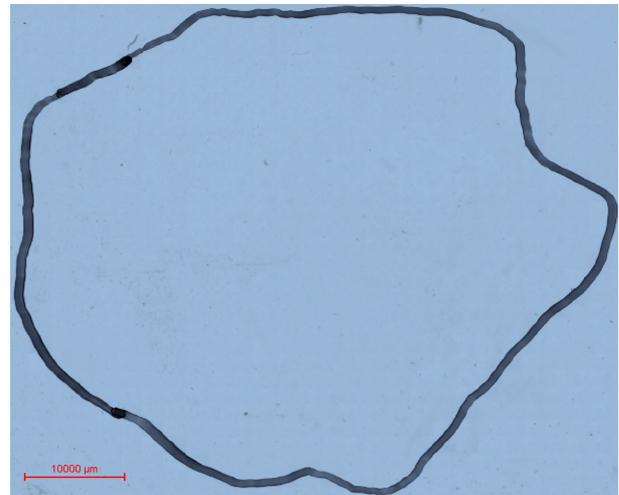


Abbildung 78: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe P

Tabelle 34: alpha-Track Auswertung Probe P

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
21,3 ± 1,8	40	17,7 ± 0,2	0,83 ± 0,07

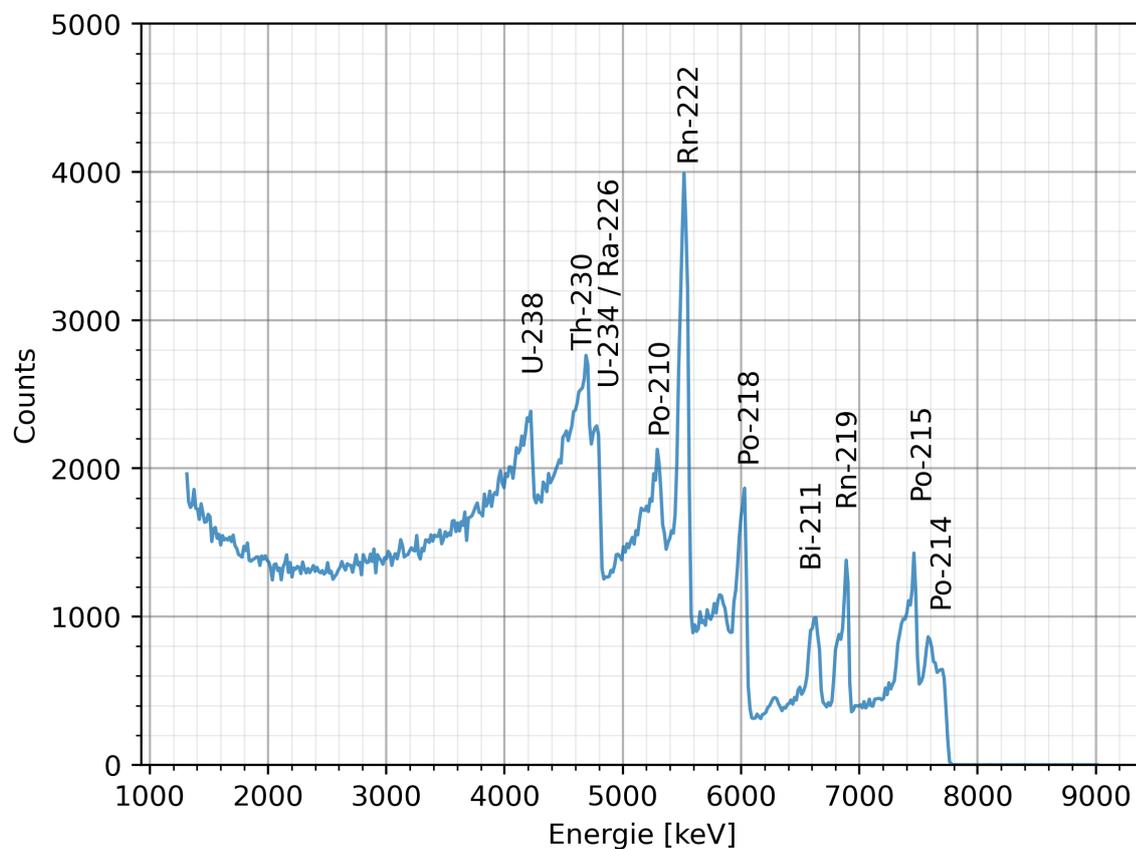


Abbildung 79: Spektrum der Probe P, 35 000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2

Tabelle 35: GIK Auswertung Probe P

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4228	4700	4771	5299	5506	6018	6617	6889	7464	7664
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	30	13	-4	-5	17	16	-6	70	78	-23

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe P ( $54,7 \pm 7,4$ ) cps.

V



Abbildung 80: Foto Pechblende der Probe V

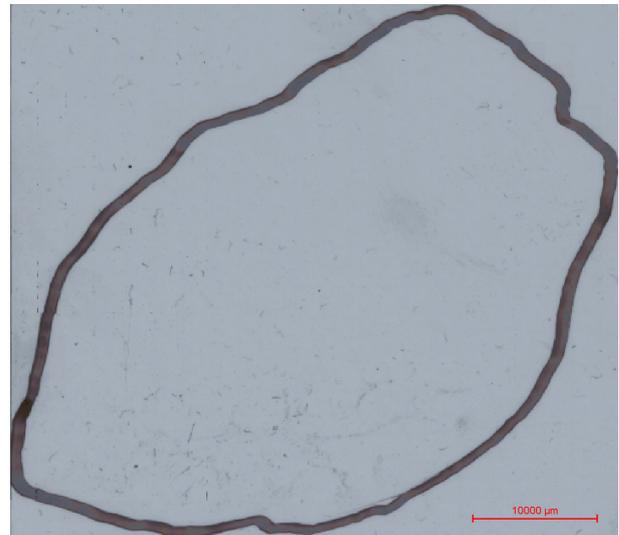


Abbildung 81: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe V

Tabelle 36: alpha-Track Auswertung Probe V

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
13,9 ± 1,4	30	23,4 ± 0,3	1,68 ± 0,17

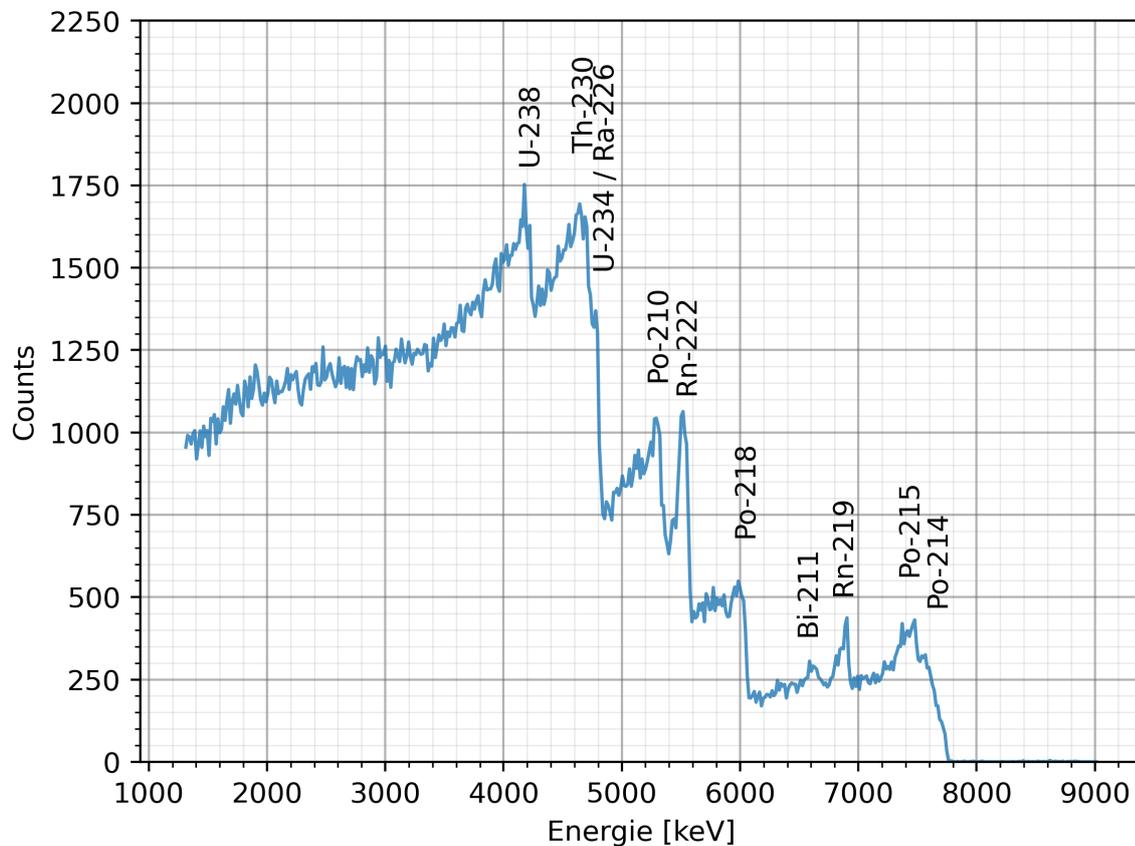


Abbildung 82: Spektrum der Probe V, 8529s Messzeit, Energiekalibrierung EK2

Tabelle 37: GIK Auswertung Probe V

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4164	4644	4779	5291	5514	6010	6633	6897	7368	7584
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-34	-43	4	-13	25	8	10	78	-18	-103

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe V ( $150 \pm 12$ ) cps.

**AA**



Abbildung 83: Foto Pechblende der Probe AA

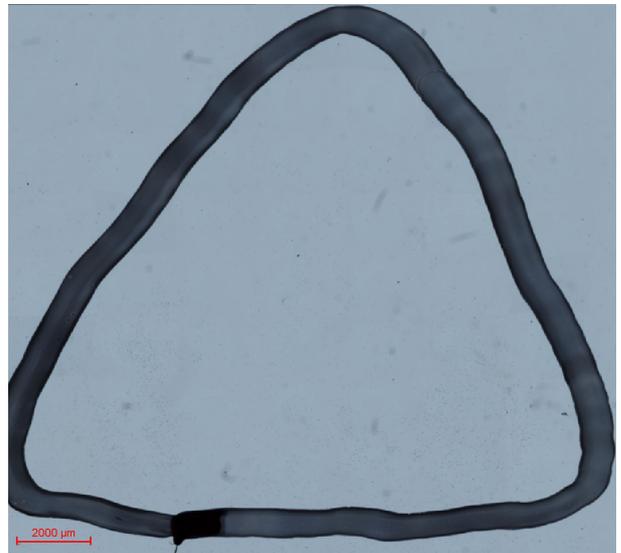


Abbildung 84: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe AA

Tabelle 38: alpha-Track Auswertung Probe AA

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
1,46 ± 0,36	10	18,2 ± 0,4	12,5 ± 3,1

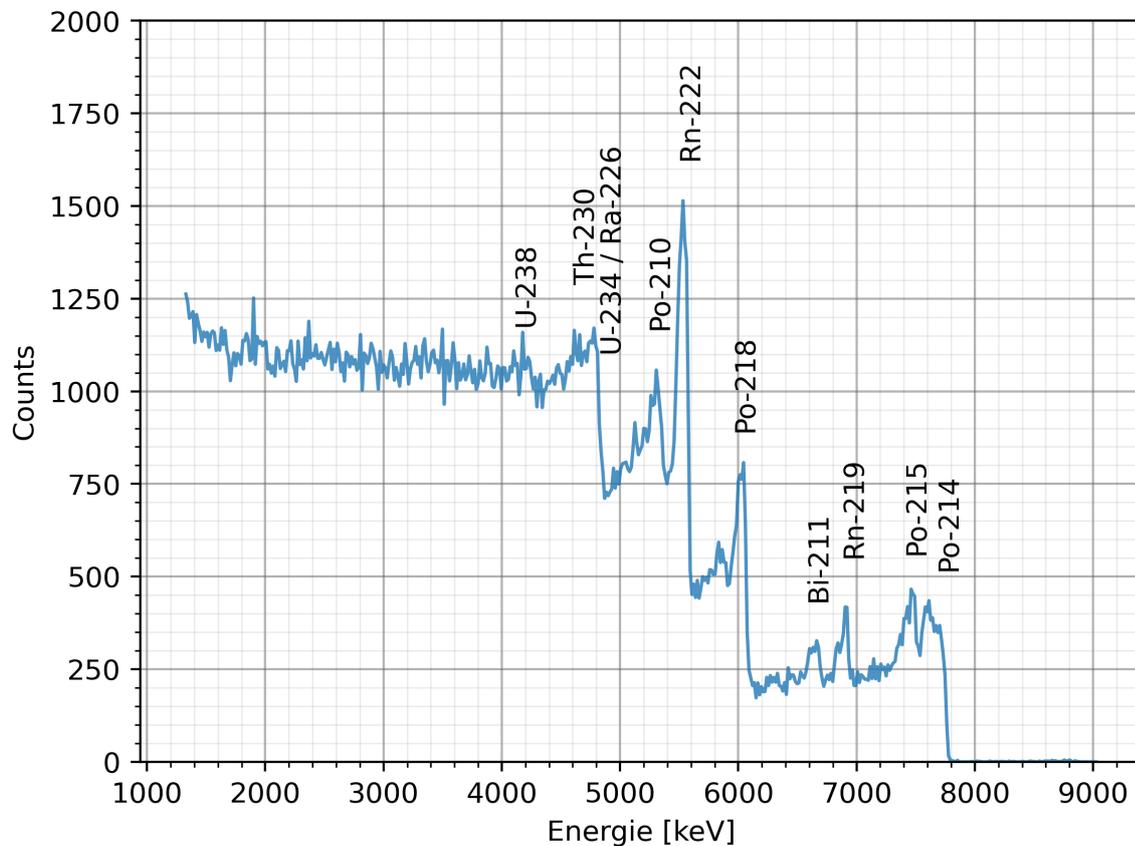


Abbildung 85: Spektrum der Probe AA, 6283s Messzeit, Energiekalibrierung EK2

Tabelle 39: GIK Auswertung Probe AA

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4179	4659	4787	5306	5530	6033	6640	6904	7471	7687
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-19	-28	12	2	41	31	17	85	85	0

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe AA ( $184 \pm 14$ ) cps.

**Gut auswertbare Proben**

**W**



Abbildung 86: Foto Pechblende der Probe W

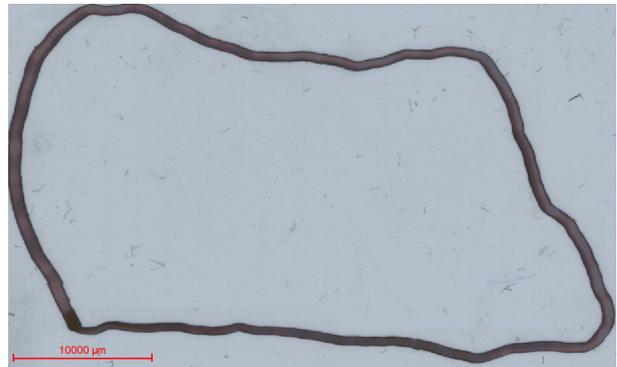


Abbildung 87: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe W

Tabelle 40: alpha-Track Auswertung Probe W

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
7,9 ± 1,0	5	137 ± 3	17,4 ± 2,3

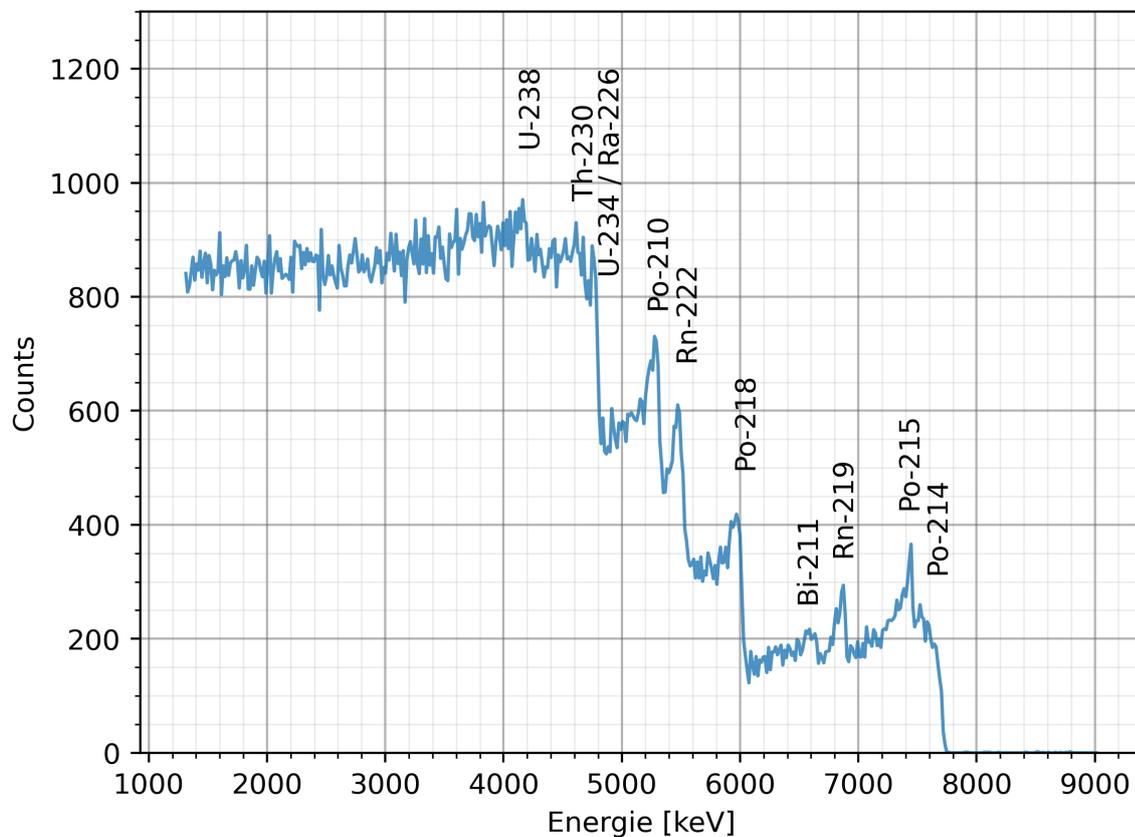


Abbildung 88: Spektrum der Probe W, 5028 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 41: GIK Auswertung Probe W

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4164	4620	4795	5283	5490	5986	6609	6865	7448	7640
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-34	-67	20	-21	1	-16	-14	46	62	-47

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe W ( $174 \pm 13$ ) cps.

X



Abbildung 89: Foto Pechblende der Probe X



Abbildung 90: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe X

Tabelle 42: alpha-Track Auswertung Probe X

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
7,62 ± 1,01	320	0,55 ± 0,01	0,07 ± 0,01

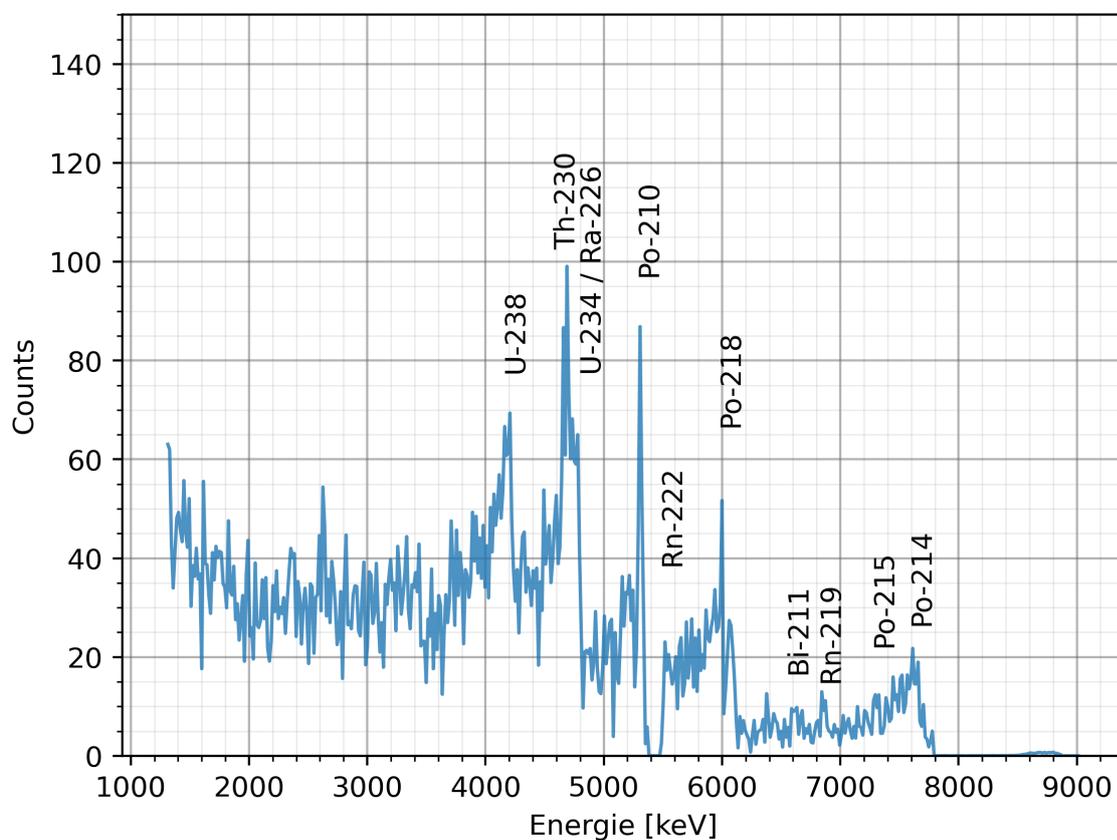


Abbildung 91: Spektrum der Probe X, 50 000s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 43: GIK Auswertung Probe X

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4204	4668	4771	5307	5514	6002	6601	6881	7440	7632
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	6	-19	-4	3	25	0	-22	62	54	-55

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe X  $(0,74 \pm 0,86)$  cps.

Y



Abbildung 92: Foto Pechblende der Probe Y

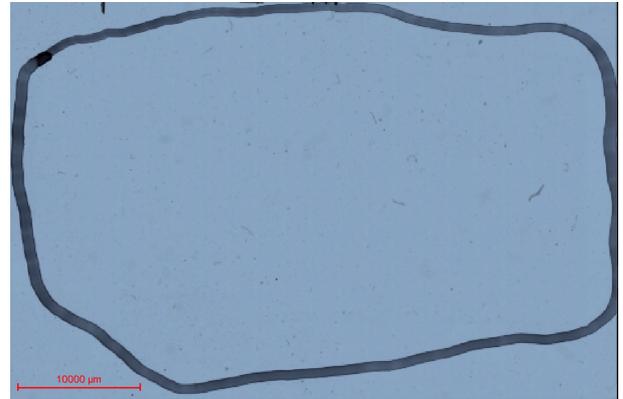


Abbildung 93: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe Y

Tabelle 44: alpha-Track Auswertung Probe Y

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
12,8 ± 1,3	30	9,58 ± 0,15	0,75 ± 0,08

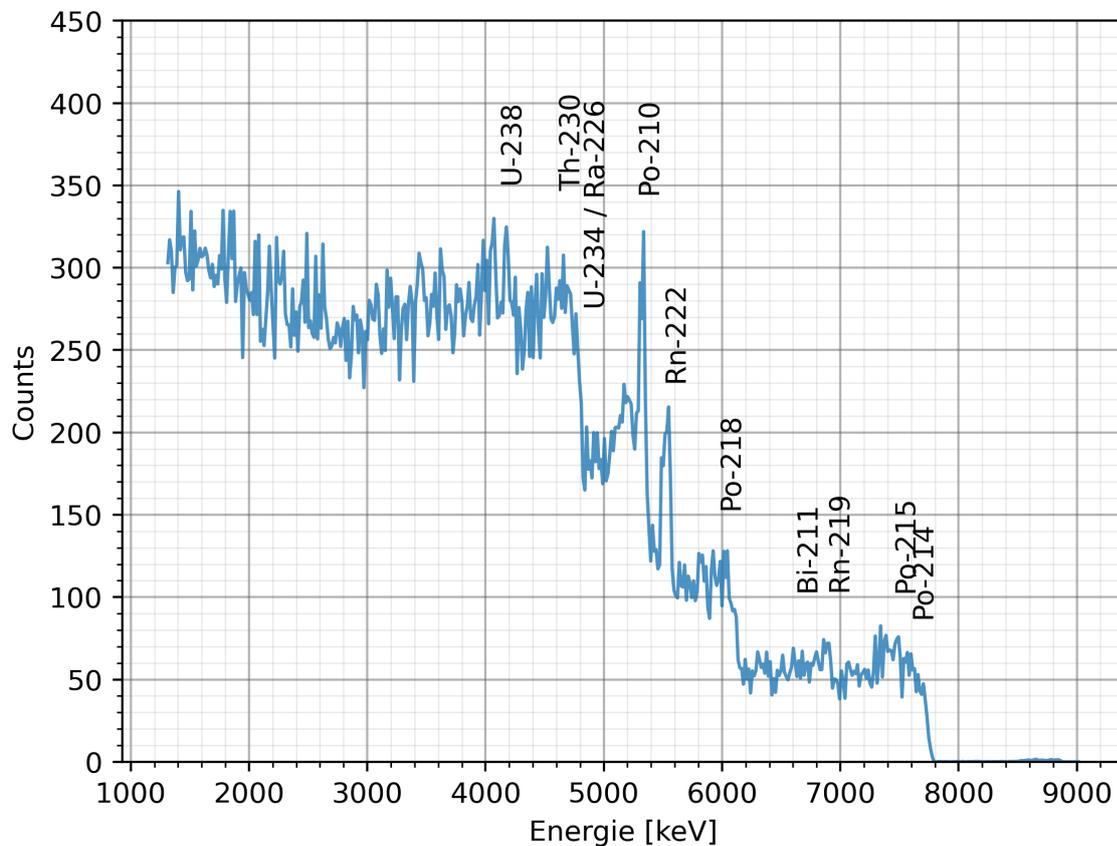


Abbildung 94: Spektrum der Probe Y, 50 006 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2

Tabelle 45: GIK Auswertung Probe Y

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4188	4668	4787	5347	5554	6026	6689	6913	7480	7672
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-10	-19	12	43	65	24	66	94	94	-15

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe Y ( $5,7 \pm 2,4$ ) cps.

**AB**



Abbildung 95: Foto Pechblende der Probe AB

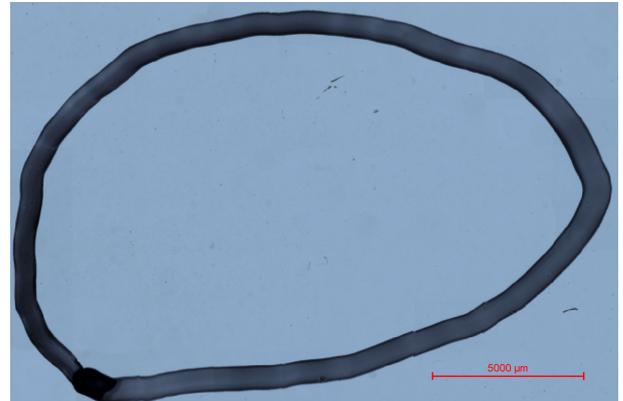


Abbildung 96: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe AB

Tabelle 46: alpha-Track Auswertung Probe AB

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
1,88 ± 0,43	2	60,6 ± 2,4	32,2 ± 7,5

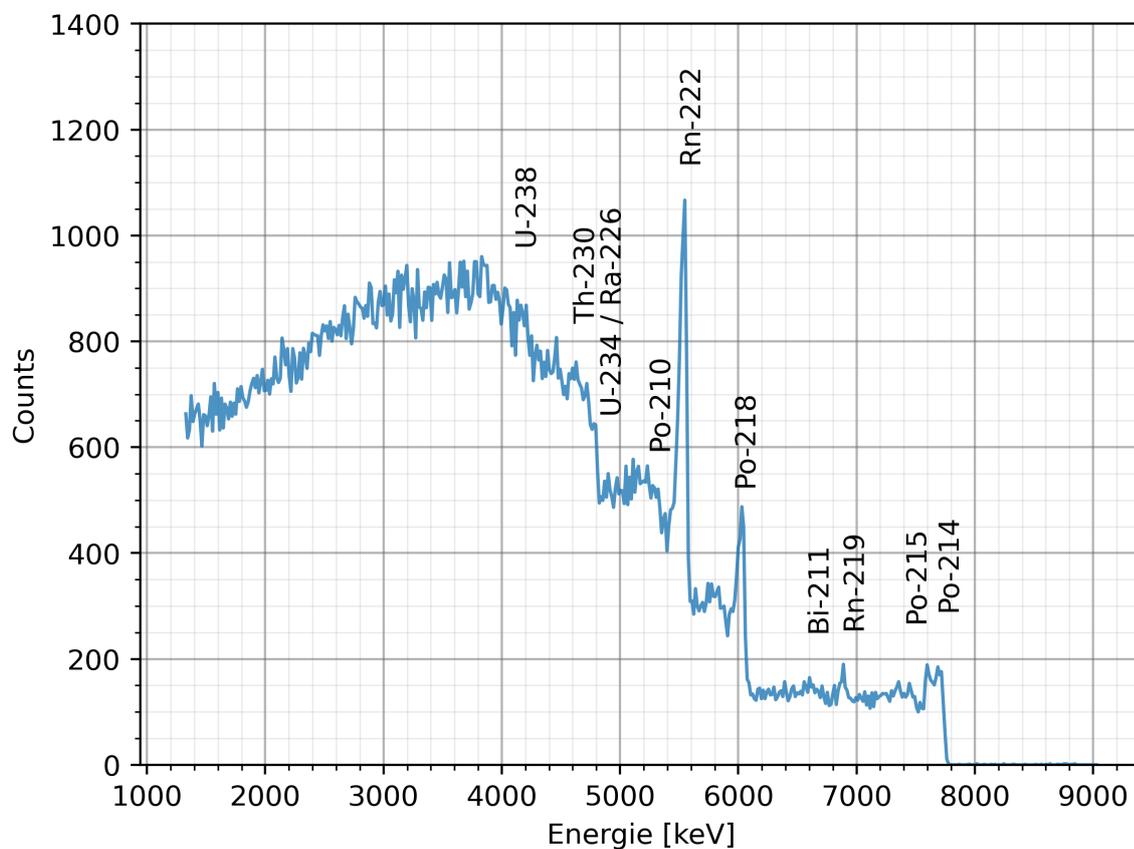


Abbildung 97: Spektrum der Probe AB, 4677 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 47: GIK Auswertung Probe AB

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4155	4635	4779	5306	5538	6025	6640	6888	7415	7695
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-43	-52	4	2	49	23	17	69	29	8

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe AB ( $170 \pm 13$ ) cps.

**AD**



Abbildung 98: Foto Pechblende der Probe AD

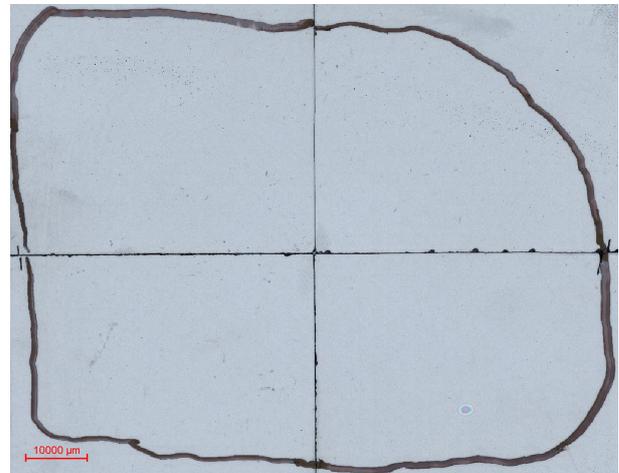


Abbildung 99: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe AD

Tabelle 48: alpha-Track Auswertung Probe AD

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
62,6 ± 3,2	2,67	691 ± 19	11,0 ± 0,6

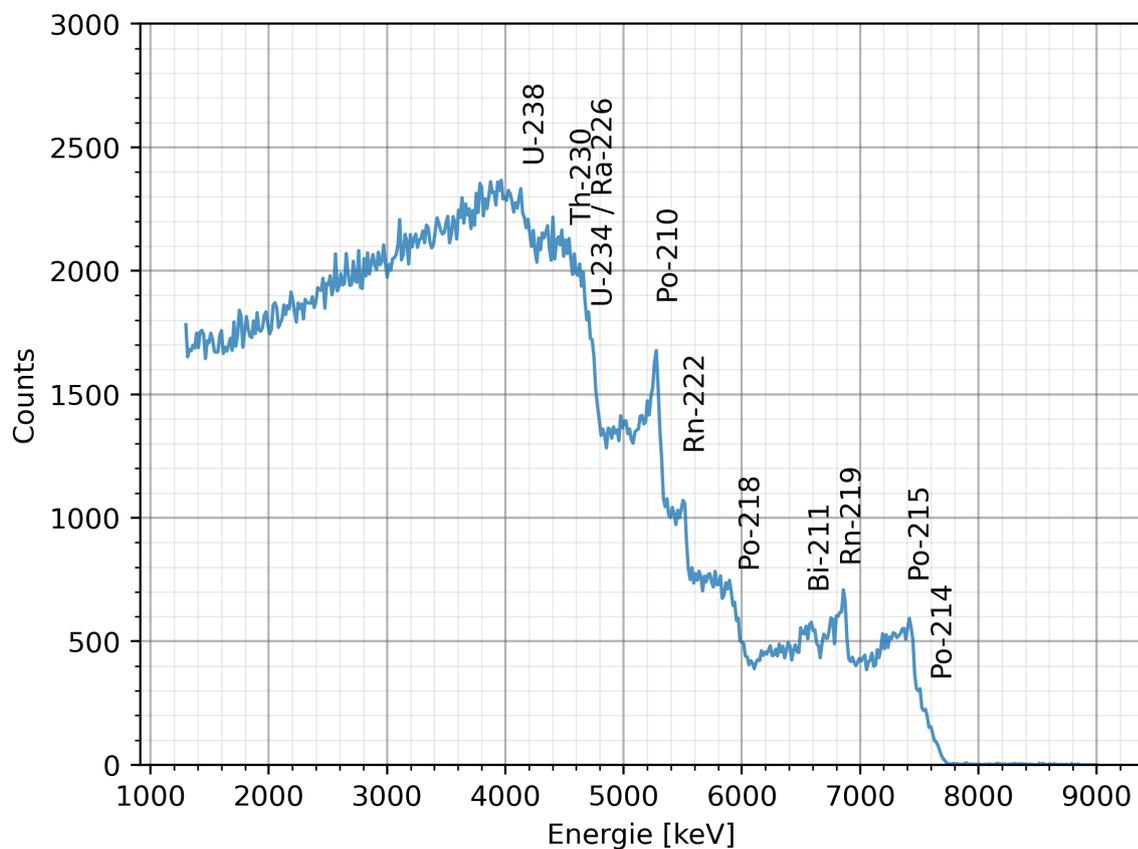


Abbildung 100: Spektrum der Probe AD, 1463s Messzeit, Energiekalibrierung EK2

Tabelle 49: GIK Auswertung Probe AD

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4149	4653	4788	5284	5515	5987	6602	6874	7425	7625
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-49	-34	13	-20	26	-15	-21	55	39	-62

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe AD ( $1366 \pm 37$ ) cps.

## Schlecht auswertbare Proben

### A

Das Spektrum hat eine hohe Auflösung, aber Aufladeffekte wirken sich negativ auf das Ergebnis aus. Die Peaks sind durch die Aufladeffekte um 200-250 keV verschoben.



Abbildung 101: Foto Pechblende der Probe A

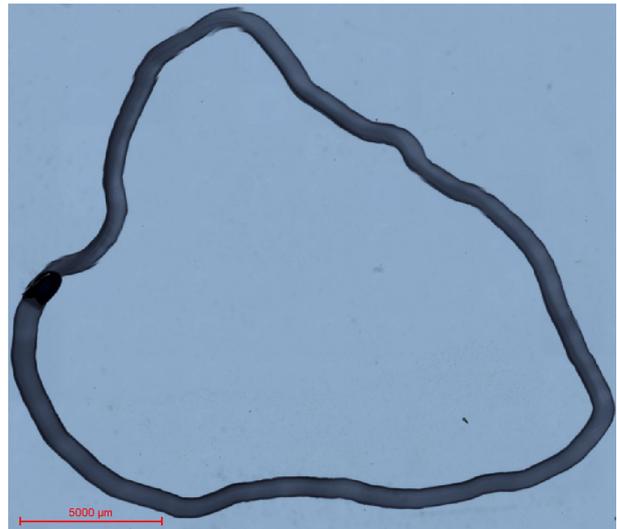


Abbildung 102: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe A

Tabelle 50: alpha-Track Auswertung Probe A

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
2,34 ± 0,51	1	189 ± 13	81 ± 18

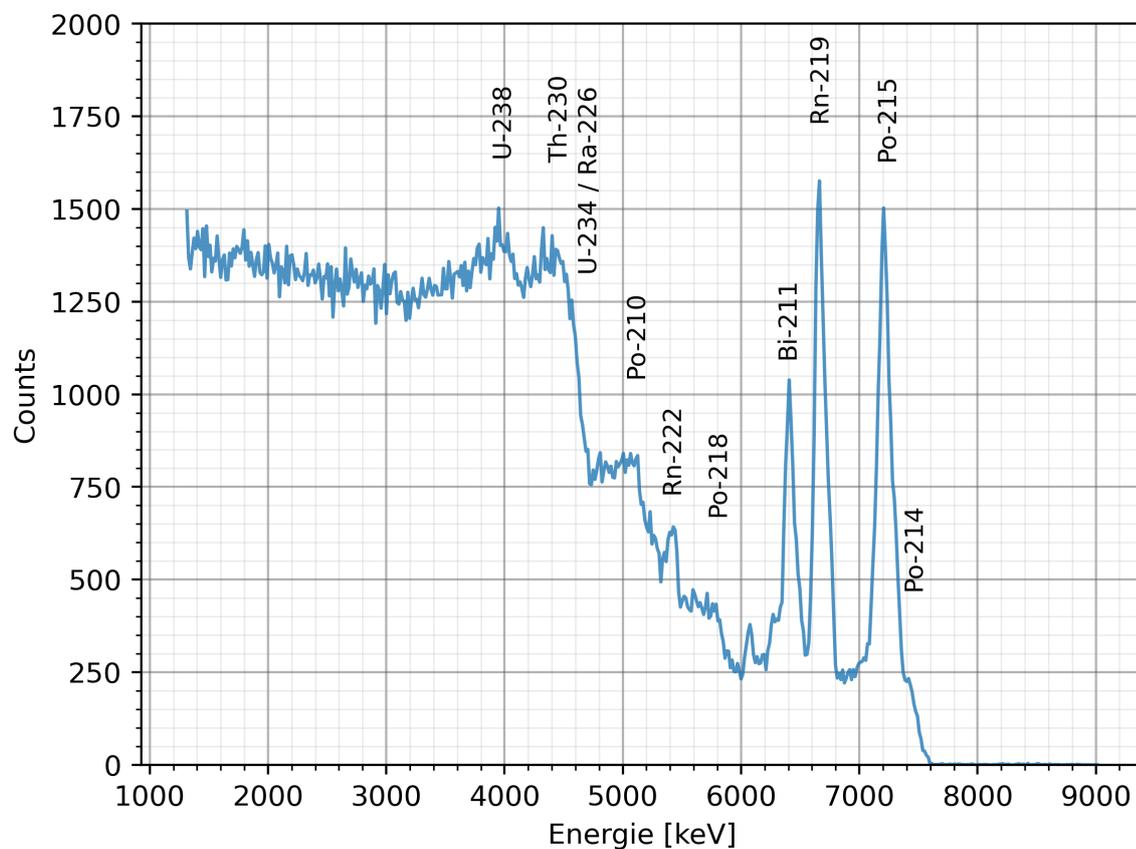


Abbildung 103: Spektrum der Probe A, 13 508 s Messzeit, Energiekalibrierung EK3

Tabelle 51: GIK Auswertung Probe A

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	3965	4412	4564	5123	5435	5826	6401	6673	7216	7416
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-233	-275	-211	-181	-54	-176	-222	-146	-170	-271

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe A ( $607 \pm 25$ ) cps.

## D

Das Spektrum der Probe D hat eine hohe Auflösung, aber Aufladeeffekte wirken sich negativ auf das Ergebnis aus. Die Peaks sind durch die Aufladeeffekte um 250-300 keV verschoben. Radon ist, dadurch, dass es gasförmig ist, weniger stark von der Verschiebung betroffen.



Abbildung 104: Foto Pechblende der Probe D



Abbildung 105: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe D

Tabelle 52: alpha-Track Auswertung Probe D

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
3,40 ± 0,63	30	4,15 ± 0,09	1,22 ± 0,23

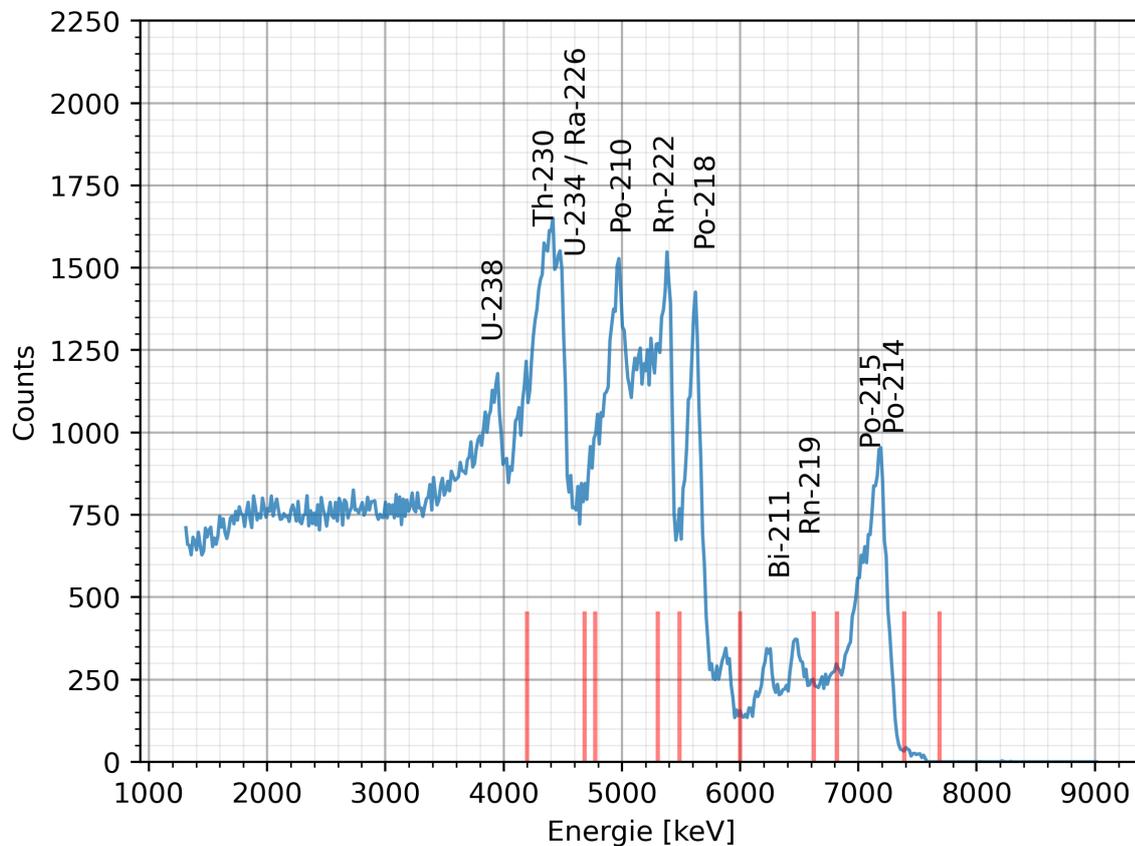


Abbildung 106: Spektrum der Probe D, 67 355 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 53: GIK Auswertung Probe D

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	3948	4403	4499	4971	5386	5626	6233	6489	7184	7304
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-250	-284	-276	-333	-103	-376	-390	-330	-202	-383

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe D  $(15,2 \pm 3,9)$  cps.

**M**

Das Spektrum hat eine hohe Auflösung, aber Aufladeeffekte wirken sich negativ auf das Ergebnis aus. Die Peaks sind durch die Aufladeeffekte um 200-250 keV verschoben.



Abbildung 107: Foto Pechblende der Probe M

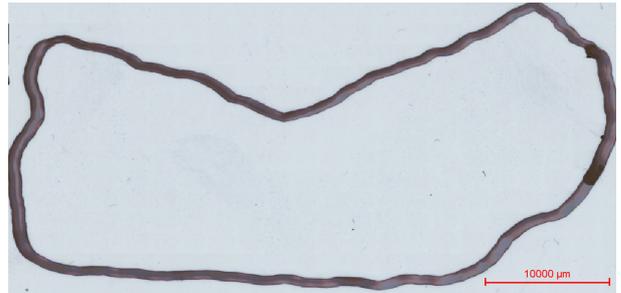


Abbildung 108: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe M

Tabelle 54: alpha-Track Auswertung Probe M

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
7,59 ± 1,00	1	1725 ± 117	227 ± 34

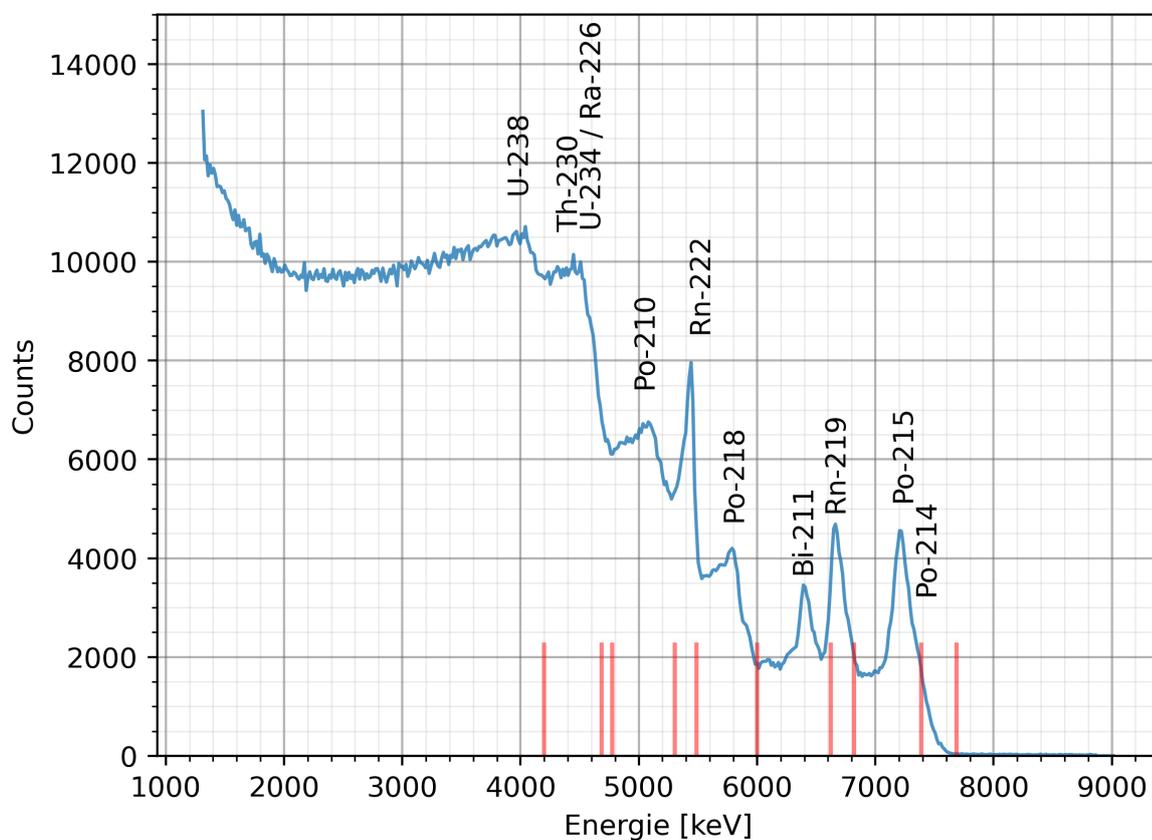


Abbildung 109: Spektrum der Probe M, 2979s Messzeit, Energiekalibrierung EK1

Tabelle 55: GIK Auswertung Probe M

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4044	4460	4612	5059	5451	5794	6393	6649	7208	7392
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-154	-227	-163	-245	-38	-208	-230	-170	-178	-295

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe M ( $1967 \pm 44$ ) cps.

## T

Die Ursache der alpha-Strahlung bei den Steinen T, U und AC liegt nicht in dem Uran, sondern in dem Thorium ( $^{232}\text{Th}$ -Zerfallsreihe). In Abb.(21) befindet sich die Thorium Standardprobe. Verglichen mit diesem Spektrum fehlen hier viele Töchter, die nicht Folgeprodukt des  $^{220}\text{Rn}$  sind.



Abbildung 110: Foto Pechblende der Probe T

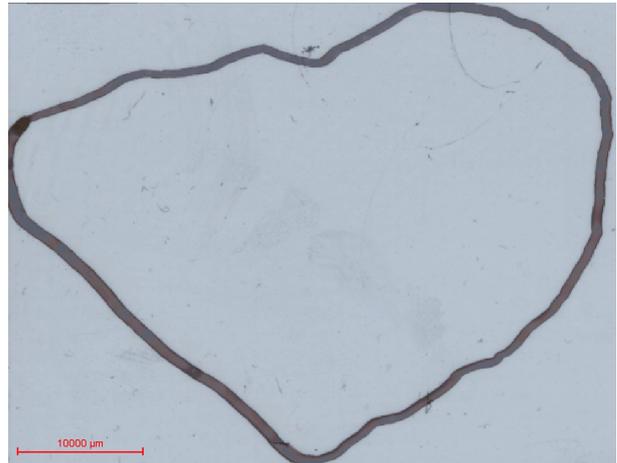


Abbildung 111: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe T

Tabelle 56: alpha-Track Auswertung Probe T

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
11,7 ± 1,3	79,5	16,1 ± 0,2	1,38 ± 0,15

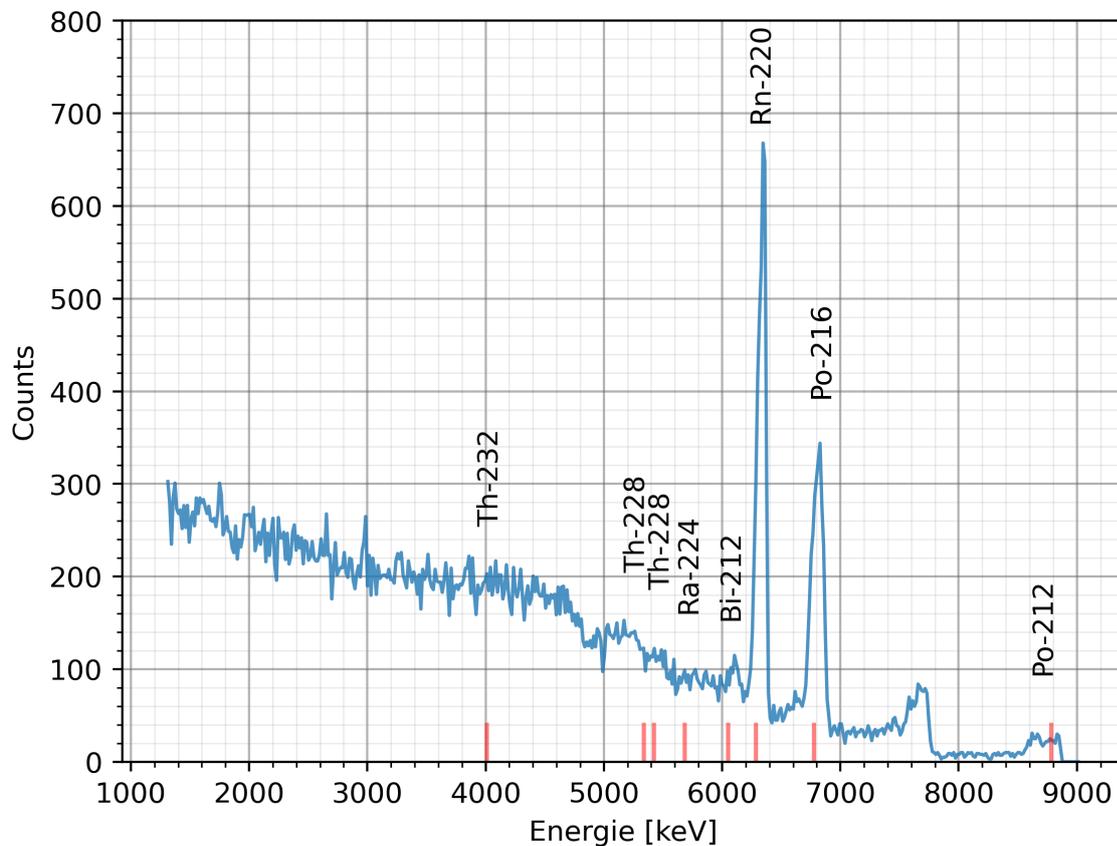


Abbildung 112: Spektrum der Probe T, 13 508 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2

Tabelle 57: GIK Auswertung Probe T

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]					6113	6358	6824	8814
Nuklid	$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Th}$	$^{228}\text{Th}$	$^{224}\text{Ra}$	$^{212}\text{Bi}$	$^{220}\text{Rn}$	$^{216}\text{Po}$	$^{212}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4012	5340	5423	5685	6051	6288	6778	8784
$\Delta E$ [keV]					62	70	46	30

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe T ( $17,6 \pm 4,2$ ) cps.

U



Abbildung 113: Foto Pechblende der Probe U

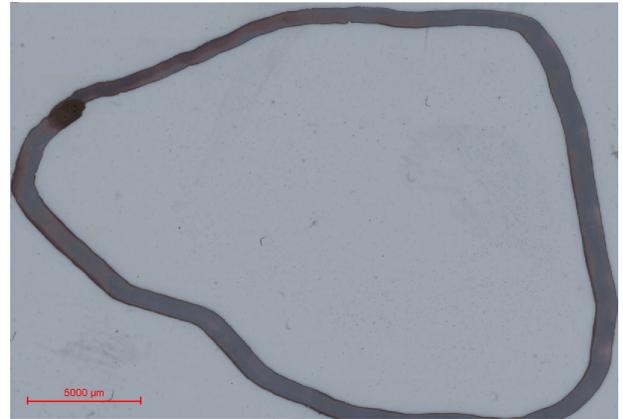


Abbildung 114: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe U

Tabelle 58: alpha-Track Auswertung Probe U

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
3,56 ± 0,64	60	5,01 ± 0,08	1,41 ± 0,25

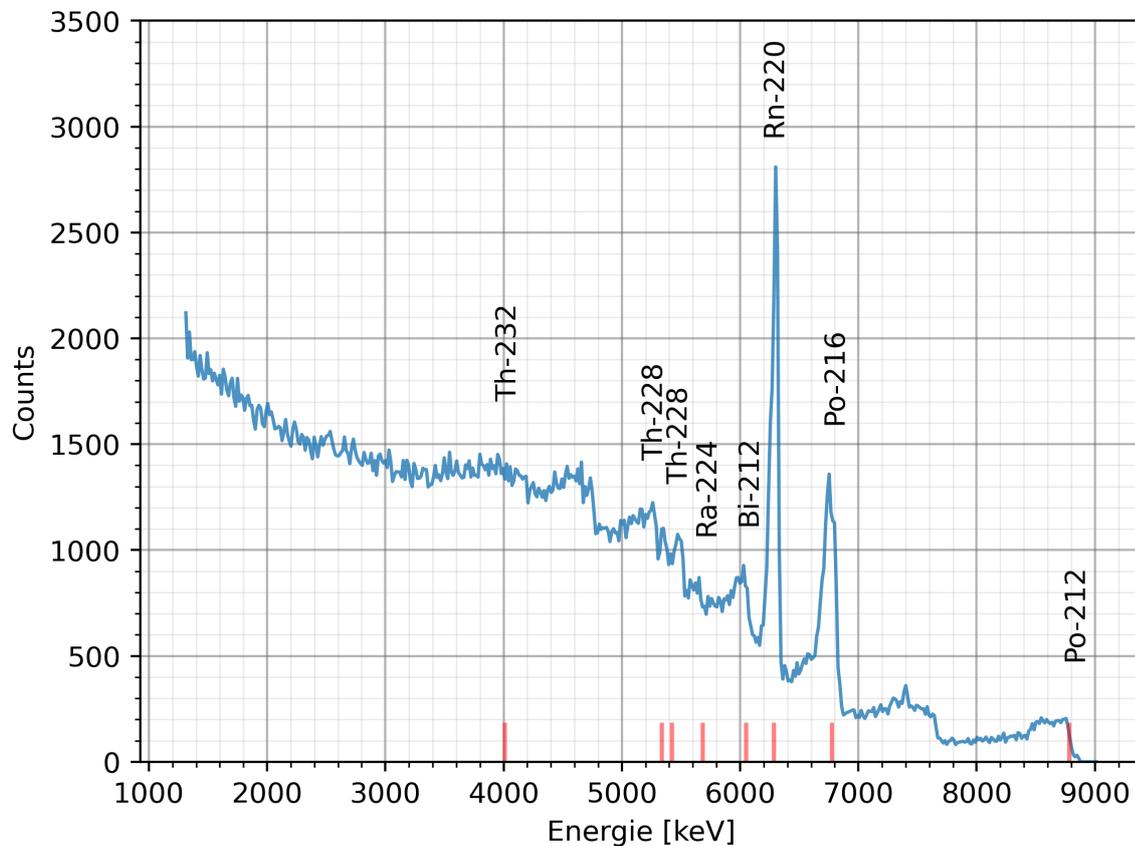


Abbildung 115: Spektrum der Probe U, 90 393 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2

Tabelle 59: GIK Auswertung Probe U

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	4020	5330	5466	5674	6033	6297	6760	8782
Nuklid	$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Th}$	$^{228}\text{Th}$	$^{224}\text{Ra}$	$^{212}\text{Bi}$	$^{220}\text{Rn}$	$^{216}\text{Po}$	$^{212}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4012	5340	5423	5685	6051	6288	6778	8784
$\Delta E$ [keV]	8	-10	43	-11	-18	9	-18	-2

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe U  $(18,0 \pm 4,2)$  cps.

**Z**

Im Spektrum der Probe Z bilden sich Töchternuclide des  $^{219}\text{Rn}$  der  $^{235}\text{U}$ -Zerfallsreihe nicht so präsent aus, als es erwartet wurde.



Abbildung 116: Foto Pechblende der Probe Z

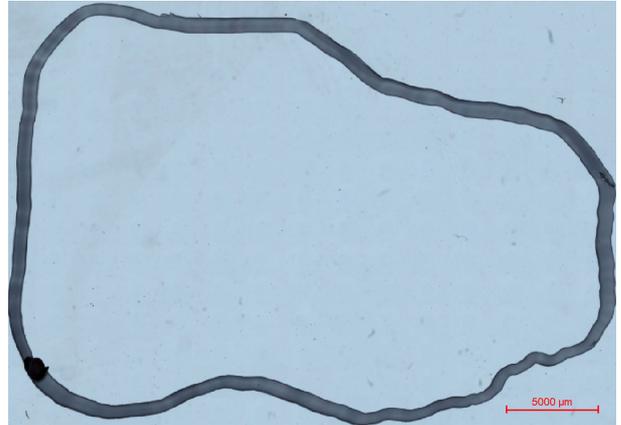


Abbildung 117: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe Z

Tabelle 60: alpha-Track Auswertung Probe Z

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
5,46 ± 0,82	10	12,8 ± 0,3	2,35 ± 0,36

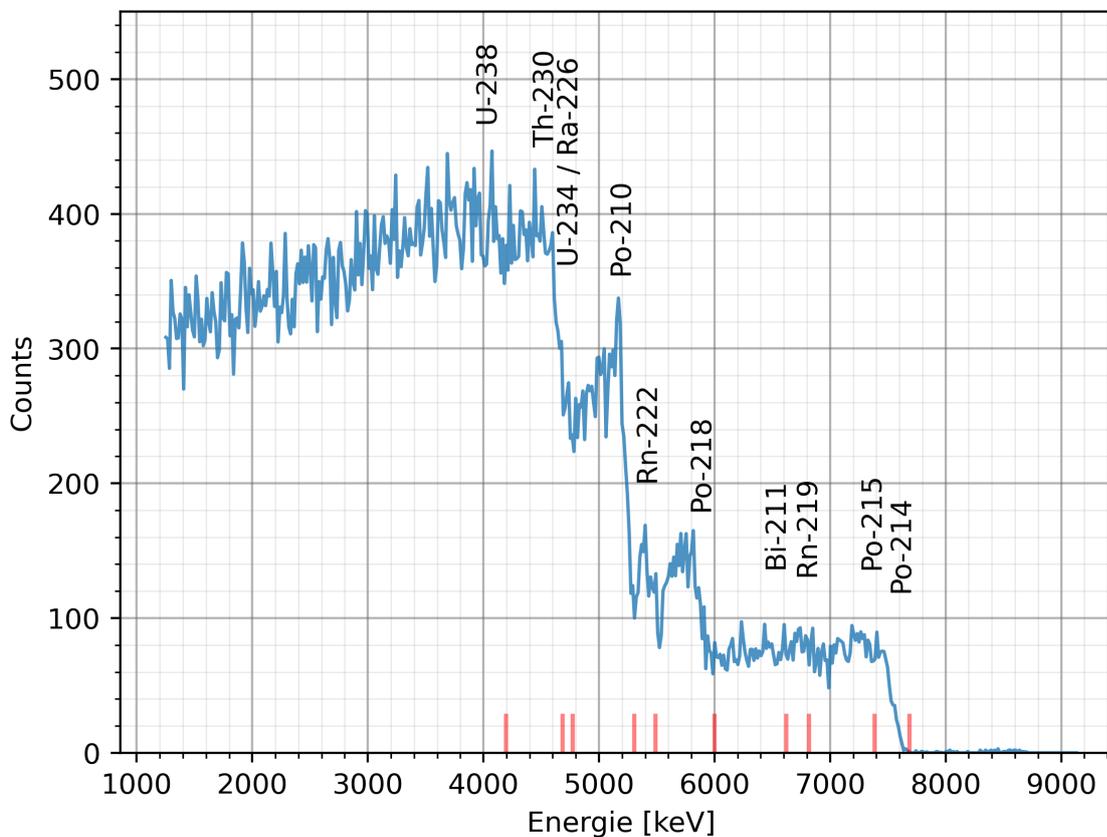


Abbildung 118: Spektrum der Probe Z, 73 113 s Messzeit, Energiekalibrierung EK3

Tabelle 61: GIK Auswertung Probe Z

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]	3941	4513	4611	5167	5388	5829				
Nuklid	$^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{211}\text{Bi}$	$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	$^{214}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4198	4687	4775 4784	5304	5489	6002	6623	6819	7386	7687
$\Delta E$ [keV]	-257	-174	-164	-137	-101	-173				

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe Z  $(4,7 \pm 2,2)$  cps.

**AC**



Abbildung 119: Foto Pechblende der Probe AC

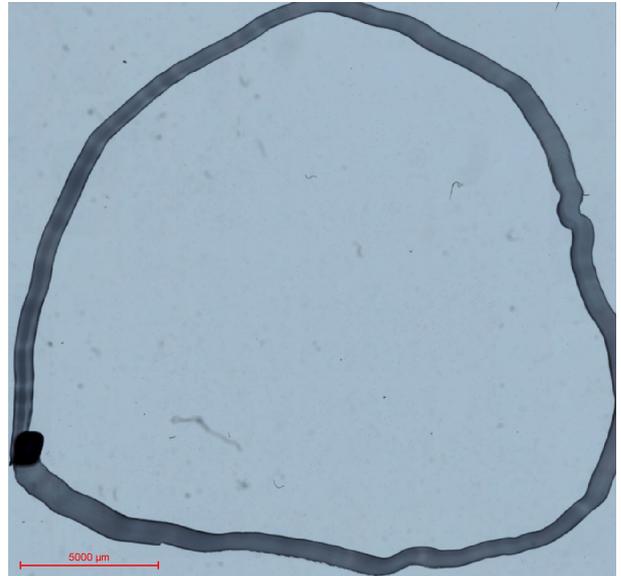


Abbildung 120: Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe AC

Tabelle 62: alpha-Track Auswertung Probe AC

Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Belichtungszeit [min]	Zählrate [cps]	Flächenzählrate [cps/cm <sup>2</sup> ]
3,23 ± 0,59	10	21,9 ± 0,4	6,77 ± 1,24

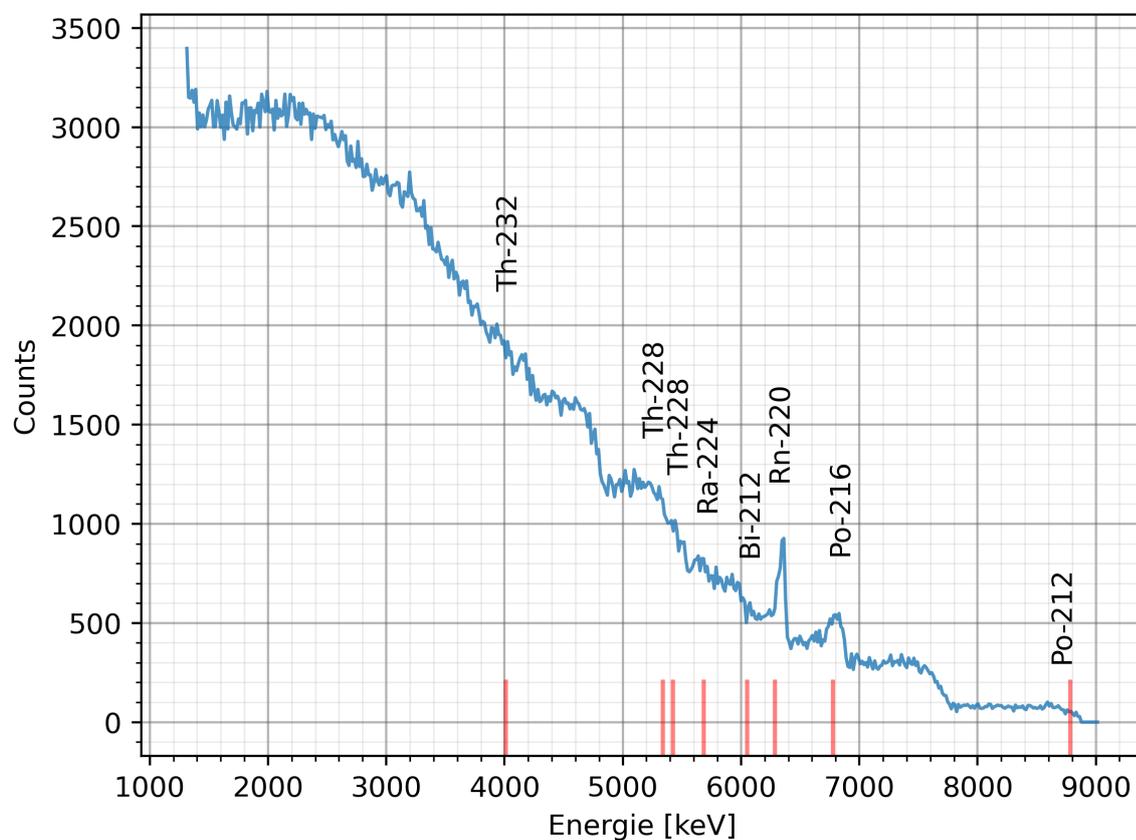


Abbildung 121: Spektrum der Probe AC, 14 609 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2

Tabelle 63: GIK Auswertung Probe AC

$E_{\text{Spektrum}}$ [keV]						6353	6824	
Nuklid	$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Th}$	$^{228}\text{Th}$	$^{224}\text{Ra}$	$^{212}\text{Bi}$	$^{220}\text{Rn}$	$^{216}\text{Po}$	$^{212}\text{Po}$
$E_{\text{Literatur}}$ [keV]	4012	5340	5423	5685	6051	6288	6778	8784
$\Delta E$ [keV]						65	31	

Die mit der GIK gemessenen Zählrate beträgt für Probe AC ( $162 \pm 13$ ) cps.

## Abbildungsverzeichnis

1	Foto einer Pechblende-Probe . . . . .	2
2	Ausschnitt Nuklidkarte Actinide (Nucleonica [8]) - Zerfallsprodukte der $^{238}\text{U}$ -Zerfallsreihe sind violett, der $^{235}\text{U}$ -Zerfallsreihe orange und der $^{232}\text{Th}$ -Zerfallsreihe schwarz umrandet . . . . .	3
3	Probenhalter aus Teflon für die alpha-Track Detektoren . . . . .	6
4	Heizplatte für Ätzzvorgang der alpha-Track Detektoren . . . . .	6
5	Bildausschnitt Lichtmikroskop Probe N . . . . .	7
6	Bildausschnitt Lichtmikroskop Probe Y . . . . .	7
7	Bildausschnitt Lichtmikroskop Probe Y - Zoom auf Häufungspunkt . . . . .	8
8	Vergleiche von Defekten unterschiedlicher Energien im alpha-Track Detektor (L. Hamann, 2017, S. 14 [15]) . . . . .	8
9	Ausschnitt eines Bildes vom Lichtmikroskop . . . . .	9
10	Threshold-Einstellung in ImageJ . . . . .	9
11	Auszählung der Counts in ImageJ . . . . .	10
12	Summe der detektierten Counts in ImageJ . . . . .	10
13	Bild der GIK von außen . . . . .	12
14	Bild einer Probe auf dem Probenhalter der GIK . . . . .	13
15	Schematische Skizze GIK (F. Krüger, 2013, S. 24 [20]) . . . . .	14
16	Signalverarbeitung GIK . . . . .	15
17	Spektren von $^{241}\text{Am}$ bei unterschiedlichen Betriebsspannungen . . . . .	16
18	Spektrum des Energiekalibrierstandards . . . . .	17
19	Untergrundmessung GIK vom 20.09., 241111s Messzeit, Energiekalibrierung EK2 . . . . .	18
20	Spektrum elektrodeponierter $^{238}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}$ Proben, 81574s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	19
21	Spektrum elektrodeponierter Thoriumprobe, 98976s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	21
22	Spektrum elektrodeponierter Uranprobe, 57226s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	22
23	Aufladeeffekte bei Probe M, Wanderung der Peaks bei zunehmender Messzeit zu kleineren Energien . . . . .	23
24	Schema eines Festkörperspektrums (S. Bister, 2007, S. 32 [4]) . . . . .	24
25	Foto Pechblende der Probe B . . . . .	25
26	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe B . . . . .	25
27	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe B - Vergrößerung auf alpha-Tracks . . . . .	26
28	Spektrum der Probe B, 5000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	27
29	Foto Pechblende der Probe S . . . . .	29
30	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe S . . . . .	29
31	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe S - Vergrößerung auf alpha-Tracks . . . . .	29
32	Spektrum der Probe S, 3628 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1, Senkrechte rote Striche geben die Erwartungswerte der Nuklidpeaks an . . . . .	30

---

33	Foto Pechblende der Probe R . . . . .	32
34	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe R . . . . .	32
35	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe R - Zoom auf Uraninit . . . . .	32
36	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe R - Zoom auf Taubgestein . . . . .	33
37	Spektrum der Probe R, 20 000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2 . . . . .	34
38	Foto Pechblende der Probe Q . . . . .	36
39	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe Q . . . . .	36
40	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe R - Zoom auf Uraninit . . . . .	36
41	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe R - Zoom auf Taubgestein . . . . .	37
42	Spektrum der Probe Q, 74 000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK3, Senkrechte rote Striche geben die Erwartungswerte der Nuklidpeaks an . . . . .	38
43	Spektren von $^{241}\text{Am}$ bei unterschiedlichen Betriebsspannungen . . . . .	45
44	Foto Pechblende der Probe C . . . . .	48
45	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe C . . . . .	48
46	Spektrum der Probe C, 77 547 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	49
47	Foto Pechblende der Probe E . . . . .	50
48	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe E . . . . .	50
49	Spektrum der Probe E, 3940 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	51
50	Foto Pechblende der Probe F . . . . .	52
51	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe F . . . . .	52
52	Spektrum der Probe F, 7000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	53
53	Foto Pechblende der Probe G . . . . .	54
54	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe G . . . . .	54
55	Spektrum der Probe G, 5614 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	55
56	Foto Pechblende der Probe H . . . . .	56
57	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe H . . . . .	56
58	Spektrum der Probe H, 68 822 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	57
59	Foto Pechblende der Probe I . . . . .	58
60	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe I . . . . .	58
61	Spektrum der Probe I, 7000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	59
62	Foto Pechblende der Probe J . . . . .	60
63	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe J . . . . .	60
64	Spektrum der Probe J, 3000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	61
65	Foto Pechblende der Probe K . . . . .	62
66	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe K . . . . .	62
67	Spektrum der Probe K, 5000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	63
68	Foto Pechblende der Probe L . . . . .	64
69	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe L . . . . .	64
70	Spektrum der Probe L, 3000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	65

71	Foto Pechblende der Probe N . . . . .	66
72	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe N . . . . .	66
73	Spektrum der Probe N, 12 000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	67
74	Foto Pechblende der Probe O . . . . .	68
75	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe O . . . . .	68
76	Spektrum der Probe O, 12 000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2 . . . . .	69
77	Foto Pechblende der Probe P . . . . .	70
78	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe P . . . . .	70
79	Spektrum der Probe P, 35 000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2 . . . . .	71
80	Foto Pechblende der Probe V . . . . .	72
81	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe V . . . . .	72
82	Spektrum der Probe V, 8529 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2 . . . . .	73
83	Foto Pechblende der Probe AA . . . . .	74
84	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe AA . . . . .	74
85	Spektrum der Probe AA, 6283 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2 . . . . .	75
86	Foto Pechblende der Probe W . . . . .	76
87	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe W . . . . .	76
88	Spektrum der Probe W, 5028 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	77
89	Foto Pechblende der Probe X . . . . .	78
90	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe X . . . . .	78
91	Spektrum der Probe X, 50 000 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	79
92	Foto Pechblende der Probe Y . . . . .	80
93	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe Y . . . . .	80
94	Spektrum der Probe Y, 50 006 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2 . . . . .	81
95	Foto Pechblende der Probe AB . . . . .	82
96	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe AB . . . . .	82
97	Spektrum der Probe AB, 4677 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	83
98	Foto Pechblende der Probe AD . . . . .	84
99	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe AD . . . . .	84
100	Spektrum der Probe AD, 1463 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2 . . . . .	85
101	Foto Pechblende der Probe A . . . . .	86
102	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe A . . . . .	86
103	Spektrum der Probe A, 13 508 s Messzeit, Energiekalibrierung EK3 . . . . .	87
104	Foto Pechblende der Probe D . . . . .	88
105	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe D . . . . .	88
106	Spektrum der Probe D, 67 355 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	89
107	Foto Pechblende der Probe M . . . . .	90
108	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe M . . . . .	90
109	Spektrum der Probe M, 2979 s Messzeit, Energiekalibrierung EK1 . . . . .	91

110	Foto Pechblende der Probe T . . . . .	92
111	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe T . . . . .	92
112	Spektrum der Probe T, 13 508 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2 . . . . .	93
113	Foto Pechblende der Probe U . . . . .	94
114	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe U . . . . .	94
115	Spektrum der Probe U, 90 393 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2 . . . . .	95
116	Foto Pechblende der Probe Z . . . . .	96
117	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe Z . . . . .	96
118	Spektrum der Probe Z, 73 113 s Messzeit, Energiekalibrierung EK3 . . . . .	97
119	Foto Pechblende der Probe AC . . . . .	98
120	Mikroskopbild alpha-Track Detektor Probe AC . . . . .	98
121	Spektrum der Probe AC, 14 609 s Messzeit, Energiekalibrierung EK2 . . . . .	99

## Tabellenverzeichnis

1	Energiekalibrierungen der GIK anhand des Energiekalibrierstandards . . . . .	17
2	alpha-Track Auswertung Probe B . . . . .	26
3	GIK Auswertung Probe B . . . . .	27
4	alpha-Track Auswertung Probe S . . . . .	29
5	GIK Auswertung Probe S . . . . .	30
6	alpha-Track Auswertung Probe R . . . . .	32
7	GIK Auswertung Probe R . . . . .	34
8	alpha-Track Auswertung Probe Q . . . . .	36
9	GIK Auswertung Probe Q . . . . .	38
10	Oberflächen und Zählraten der alpha-Track Analyse und GIK aller geeigneten Proben	40
11	Oberflächen und Zählraten der alpha-Track Analyse und GIK aller Proben . . . . .	46
12	alpha-Track Auswertung Probe C . . . . .	48
13	GIK Auswertung Probe C . . . . .	49
14	alpha-Track Auswertung Probe E . . . . .	50
15	GIK Auswertung Probe E . . . . .	51
16	alpha-Track Auswertung Probe F . . . . .	52
17	GIK Auswertung Probe F . . . . .	53
18	alpha-Track Auswertung Probe G . . . . .	54
19	GIK Auswertung Probe G . . . . .	55
20	alpha-Track Auswertung Probe H . . . . .	56
21	GIK Auswertung Probe H . . . . .	57
22	alpha-Track Auswertung Probe I . . . . .	58
23	GIK Auswertung Probe I . . . . .	59
24	alpha-Track Auswertung Probe J . . . . .	60
25	GIK Auswertung Probe J . . . . .	61
26	alpha-Track Auswertung Probe K . . . . .	62
27	GIK Auswertung Probe K . . . . .	63
28	alpha-Track Auswertung Probe L . . . . .	64
29	GIK Auswertung Probe L . . . . .	65
30	alpha-Track Auswertung Probe N . . . . .	66
31	GIK Auswertung Probe N . . . . .	67
32	alpha-Track Auswertung Probe O . . . . .	68
33	GIK Auswertung Probe O . . . . .	69
34	alpha-Track Auswertung Probe P . . . . .	70
35	GIK Auswertung Probe P . . . . .	71
36	alpha-Track Auswertung Probe V . . . . .	72
37	GIK Auswertung Probe V . . . . .	73

38	alpha-Track Auswertung Probe AA . . . . .	74
39	GIK Auswertung Probe AA . . . . .	75
40	alpha-Track Auswertung Probe W . . . . .	76
41	GIK Auswertung Probe W . . . . .	77
42	alpha-Track Auswertung Probe X . . . . .	78
43	GIK Auswertung Probe X . . . . .	79
44	alpha-Track Auswertung Probe Y . . . . .	80
45	GIK Auswertung Probe Y . . . . .	81
46	alpha-Track Auswertung Probe AB . . . . .	82
47	GIK Auswertung Probe AB . . . . .	83
48	alpha-Track Auswertung Probe AD . . . . .	84
49	GIK Auswertung Probe AD . . . . .	85
50	alpha-Track Auswertung Probe A . . . . .	86
51	GIK Auswertung Probe A . . . . .	87
52	alpha-Track Auswertung Probe D . . . . .	88
53	GIK Auswertung Probe D . . . . .	89
54	alpha-Track Auswertung Probe M . . . . .	90
55	GIK Auswertung Probe M . . . . .	91
56	alpha-Track Auswertung Probe T . . . . .	92
57	GIK Auswertung Probe T . . . . .	93
58	alpha-Track Auswertung Probe U . . . . .	94
59	GIK Auswertung Probe U . . . . .	95
60	alpha-Track Auswertung Probe Z . . . . .	96
61	GIK Auswertung Probe Z . . . . .	97
62	alpha-Track Auswertung Probe AC . . . . .	98
63	GIK Auswertung Probe AC . . . . .	99

## Literatur

- [1] Anita J. Crompton, Kelum A. A. Gamage, Alex Jenkins, and Charles James Taylor. Alpha Particle Detection Using Alpha-Induced Air Radioluminescence: A Review and Future Prospects for Preliminary Radiological Characterisation for Nuclear Facilities Decommissioning. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18(4):E1015, March 2018.
- [2] Johan Sand. *Alpha Radiation Detection via Radioluminescence of Air*. Tampere University of Technology, 2016.
- [3] Euramet. Remote and real-time optical detection of alpha-emitting radionuclides in the environment. [https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/remote-and-real-time-optical-detection-of-alpha-emitting-radionuclides-in-the-environment/?L=0&tx\\_eurametctcp\\_project%5Baction%5D=show&tx\\_eurametctcp\\_project%5Bcontroller%5D=Project&cHash=89489347d92d3f0c9dca079a5bbad14e](https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/remote-and-real-time-optical-detection-of-alpha-emitting-radionuclides-in-the-environment/?L=0&tx_eurametctcp_project%5Baction%5D=show&tx_eurametctcp_project%5Bcontroller%5D=Project&cHash=89489347d92d3f0c9dca079a5bbad14e). (aufgerufen am 23.11.2021).
- [4] S. Bister. *Spektrometrie an Pechblende*. Diplomarbeit, Philipps-Universität Marburg, 09 2007.
- [5] Mineralogy Database. Uraninite. <https://www.mindat.org/min-4102.html>. (aufgerufen am 07.11.2021).
- [6] Mineralienatlas. Uraninit. <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralData?mineral=Uraninit>. (aufgerufen am 07.11.2021).
- [7] J. Janeczek, R. C. Ewing. Structural formula of uraninite. *Journal of Nuclear Materials*, 190:128–132, 1992.
- [8] Nucleonica. Nuklidkarte. <https://www.nucleonica.com/Application/KNCOPlus.aspx>. (aufgerufen am 17.11.2021).
- [9] Hanno Krieger. *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [10] Seilnacht. Uran. <https://www.seilnacht.com/Lexikon/92Uran.html>. (aufgerufen am 07.11.2021).
- [11] A. Laitakari. *Über Radioaktive Minerale in Finnland*. Helsingfors, 1923.
- [12] C. Hepburn, A. H. Windle. Solid state nuclear track detectors. *Journal of Materials Science*, 27:279–301, 1980.
- [13] L. A. S. Pereira, et al. Micro-Raman Spectroscopic Characterization of a CR-39 Detector. *SAGE Journals*, 67:404–408, 2013.
- [14] A. Ashry, M. Abou-Leila, and Ayman Abdalla. Detection Efficiency of Alpha Particles in CR-39 Nuclear Track Detector: Experimental Study. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 4:341–344, August 2012.
- [15] L. Hamann. *Untersuchung radioaktiver Partikel mittels Sekundärionen-Flugzeit-Massenspektrometrie*. Doktorarbeit, Leibniz-Universität Hannover, 10 2017.

- 
- [16] G. Imme, et al. Nuclear track detector characterisation for alpha-particle spectroscopy. *Radiation Measurements*, 50:253–257, 2013.
- [17] C. Labno. *Two Ways to Count Cells with ImageJ*. University of Chicago.
- [18] Carbol P, Solatie D, Erdmann N, Nysten T, and Betti M. Deposition and distribution of chernobyl fallout fission products and actinides in a russian soil profile. *Journal of Environmental Radioactivity*, 68:27–46, 2003.
- [19] M. El Ghazaly and H. E. Hassan. Spectroscopic studies on alpha particle-irradiated PADC (CR-39 detector). *Results in Physics*, 4:40–43, January 2014.
- [20] F. Krüger. *Aufbau und Charakterisierung einer Frisch-Gitterionisationskammer für die Spektroskopie niedrigster spezifischer Aktivitäten*. Doktorarbeit, Technische Universität Dresden, 03 2014.
- [21] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, August 2000.
- [22] A. Al-Adili, et al. On the Frisch–Grid signal in ionization chambers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 671:103–107, 2012.
- [23] Akihiro Sakoda, Yuu Ishimori, and Kiyonori Yamaoka. A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(10):1422–1435, October 2011.