

Gammastruktrometrise Bestimmung der Aktivitäten natürlicher Radionuklide

γ -SPEKT/NATRAD

Bearbeiter:

U.-K. Schkade

A. Heckel

H. Wershofen

M.-O. Aust

F. Bruchertseifer

A. Dalheimer

S. Hofmann

G. Kanisch

C. Kowalik

F. Ober

K. Rupprecht

Redaktionsausschuss der Messanleitungen des Bundes

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	2
2	SPEZIELLE ANFORDERUNGEN AN DIE MESSEINRICHTUNG UND IHRE UMGEBUNG.....	2
2.1	ANFORDERUNGEN AN DEN AUFSTELLUNGSSORT.....	2
2.2	ANFORDERUNGEN AN DIE GAMMASPEKTROMETRIEMESSEINRICHTUNG	4
3	BETRACHTUNGEN ZUM RADIOAKTIVEN GLEICHGEWICHT IN ZERFALLSREIHEN	4
4	BETRACHTUNG AUSGEWÄHLTER NATÜRLICHER RADIONUKLIDE	5
4.1	URAN-238	6
4.2	RADIUM-226	7
4.3	BLEI-210	9
4.4	URAN-235	10
4.5	ACTINIUM-227	10
4.6	THORIUM-232	11
4.7	RADIUM-228	12
4.8	THORIUM-228.....	12
4.9	KALIUM-40.....	13
ANHANG A	KERNPHYSIKALISCHE DATEN AUSGEWÄHLTER RADIONUKLIDE.....	14
LITERATUR		20

Gammastrahlenspektrometrische Bestimmung der Aktivitäten natürlicher Radionuklide

1 Einleitung

Zu den natürlichen Radionukliden gehören, neben Kalium-40 und kosmogenen Radionukliden, die Radionuklide der drei natürlichen Zerfallsreihen (siehe Abbildung 1). Im Rahmen der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung bei bergbaulichen Tätigkeiten (REI Bergbau) [1] werden üblicherweise

- Uran-238, Radium-226 und Blei-210 aus der Uran-Radium-Zerfallsreihe,
- Uran-235 und Actinium-227 aus der Uran-Actinium-Zerfallsreihe sowie
- Thorium-232, Radium-228 und Thorium-228 aus der Thorium-Zerfallsreihe

gammastrahlenspektrometrisch bestimmt. Von diesen langlebigen Radionukliden können einige nur nach Einstellung des radioaktiven Gleichgewichts zwischen Ausgangs- und Folgenuklid über das Folgenuklid gammastrahlenspektrometrisch quantitativ gemessen werden.

Grundlegende Ausführungen zur Gammastrahlenspektrometrie sind im Allgemeinen Kapitel γ -SPEKT/GRUNDL [2], weitergehende Hinweise zu Nulleffekten und Interferenzen in den Allgemeinen Kapiteln γ -SPEKT/NULLEF und γ -SPEKT/INTERF [3, 4] dieser Messanleitungen zu finden.

2 Spezielle Anforderungen an die Messeinrichtung und ihre Umgebung

2.1 Anforderungen an den Aufstellungsort

Natürliche Radionuklide kommen ubiquitär vor. Damit treten sie sowohl in den Baustoffen von Fußböden, Wänden und Decken sowie in der Luft von Messräumen als auch in den Materialien, aus denen Detektoren und Abschirmungen aufgebaut sind, auf.

Ein besonderes Augenmerk gilt dabei den Isotopen des Edelgases Radon, die aus den oben genannten Materialien in die Luft von Messräumen emanieren und zum Nulleffektspektrum beitragen. Insbesondere bei der Bestimmung der Aktivitäten natürlicher Radionuklide sind durch geeignete Maßnahmen die Konzentrationen von Radonisotopen und deren Zerfallsprodukten zu minimieren sowie Konzentrationsschwankungen so weit wie möglich zu vermeiden, um ein Impulshöhenspektrum korrekt auswerten zu können [3].

Anmerkung:

- Hohe Radonkonzentrationen können in Kellerräumen alter Gebäude auftreten.
- Insbesondere bei niedrigen Radonkonzentrationen müssen jahreszeitlich auftretende Konzentrationsschwankungen von Radonisotopen und ihren Folgeprodukten berücksichtigt werden.

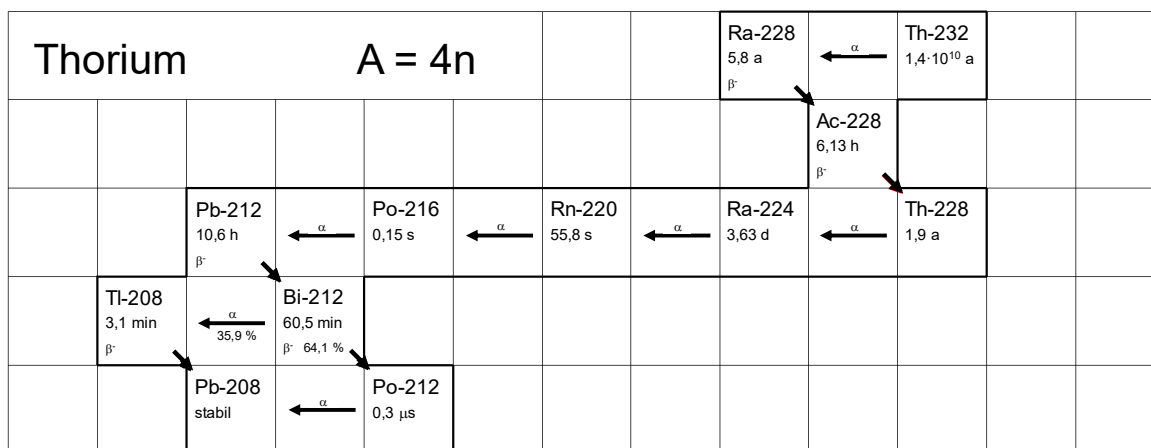
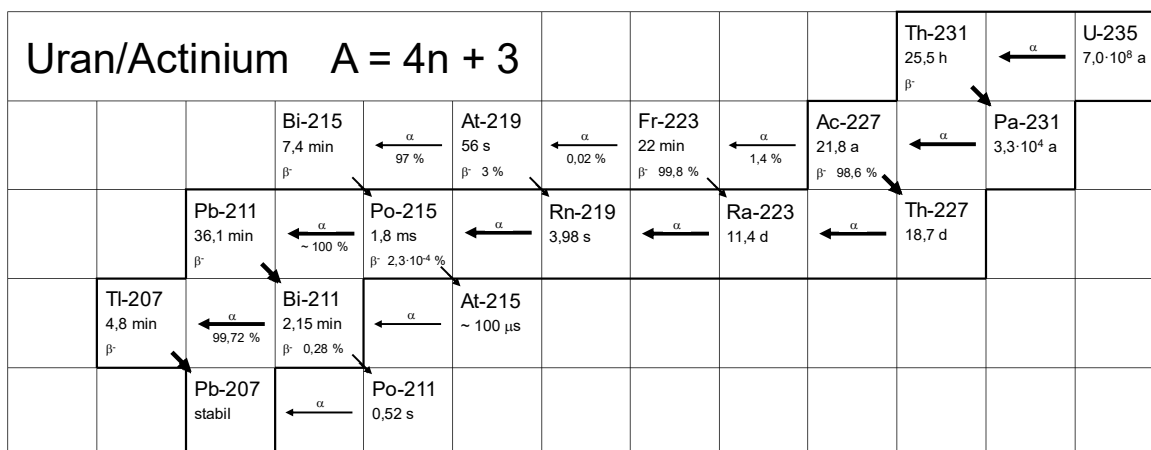
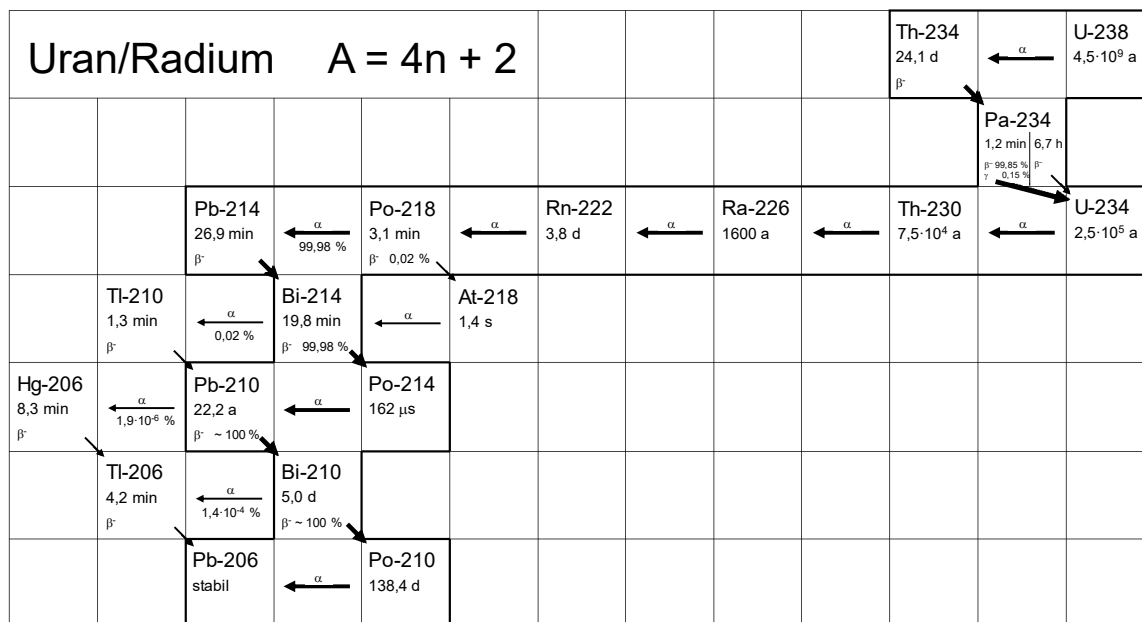


Abb. 1: Die natürlichen Zerfallsreihen mit Angabe der Zerfallsart und der Halbwertszeit sowie der Verzweigungen (Stand der kernphysikalischen Daten: November 2024)

2.2 Anforderungen an die Gammaskpektrometriemesseinrichtung

Sollen sehr kleine Aktivitäten natürlicher Radionuklide zuverlässig bestimmt werden, wird üblicherweise eine Ultra-low-level-Messeinrichtung eingesetzt, deren Komponenten aus Materialien mit sehr niedriger Eigenaktivität natürlicher Radionuklide bestehen. Diese Messeinrichtung sollte optimalerweise in der Mitte eines Raumes, dessen Baumaterial möglichst niedrige spezifische Aktivitäten natürlicher Radionuklide aufweist, mit dem jeweils maximal zur Verfügung stehenden Abstand zu den Raumwänden aufgestellt werden. Die weiteren Anforderungen sind in [2: Abschnitt 2] beschrieben.

Einige natürliche Radionuklide können nur über Gammalinien im niederenergetischen Bereich des Impulshöhenspektrums unterhalb von 100 keV gemessen werden (siehe Abbildung 2). Es ist daher von Vorteil, wenn neben den gängigen p-type-Germanium-detektoren auch ein n-type-Detektor eingesetzt werden kann.

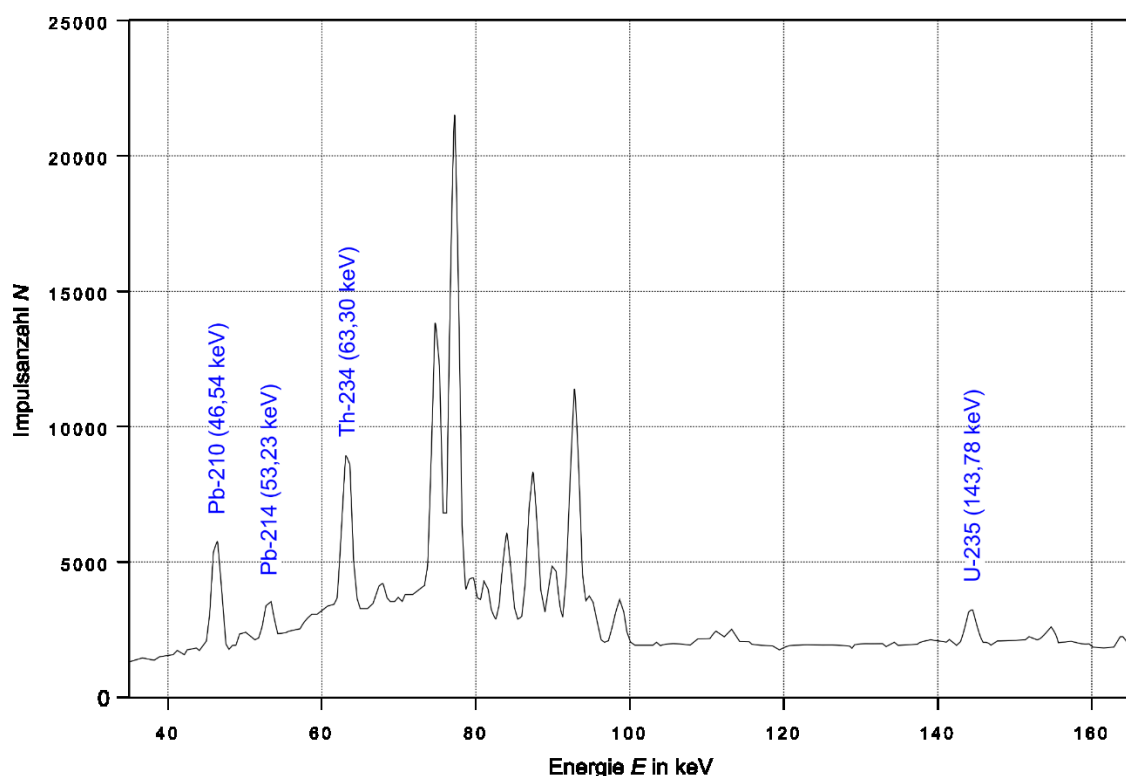


Abb. 2: Impulshöhenspektrum einer Bodenprobe (Energiebereich bis 160 keV) zur Bestimmung der spezifischen Aktivität von Pb-210

3 Betrachtungen zum radioaktiven Gleichgewicht in Zerfallsreihen

Einige Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen, die keine Gammastrahlung emittieren, können gammaskpektrometrisch nur indirekt über ihre Folgenuklide bestimmt werden. Bei diesen Messungen muss sichergestellt werden, dass das radioaktive Gleichgewicht zwischen Ausgangsnuklid und den zu messenden Folgenukliden besteht.

In Umweltproben kann das radioaktive Gleichgewicht aufgrund der unterschiedlichen chemischen bzw. biochemischen Eigenschaften der betreffenden Elemente gestört sein. Beispiele hierfür sind:

- unterschiedliche Löslichkeit von Radium und Thorium in Wasser;
- unterschiedliches Transferverhalten von Ausgangs- und Folgenukliden in der Kette *Boden-Bewuchs-Tier-Milch*;
- Störung des radioaktiven Gleichgewichtes bei der Probeentnahme, z. B. durch Verwendung von Filtermaterialien;
- Entweichen von Radon aus der Probe.

Als Maßnahmen sind zu empfehlen:

- die zu messenden Proben ausreichend lange vor Beginn der Messung zu lagern oder für eine eventuell erforderliche Kontrollmessung aufzubewahren. Ist die Gleichgewichtseinstellung eines langlebigen Ausgangsnuklides mit seinem kurzlebigen Folgenuklid erwünscht, sollte die Wartezeit mindestens sechs Halbwertszeiten des Folgenuklids betragen.
- das Probenmaterial, vor allem im Falle der Messung von kurzlebigen Folgenukliden des Rn-222, in gasdicht verschließbare Messgefäße zu überführen und die Einstellung des radioaktiven Gleichgewichts abzuwarten. Das Totvolumen zwischen der eingefüllten Probe und dem Deckel des Messgefäßes sollte dabei so gering wie möglich sein.

Bei Paaren von Ausgangs- und Folgenukliden ist besonderes Augenmerk darauf zu legen, dass die Halbwertszeit eines kurzlebigen Folgenuklids durch die Halbwertszeit des langlebigen Ausgangsnuklids ersetzt wird, damit bei einer Zerfallskorrektur auf einen vor dem Messzeitpunkt zurück liegenden Bezugszeitpunkt einer Umweltprobe, in der Regel der Probeentnahmezeitpunkt, keine physikalisch unrealistischen Aktivitäten berechnet werden. Dabei sind sowohl der radioaktive Zerfall des jeweiligen Radionuklids als auch sein Nachwachsen aus seinem Ausgangsnuklid zu berücksichtigen. Beispiele hierfür sind die Radionuklidpaare: Ra-226/Pb-210, Ra-228/Th-228, U-238/Th-234.

Für weitere Informationen wird auf das Allgemeine Kapitel γ -SPEKT/GRUNDL dieser Messanleitungen verwiesen [2]).

4 Betrachtung ausgewählter natürlicher Radionuklide

Im Folgenden werden die in der REI Bergbau geforderten natürlichen Radionuklide ausführlich diskutiert [1]. Dabei werden im Einzelfall auch die Erfordernisse zur Korrektur von Selbstabsorptions- und Summationsverlusten angesprochen.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Photonenenergien (E_γ) und Emissionsintensitäten (p_γ) der betrachteten Radionuklide sowie ihrer Störnuklide aufgeführt. Bei den Zerfallsreihen im Gleichgewicht beziehen sich die hier angegebenen Emissionsintensitäten jeweils auf einen Zerfall des Ausgangsnuklids und berücksichtigen bereits mögliche Verzweigungen. Ein Beispiel hierfür ist die Bestimmung des Th-228-Gehalts über das Folgenuklid Tl-208 in Abschnitt 4.8. Die dort angegebenen Tl-208-Emissionsintensitäten berücksichtigen bereits, dass beim Zerfall des Radionuklids Bi-212 auf Grund der Verzweigung lediglich 35,93 % der Aktivität von Th-228 beim Folgenuklid Tl-208 vorliegen (siehe Abbildung 1).

Anmerkung:

Die kernphysikalischen Daten der betrachteten Radionuklide sind den im Allgemeinen Kapitel KERNDATEN dieser Messanleitungen [5] genannten Bezugsquellen entnommen.

4.1 Uran-238

Uran-238 (U-238) mit seiner Halbwertszeit von $4,468 \cdot 10^9$ Jahren ist das Ausgangsnuklid in der Uran-Radium-Zerfallsreihe und kann gammaspektrometrisch nur über die Folgenuklide Th-234 und Pa-234m bestimmt werden.

Meist wird hierfür die 63,3-keV-Linie des Th-234 benutzt. Bei dieser niedrigen Energie haben Matrixunterschiede zwischen Kalibrier- und Messpräparat infolge unterschiedlicher Selbstabsorption einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis und müssen entsprechend berücksichtigt werden [2]. Außerdem wird die Linie bei 63,3 keV durch eine Linie von Th-232 bei 63,8 keV mit einer Emissionsintensität von 0,259 % gestört.

Anmerkung:

Für die Bestimmung des U-238-Gehalts sollte die Doppellinie des Th-234 bei den Energien 92,4 keV und 92,8 keV mit einer Gesamtemissionsintensität von 4,33 % (2,18 % + 2,15 %) nicht herangezogen werden.

Die Linien des Pa-234m bei 1001,0 keV und 766,4 keV sind infolge ihrer höheren Energien zur Auswertung des Impulshöhenspektrums besser geeignet, führen jedoch aufgrund ihrer geringen Emissionsintensitäten zu schlechteren Nachweisgrenzen (siehe Abbildung 3).

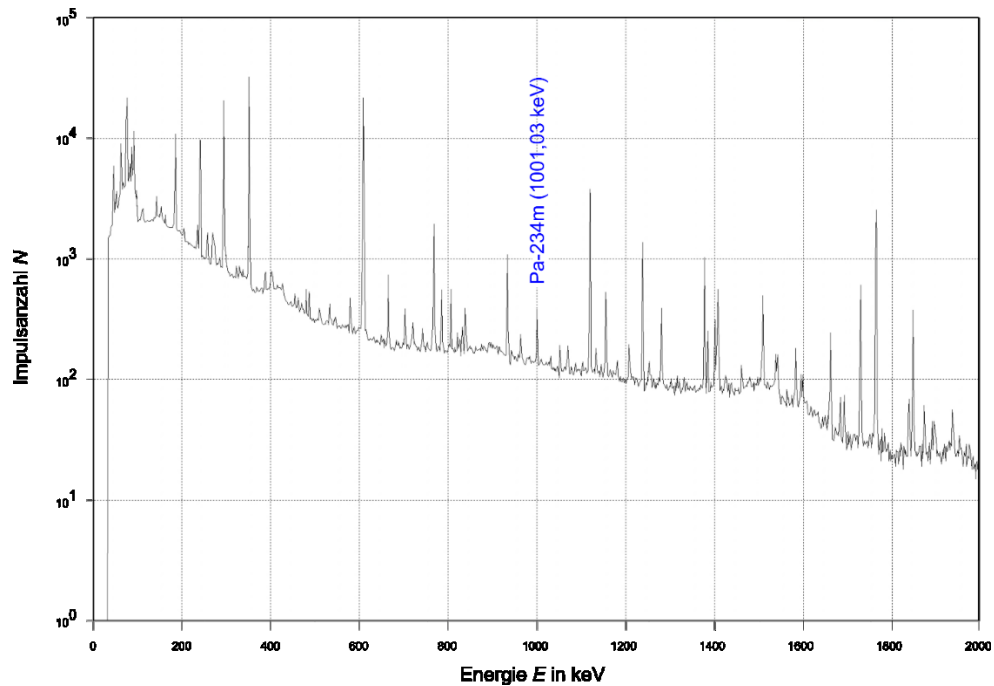


Abb. 3: Auswertung der Pa-234m-Linie im Impulshöhenspektrum einer Bodenprobe zur Bestimmung der spezifischen Aktivität von U-238

In Tabelle 1 sind die für die Auswertung geeigneten Linien zusammengefasst.

Tab. 1: Kernphysikalische Daten der auszuwertenden Radionuklide und ihrer Störnuklide bei der gammaspektrometrischen Bestimmung des U-238-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	E_γ	p_γ	Störnuklid	E_γ	p_γ
	in keV	in %		in keV	in %
Th-234	63,30	3,75	Th-232	63,81	0,259
	92,38	2,18	Th-234 ($K\alpha_1 + K\alpha_2$)	93,35	5,6
	92,80	2,15			
Pa-234m	766,36	0,323			
	1001,03	0,847			

Bei Proben natürlichen Ursprungs kann zu Plausibilisierungszwecken das nahezu konstante natürliche U-238/U-235-Aktivitätsverhältnis von 21,7 herangezogen werden (siehe Abschnitt 4.4).

4.2 Radium-226

Radium-226 (Ra-226) ist ein langlebiges Radionuklid in der Uran-Radium-Zerfallsreihe mit einer Halbwertszeit von 1600 Jahren, für dessen Bestimmung zwei Vorgehensweisen möglich sind:

- Auswertung der 186,2-keV-Linie von Ra-226 im Impulshöhenspektrum;

- Auswertung der Gammalinien der kurzlebigen Folgenuklide Pb-214 und Bi-214 des Rn-222 im Impulshöhenspektrums nach Einstellung des radioaktiven Gleichgewichts zwischen Ra-226, Rn-222, Pb-214 und Bi-214 (siehe Abbildung 4).

Wird die 186,2-keV-Linie von Ra-226 ausgewertet, muss deren Überlagerung durch die 185,7-keV-Linie des Radionuklids U-235 berücksichtigt werden. Die spezifische Aktivität des U-235 beträgt in natürlichen Medien etwa $1/22$ der spezifischen Aktivität des Ra-226. Demgegenüber ist die Emissionsintensität der 185,7-keV-Linie des Radionuklids U-235 um den Faktor 16 höher als die Emissionsintensität der 186,2-keV-Linie von Ra-226.

Unter der Annahme, dass radioaktives Gleichgewicht in der Probe vorliegt, ist diese Überlagerung unproblematisch. Das heißt, dass der Gehalt von U-238 gleich dem von Ra-226 ist, und damit der Gehalt von U-235 ebenfalls bekannt ist. Bei Umweltproben kann dies jedoch nicht immer vorausgesetzt werden; bei Rückständen und Produkten aus industrieller Verarbeitung, die natürlich vorkommendes radioaktives Material (NORM) enthalten, liegt nie ein Gleichgewicht vor. Deshalb ist die Korrektur der Überlagerung der Ra-226-Linie bei 186,2 keV mit der U-235-Störlinie bei 185,7 keV nur dann möglich, wenn die Aktivität des U-235 mit Hilfe anderer Gammalinien bestimmt wird oder aus der U-238-Aktivität abgeleitet wird.

Anmerkung:

Der U-238-Gehalt einer Probe kann auch mittels anderer Methoden, z. B. Alphaspektrometrie, Röntgenfluoreszenzmessung oder Massenspektrometrie, erhalten werden.

Für die Bestimmung der Aktivitäten der kurzlebigen Folgenuklide von Rn-222 werden gasdichte Messgefäße benötigt, da sonst auf Grund von Rn-222-Emanation aus dem Messgefäß zu geringe Impulsanzahlen für Pb-214 und Bi-214 im Impulshöhenspektrum erfasst werden. Der Zeitraum zwischen Einfüllen der Probe in das gasdichte Gefäß und dem Beginn der Messung sollte mindestens 23 Tage betragen, da er durch die Halbwertszeit des Rn-222 von 3,82 Tagen bestimmt wird. Bei der Auswertung des Impulshöhenspektrums ist eine Summationskorrektur üblicherweise erforderlich [2, 6].

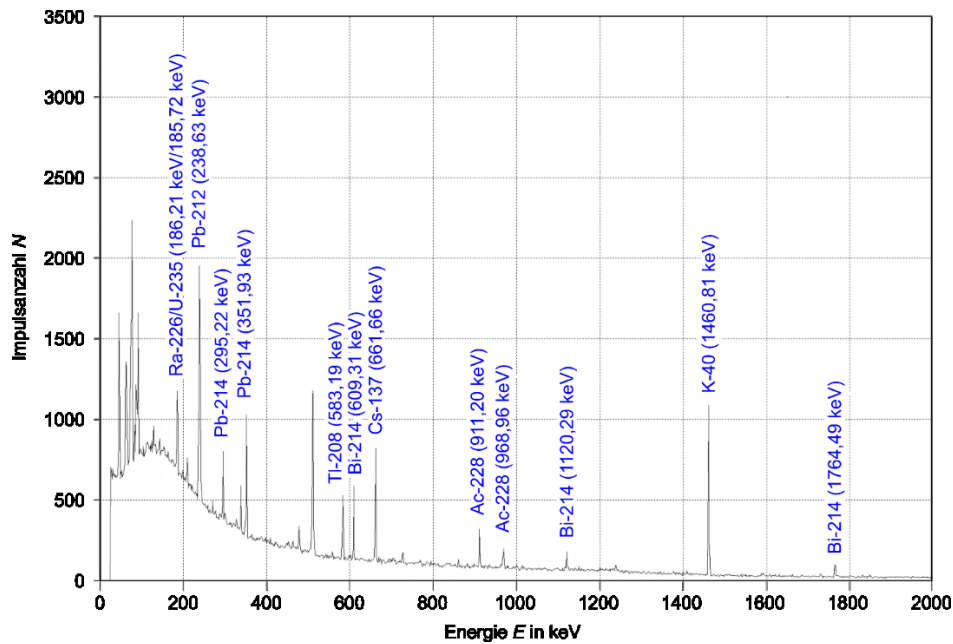


Abb. 4: Auswertung der Pb-214-Linien und der Bi-214-Linien im Impulshöhenspektrum einer Bodenprobe zur Bestimmung der spezifischen Aktivität von Ra-226

Einige zur Auswertung geeignete Linien sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Kernphysikalische Daten der auszuwertenden Radionuklide und ihrer Störnuklide bei der gammaspektrometrischen Bestimmung des Ra-226-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	E_γ	p_γ	Störnuklid	E_γ	p_γ
	in keV	in %		in keV	in %
Ra-226	186,21	3,56	U-235	185,72	57,0
Pb-214	295,22	18,41	Bi-211	351,03	13,00
	351,93	35,6			
Bi-214	609,31	45,49			
	1120,29	14,91			
	1764,49	15,31			

4.3 Blei-210

Blei-210 (Pb-210) ist ein Radionuklid in der Uran-Radium-Zerfallsreihe mit einer Halbwertszeit von 22,23 Jahren. Die gammaspektrometrische Bestimmung des Pb-210-Gehalts erfolgt direkt über die Gammalinie bei der vergleichsweise niedrigen Energie von 46,5 keV (siehe Tabelle 3). Eine unterschiedliche Materialzusammensetzung zwischen Kalibrier- und Messpräparat spielt bei dieser Energie wegen der unterschiedlichen Selbstabsorption eine große Rolle und muss in geeigneter Weise über Korrekturfaktoren berücksichtigt werden [2].

Tab. 3: Kernphysikalische Daten des auszuwertenden Radionuklids bei der gamma-spektrometrischen Bestimmung des Pb-210-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	E_γ	p_γ	Störnuklid	E_γ	p_γ
	in keV	in %		in keV	in %
Pb-210	46,54	4,25			

4.4 Uran-235

Uran-235 (U-235) ist das Ausgangsnuklid der Uran-Actinium-Zerfallsreihe mit einer Halbwertszeit von $7,04 \cdot 10^8$ Jahren. Der U-235-Gehalt kann direkt über die in Tabelle 4 genannten Gammalinien bei 143,8 keV, 163,4 keV, 185,7 keV und 205,3 keV ermittelt werden. Bei der Auswertung dieser Gammalinien im Impulshöhenspektrum muss Folgendes beachtet werden:

- Für die Auswertung der Gammalinie bei 185,7 keV, die die höchste Emissionsintensität hat, muss die Ra-226-Aktivität bekannt sein (siehe Abschnitt 4.2).
- Die Gammalinie bei 143,8 keV wird durch die Ra-223-Gammalinie bei 144,2 keV gestört (siehe Abbildung 2).
- Die beiden anderen Gammalinien besitzen so niedrige Emissionsintensitäten, dass sie bei Proben mit geringen Gehalten an U-235 zur Auswertung üblicherweise nicht herangezogen werden.

Tab. 4: Kernphysikalische Daten des auszuwertenden Radionuklids und der Störnuklide zur gammaspektrometrischen Bestimmung des U-235-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	E_γ	p_γ	Störnuklid	E_γ	p_γ
	in keV	in %		in keV	in %
U-235	143,77	10,94	Ra-223	144,27	3,36
	163,36	5,08			
	185,72	57,0	Ra-226	186,21	3,56
	205,32	5,02			

4.5 Actinium-227

Actinium-227 (Ac-227) ist ein Radionuklid der Uran-Actinium-Zerfallsreihe mit einer Halbwertszeit von 21,77 Jahren. Ac-227 kann gammaspektrometrisch nur über seine kurzlebigen Folgenuklide Th-227, Ra-223 und Rn-219 bestimmt werden. Vorzugsweise wird die Gammalinie des Th-227 bei 236,0 keV im Impulshöhenspektrum ausgewertet (siehe Abbildung 5 und Tabelle 5). Die anderen in Frage kommenden Linien weisen

entweder niedrigere Emissionsintensitäten auf oder sind durch Gammalinien anderer Radionuklide gestört.

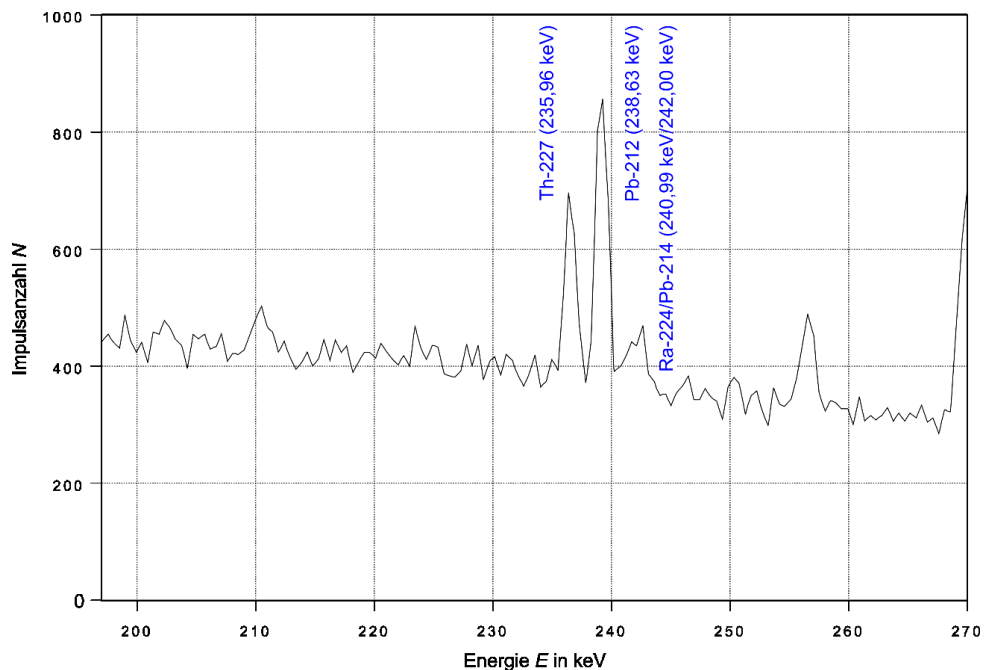


Abb. 5: Auswertung der 236,0-keV-Linie von Th-227 im Impulshöhenspektrum einer Schwammprobe (Grönland) zur Bestimmung der spezifischen Ac-227-Aktivität

Tab. 5: Kernphysikalische Daten des auszuwertenden Radionuklids zur gammaspektrometrischen Bestimmung des Ac-227-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	E_γ	p_γ	Störnuklid	E_γ	p_γ
	in keV	in %		in keV	in %
Th-227	235,96	12,6			

4.6 Thorium-232

Thorium-232 (Th-232) mit einer Halbwertszeit von $1,40 \cdot 10^{10}$ Jahren ist das Ausgangsnuklid der Thorium-Zerfallsreihe. Th-232 besitzt eine Gammalinie bei 63,8 keV mit einer sehr geringen Emissionsintensität von 0,259 %, die durch eine Gammalinie des Th-234 bei 63,3 keV mit einer höheren Emissionsintensität von 3,75 % gestört wird (siehe Tabelle 1), so dass Th-232 in Umweltproben nicht direkt gammaspektrometrisch bestimmt werden kann.

Die Bestimmung über seine Folgenuklide Ac-228, Pb-212 und Tl-208 ist nur dann möglich, wenn sich diese Radionuklide im radioaktiven Gleichgewicht miteinander und mit dem Ausgangsnuklid Th-232 befinden. Bei Umweltproben kann dies jedoch nicht immer vorausgesetzt werden; bei Rückständen und Produkten aus industrieller Verarbeitung, die natürlich vorkommendes radioaktives Material (NORM) enthalten, liegt nie ein

Gleichgewicht vor. Ursache hierfür ist das Radionuklid Ra-228, das in der Zerfallsreihe zwischen Th-232 und Ac-228 steht und aufgrund seiner chemischen Eigenschaften und seiner Mobilität das radioaktive Gleichgewicht verändern kann.

4.7 Radium-228

Radium-228 (Ra-228) ist ein Radionuklid der Thorium-Zerfallsreihe mit einer Halbwertszeit von 5,75 Jahren. Die Bestimmung des Ra-228-Gehalts erfolgt über die Auswertung der Gammalinien seines Folgenuklids Ac-228, das auf Grund seiner kurzen Halbwertszeit von 6,15 Stunden nach etwa 30 Stunden im radioaktiven Gleichgewicht mit Ra-228 vorliegt. Dabei ist eine Koinzidenzsumimationskorrektur in jedem Fall erforderlich [2]. In Tabelle 6 sind die Gammalinien angegeben, die zur Auswertung geeignet sind.

Weichen die Aktivitäten von Ra-224, Pb-212 und Tl-208, deren Gammalinien in Tabelle 7 aufgeführt sind, nicht signifikant von der Aktivität von Ac-228 ab, dürfen auch diese Radionuklide zur Bestimmung der Ra-228-Aktivität herangezogen werden.

Tab. 6: Kernphysikalische Daten des auszuwertenden Radionuklids und des Störnuklids bei der gammaspektrometrischen Bestimmung des Ra-228-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	E_γ	p_γ	Störnuklid	E_γ	p_γ
	in keV	in %		in keV	in %
Ac-228	209,25	3,97	Ra-223	338,28	2,85
	338,32	11,40			
	911,20	26,20			
	968,96	15,90			

4.8 Thorium-228

Thorium-228 (Th-228) ist ein Radionuklid der Thorium-Zerfallsreihe mit einer Halbwertszeit von 1,91 Jahren. Der Th-228-Gehalt kann — unter der Voraussetzung des radioaktiven Gleichgewichts — durch die Auswertung der Gammalinien seiner kurzlebigen Folgenuklide Ra-224, Pb-212 und Tl-208 bestimmt werden. Bei der Gleichgewichtseinstellung ist Folgendes zu beachten:

- Bei flüssigen Proben ist das Gleichgewicht nach einer Wartezeit von 23 Tagen sicher eingestellt.
- Bei Feststoffproben liegt das Gleichgewicht bereits zum Zeitpunkt der Probenentnahme vor.

Bei der Auswertung der Gammalinie des Ra-224 bei 241,0 keV muss die Störung durch die Gammalinie von Pb-214 bei einer Energie von 242,0 keV berücksichtigt werden (siehe Abbildung 5).

Erfolgt die Bestimmung des Th-228-Gehalts über die Gammalinien der Radionuklide Pb-212 und Tl-208, muss Rn-220 in der Probenmatrix verbleiben, was durch seine geringe Halbwertszeit von 55,8 Sekunden im Allgemeinen gegeben ist. Vorzugsweise wird die Gammalinie des Pb-212 bei 238,6 keV zur Auswertung herangezogen, wobei Koinzidenzsummutationskorrekturen in jedem Fall erforderlich sind [2].

Tab. 7: Kernphysikalische Daten der auszuwertenden Radionuklide und der Störnuklide zur gammaspektrometrischen Bestimmung des Th-228-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	E_γ	p_γ	Störnuklid	E_γ	p_γ
	in keV	in %		in keV	in %
Ra-224	240,99	4,12	Pb-214	242,00	7,27
Pb-212	238,63	43,60	Th-227	300,50	0,014
	300,09	3,18		300,06	2,41
			Pa-231		
Tl-208	277,37	2,37	Ac-228	278,80	0,235
	583,19	30,54	Ac-228	583,39	0,120
	860,53	4,46			
	2614,51	35,84			

4.9 Kalium-40

Kalium-40 (K-40) ist im Isotopengemisch des natürlichen Kaliums (K-39, K-40, K-41) zu 0,0117 Massenprozent enthalten und zerfällt mit einer Halbwertszeit von $1,25 \cdot 10^9$ Jahren zu Ca-40 (β^- -Zerfall) bzw. Ar-40 (Elektroneneinfang). K-40 wird gammaspektrometrisch über seine 1460,8-keV-Linie bestimmt (siehe Abbildung 4).

Die in Tabelle 8 ausgewiesene Störung durch Ac-228 muss beispielsweise bei der Bestimmung der spezifischen Aktivität in Klärschlamm und/oder in verschiedenen NORM-Stoffen, in denen im Gegensatz zu Umweltproben erhöhte spezifische Ra-228-Aktivitäten im Vergleich zum K-40 auftreten, berücksichtigt werden.

Tab. 8: Kernphysikalische Daten des auszuwertenden Radionuklids und des Störnuklids bei der gammaspektrometrischen Bestimmung des K-40-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	E_γ	p_γ	Störnuklid	E_γ	p_γ
	in keV	in %		in keV	in %
K-40	1460,82	10,55	Ac-228	1459,13	0,87

Anhang A

Kernphysikalische Daten ausgewählter Radionuklide

Bezugsquellen für aktuelle kernphysikalischen Daten werden im Allgemeinen Kapitel KERNDATEN dieser Messanleitungen benannt [5]. In Tabelle A1 sind für ausgewählte natürliche Radionuklide die Gammaphotonenenergien im Energiebereich oberhalb von 25 keV und die zugehörigen, verzweigungskorrigierten Emissionsintensitäten zusammengestellt. Die Röntgenlinien sind hinsichtlich der Emissionsintensitäten nicht verzweigungskorrigiert; dies wird durch ein "*" hinter der Emissionsintensität dargestellt.

Anmerkung:

Die Emissionsintensitäten der charakteristischen Röntgenphotonen gelten für die entsprechenden Kernumwandlungen. Es ist zu beachten, dass charakteristische Röntgenstrahlung auch als Fluoreszenzstrahlung auftreten kann. Bei Aktivitätsbestimmungen natürlicher Radionuklide in Umweltproben ist der Beitrag der Fluoreszenzstrahlung zu den Nettozählraten jedoch in den meisten Fällen vernachlässigbar.

In der Spalte „Sonstige“ sind zusätzlich künstliche Radionuklide, die im Allgemeinen in Kalibrierstandards verwendet werden, und Aktivierungsprodukte, die durch Neutronen aus kosmischer Strahlung in der Messeinrichtung erzeugt werden können [3: Abschnitt 2, 5], genannt.

Tab. A1: Photonenenergien und Emissionsintensitäten ausgewählter Radionuklide

Linie	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige	
E_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ bzw. Ursprung
in keV										
25,64	Bi-212	0,00107	Pb-210	0,0425	Th-231	0,139	Th-227	0,082	Ba-133	0,0214
39,86										
46,54										
50,13										
53,16										
53,20					U-234	0,00125				
53,23			Pb-214	0,0106					Ge-73m	(n, γ)
53,47										
57,75	Ac-228	0,0047							Am-241	0,359
59,54										
63,30					Th-234	0,0375				
63,81	Th-232	0,00259								
66,75									Ge-73m	(n, γ)
67,67					Th-230	0,00377				
72,80	Pb-K α 2	0,0077*								
72,87							Tl-K α 1	0,01225*		
74,82	Bi-K α 2	0,107*	Bi-K α 2	0,0626*						
74,97	Pb-K α 1	0,0361*								

Linie E_γ in keV	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige	
	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ bzw. Ursprung
76,86			Po-K α 2	0,00426*						
77,11	Bi-K α 1	0,177*								
79,29			Po-K α 1	0,00710*						
79,61									Ba-133	0,0263
79,72							Th-227	0,0189		
81,00									Ba-133	0,333
81,07	Rn-K α 2	0,0013	Rn-K α 2	0,00192*			Rn-K α 2	0,150*		
83,78	Rn-K α 1	0,00215	Rn-K α 1	0,00317*			Rn-K α 1	0,249*		
84,21					Th-231	0,0670				
84,37	Th-228	0,0119								
84,94	Pb-K α 1	0,0117*								
85,43							Ra-K α 2	0,0017*		
87,34	Bi-K α 1	0,0612*								
88,03									Cd-109	0,0366
88,47							Ra-K α 1	0,0028*		
89,81			Po-K α 1	0,00245*						
89,95	Th-K α 2	0,025*								
92,38					Th-234	0,0218				
92,80					Th-234	0,0215				
93,35	Th-K α 1	0,041*								
93,93							Th-227	0,0137		
94,86			Rn-K α 1	0,198*			Rn-K α 1	0,0870*		
96,73									Se-75	0,0335
97,90							Rn-K α 2	0,0280*		
99,51	Ac-228	0,0126								
102,27					Th-231	0,00441				
105,31									Eu-155	0,211
105,60	Th-K α 1	0,00155*								
109,19					U-235	0,0166				
109,70									F-19	(n,n', γ)
112,81					Th-234	0,00215				
115,18	Pb-212	0,00624								
121,12									Se-75	0,169
122,06									Co-57	0,855
122,32							Ra-223	0,0124		
129,07	Ac-228	0,0250								
136,00									Se-75	0,577
136,47									Co-57	0,107
139,20									Ge-75m	(n, γ)
143,77					U-235	0,109				
144,27							Ra-223	0,0336		
145,44									Ce-141	0,483
145,84	Ac-228	0,00169								
153,97	Ac-228	0,00754								
154,21							Ra-223	0,0584		

Linie E_γ in keV	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige	
	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ bzw. Ursprung
159,50									Ge-77m	(n, γ)
160,61									Ba-133	0,00638
163,36					U-235	0,0508				
174,88									Ge-71m	(n, γ)
185,72					U-235	0,570				
186,01			Ra-226	0,0356					Cu-66	(n, γ)
186,20									Ge-70m	(n, γ)
191,35	Ac-228	0,00133								
197,90									Ge-71m	(n, γ)
198,61									Se-75	0,0146
202,12					U-235	0,0108				
205,32					U-235	0,0502				
209,25	Ac-228	0,0397								
210,65							Th-227	0,0111		
215,51									Ge-77	(n, γ)
223,24									Ba-133	0,00450
235,96							Th-227	0,126		
238,63	Pb-212	0,436								
240,99	Ra-224	0,0412								
242,00			Pb-214	0,0727						
256,23							Th-227	0,070		
258,87			Pb-214	0,00532						
264,66									Se-75	0,588
269,46							Ra-223	0,142		
270,25	Ac-228	0,0355								
271,23							Rn-219	0,111		
274,80			Pb-214	0,00362						
276,40									Ba-133	0,0713
277,37	Tl-208	0,0237								
278,24									Cu-64	(n, γ)
278,80	Ac-228	0,00235								
279,20									Hg-203	0,815
279,54									Se-75	0,249
283,69					Pa-231	0,0165				
286,12							Th-227	0,0154		
288,18	Bi-212	0,0032								
295,22			Pb-214	0,184						
300,05							Th-227	0,000140		
300,06					Pa-231	0,0241				
300,09	Pb-212	0,0318			Pa-231	0,023				
302,67										
302,85									Ba-133	0,183
303,92									Se-75	0,0131
304,52							Th-227	0,012		
320,08									Cr-51	0,0989

Linie E_γ in keV	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige	
	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ bzw. Ursprung
321,65	Ac-228	0,00232								
323,87							Ra-223	0,0406		
328,04	Bi-212	0,00121								
328,00	Ac-228	0,0304								
329,85							Th-227	0,027		
330,04					Pa-231	0,0136				
332,37	Ac-228	0,0037								
334,38							Th-227	0,0105		
338,28							Ra-223	0,0285		
338,32	Ac-228	0,1140								
340,97	Ac-228	0,00405								
351,03							Bi-211	0,130		
351,93			Pb-214	0,356						
356,01									Ba-133	0,621
383,85									Ba-133	0,089
386,77			Bi-214	0,00296						
388,88			Bi-214	0,00394						
400,66									Se-75	0,114
401,81							Rn-219	0,0675		
404,83							Pb-211	0,0383		
409,46	Ac-228	0,0202								
427,15							Pb-211	0,0181		
445,03							Ra-223	0,0128		
452,98	Bi-212	0,00340								
454,77			Bi-214	0,00288						
463,00	Ac-228	0,0445								
475,37									Cs-134	0,0148
477,60									Be-7	0,104
480,43			Pb-214	0,00337						
487,09			Pb-214	0,00433						
503,82	Ac-228	0,00171								
508,96	Ac-228	0,00510								
510,74	Tl-208	0,0808								
558,46									Cd-114	(n, γ)
562,50	Ac-228	0,00890								
563,25									Cs-134	0,0834
569,33									Cs-134	0,154
570,88	Ac-228	0,00190								
580,13			Pb-214	0,00369						
583,19	Tl-208	0,305								
583,39	Ac-228	0,00120								
595,85									Ge-74	(n,n', γ)
600,70									Ge-74	(n,n', γ)
604,72									Cs-134	0,976
608,35									Ge-74	(n,n', γ)

Linie E_γ in keV	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige	
	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ bzw. Ursprung
609,31			Bi-214	0,455						
651,26									Cd-114	(n, γ)
661,66									Cs-137	0,850
665,45			Bi-214	0,0153						
669,60									Cu-63	(n,n', γ)
693,40									Ge-72	(n,n', γ)
703,11			Bi-214	0,00479						
719,86			Bi-214	0,00393						
726,88	Ac-228	0,00680								
727,33	Bi-212	0,0665								
755,31	Ac-228	0,0103								
763,45	Tl-208	0,0647								
765,80									Nb-95	0,998
766,36					Pa-234m	0,00323				
768,36			Bi-214	0,0489						
772,29	Ac-228	0,0152								
782,14	Ac-228	0,00500								
785,37	Bi-212	0,0111								
785,96			Pb-214	0,0106						
794,94	Ac-228	0,0431								
795,86									Cs-134	0,855
801,95									Cs-134	0,0869
803,00									Pb-206	(n,n', γ)
805,89									Cd-114	(n, γ)
806,17			Bi-214	0,0126						
830,48	Ac-228	0,00610								
831,98							Pb-211	0,0350		
834,85									Mn-54	0,9998
835,70	Ac-228	0,0170								
839,04			Pb-214	0,00587						
840,37	Ac-228	0,00970								
860,53	Tl-208	0,0446								
867,90									Ge-74	(n, γ)
893,41	Bi-212	0,0038								
904,20	Ac-228	0,0078								
911,20	Ac-228	0,262								
934,06			Bi-214	0,0310						
962,00									Cu-63	(n,n', γ)
964,79	Ac-228	0,0499								
968,96	Ac-228	0,159								
1001,03					Pa-234m	0,00847				
1038,61									Cs-134	0,00991
1051,96			Bi-214	0,00324						
1063,60									Pb-207	(n,n', γ)
1078,63	Bi-212	0,00550								

Linie E_γ in keV	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige																									
	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ	Nuklid	p_γ bzw. Ursprung																								
1115,54			Bi-214	0,149					Cu-65	(n,n', γ)																								
1120,29									Ge-(75)	(n, γ)																								
1127,80																																		
1155,19											Bi-214	0,0164																						
1167,97													Cs-134	0,0179																				
1173,23															Co-60	0,9985																		
1207,68																																		
1238,11																	Bi-214	0,00454																
1247,10																			Bi-214	0,0583														
1280,96																					Bi-214	0,0144												
1327,00																																		
1332,49																							Cu-63	(n,n', γ)										
1365,19																									Co-60	0,9998								
1377,67																											Cs-134	0,0302						
1385,31																													Bi-214	0,0397				
1401,50																															Bi-214	0,00795		
1407,98																																	Bi-214	0,0133
1412,00																																		
1459,13	Cu-63	(n,n', γ)																																
1460,82			K-40	0,106																														
1495,90																																		
1501,59																																		
1509,23																																		
1512,70																																		
1538,50																																		
1543,32																																		
1580,53																																		
1583,22																																		
1588,20																																		
1599,31																																		
1620,74																																		
1630,62																																		
1638,27																																		
1661,28																																		
1729,60																																		
1764,49																																		
1838,36																																		
1847,42																																		
2118,55																																		
2204,21																																		
2293,40																																		
2447,86																																		
2614,51	Ac-228	0,00524	Bi-214	0,0144																														
	Ac-228	0,00870																																
	Ac-228	0,00920																																
	Ac-228	0,00513																																
			Bi-214	0,0213																														
	Bi-212	0,00290																																
			Bi-214	0,00401																														
			Bi-214	0,0302																														
	Ac-228	0,00620																																
			Bi-214	0,00707																														
	Ac-228	0,0306																																
			Bi-214	0,00322																														
	Bi-212	0,0151																																
	Ac-228	0,0152																																
	Ac-228	0,0046																																
			Bi-214	0,0105																														
			Bi-214	0,0284																														
			Bi-214	0,1531																														
			Bi-214	0,0034																														
			Bi-214	0,0203																														
			Bi-214	0,0116																														
			Bi-214	0,0491																														
			Bi-214	0,0031																														
			Bi-214	0,0155																														
	Tl-208	0,358																																

Literatur

- [1] *Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung bei bergbaulichen Tätigkeiten (REI-Bergbau)* vom 10.11.2020. Verfügbar unter: https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/fachinfo/ion-altlasten/rei-bergbau.pdf?__blob=publicationFile&v=3. [Letzter Zugriff am 21.08.2024].
- [2] Arnold, D., Debertin, K., Heckel, A., Kanisch, G., Wershofen, H., Wilhem, C.: *Grundlagen der Gammaskpektrometrie*. γ -SPEKT/GRUNDL, Version März 2018. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, (Hrsg.): Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung. ISSN 1865-8725. Verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/WS1517>. [Letzter Zugriff am 27.10.2023].
- [3] Arnold, D., Heckel, A., Wershofen, H.: *Nulleffektbeiträge in der Gammaskpektrometrie*. γ -SPEKT/NULLEF, Version Juni 2019. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, (Hrsg.): Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung. ISSN 1865-8725. Verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/WS1517>. [Letzter Zugriff am 21.08.2024].
- [4] Kanisch, G., Mundschenk, H., Schkade, U.-K., Wershofen, H.: *Interferenzen bei der Gammaskpektrometrie*. γ -SPEKT/INTERF, Version März 2019. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, (Hrsg.): Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung. ISSN 1865-8725. Verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/WS1517>. [Letzter Zugriff am 21.08.2024].
- [5] Heckel, A., Wershofen, H.: *Kernphysikalische Daten*. KERNDATEN, Version November 2024. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, (Hrsg.): Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung. ISSN 1865-8725. Verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/WS1517>. [Letzter Zugriff am 22.08.2024].
- [6] Arnold, D., Kanisch, G., Wershofen, H.: *Summations- und Escapelinien ausgewählter Radionuklide in der Gammaskpektrometrie*. γ -SPEKT/SUMESC, Version November 2018. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, (Hrsg.): Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung. ISSN 1865-8725. Verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/WS1517>. [Letzter Zugriff am 21.08.2024].