

Nulleffektbeiträge in der Gammaskpektrometrie

γ -SPEKT/NULLEF

Bearbeiter:

D. Arnold²

A. Heckel¹

H. Wershofen²

¹Bundesamt für Strahlenschutz

²Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Nulleffektbeiträge in der Gammaskpektrometrie

1 Einleitung

Der Nulleffekt einer Aktivitätsbestimmung ist derjenige Beitrag zum Impulshöhenspektrum, der nicht von der Aktivität der Radionuklide im Messpräparat herrührt. In Anlehnung an den englischen Begriff „background“ wird anstelle des Begriffs Nulleffekt auch der Begriff Untergrund verwendet. Er besteht aus einem sogenannten Detektornulleffekt, d. h. einem Beitrag der Gammaskpektrometriemesseinrichtung und der Umgebung, sowie einem Beitrag aus dem Messpräparat, bestehend aus Messgefäß und Messgut.

Für Aktivitätsbestimmungen von radioaktiven Stoffen ist die Auswertung der Nettozählraten von Gammalinien im Nulleffektspektrum unerlässlich. Diese müssen bei der Auswertung des Impulshöhenspektrums der Probe berücksichtigt werden. Des Weiteren beeinflussen sowohl die Nettozählraten von Nulleffektlinien als auch das Kontinuum des Nulleffektspektrums die erreichbaren Nachweisgrenzen bei der Aktivitätsbestimmung. Im Allgemeinen sollten die Impulshöhenspektren des Nulleffekts mindestens so lang wie die Impulshöhenspektren der Probe gemessen und in zweckmäßigen Abständen wiederholt werden. Weitergehende Informationen sind dem Allgemeinen Kapitel γ -SPEKT/GRUNDL dieser Messanleitungen zu entnehmen.

Details zu den im Impulshöhenspektrum des Nulleffekts auftretenden Linien und zur Abhängigkeit der Nulleffektspektren vom verwendeten Detektor- bzw. Spektromertyp werden im Folgenden beschrieben. Dagegen werden mögliche Interferenzen von Nulleffektbeiträgen mit Gammalinien von zu bestimmenden Radionukliden im Allgemeinen Kapitel γ -SPEKT/INTERF dieser Messanleitungen behandelt.

Anmerkung:

Der Stand aller kernphysikalischen Daten dieses Allgemeinen Kapitels ist Juni 2018. Für aktuelle Daten wird auf das Allgemeine Kapitel KERNDATEN dieser Messanleitungen verwiesen.

2 Ursprung von Nulleffektbeiträgen

Nulleffektbeiträge lassen sich aufgrund ihrer Herkunft in vier Gruppen unterteilen:

— Radon-Folgeprodukte (Gruppe 1):

Diese Linien treten insbesondere dann auf, wenn sich innerhalb der Detektorabschirmung ein größeres Luftvolumen befindet. Ihre Intensität schwankt entsprechend der Radonkonzentration der Raumluft. Die im Innenraum der Abschirmung verbleibende Luft trägt daher zum Untergrund bei (Pb-214, Bi-214 als Radonfolgeprodukte), wenn sie nicht z. B. durch Spülung mit dem aus dem Dewarbehälter entweichenden Stickstoff verdrängt wird.

— Radionuklide, die in Bauteilen des Detektors und seiner Abschirmung enthalten sind (Gruppe 2):

Hierzu gehören die primordialen Radionuklide K-40, U-238, U-235 und Th-232 mit ihren kurzlebigen Folgeprodukten sowie Ra-226, Pb-210 mit Folgeprodukten,

aber auch Co-60, das eventuell als Kontamination in Baumaterialien auftreten kann.

- Aktivierungsprodukte (Gruppe 3):
Neutronen aus der kosmischen Strahlung erzeugen im Detektor selbst, seinen Bauteilen und seiner Abschirmung kurzlebige Radionuklide. Hierzu gehören u. a. Ge-71m, Ge-73m, Ge-75m, Cu-63, Cu-64, Cu-65.
- Inelastische Neutronenstreuung (Gruppe 4):
Außerdem können durch $(n,n'\gamma)$ -Reaktionen im Germanium sägezahnartig verbreiterte Linien entstehen, wenn sich die variable Rückstoßenergie zur Energie des Gammaübergangs addiert.

Messungen des Nulleffektes sollten wiederkehrend erfolgen, um die spezifische Aktivität bzw. Aktivitätskonzentration natürlicher Radionuklide in Umweltproben gerade bei niedrigen Aktivitätsgehalten zuverlässig messen zu können. Der Untergrund der Messanordnungen muss daher durch geeignete Maßnahmen, z. B. Befreiung der Abschirmung von Staub mittels fusselfreier und mit destilliertem Wasser angefeuchteter Tücher, so niedrig und vor allem so stabil wie möglich gehalten werden. Zur Stabilisierung der Nulleffektbeiträge der Radon-Folgeprodukte kann eine Zwangsbelüftung des Messraums beitragen, wobei zu beachten ist, dass die angesaugte Außenluft infolge der Bodenerwärmung – vor allem beim Auftauen des Bodens im Frühjahr – viel Radon enthalten kann. Zur Vertiefung des Themas und für Information über weitere Möglichkeiten zur Reduktion von Nulleffektbeiträgen in Impulshöhenspektren, z. B. zum Betrieb von Gammaskpektrometriemesseinrichtungen in Untertagelaboratorien, wird auf die Literatur (1) bis (17) verwiesen.

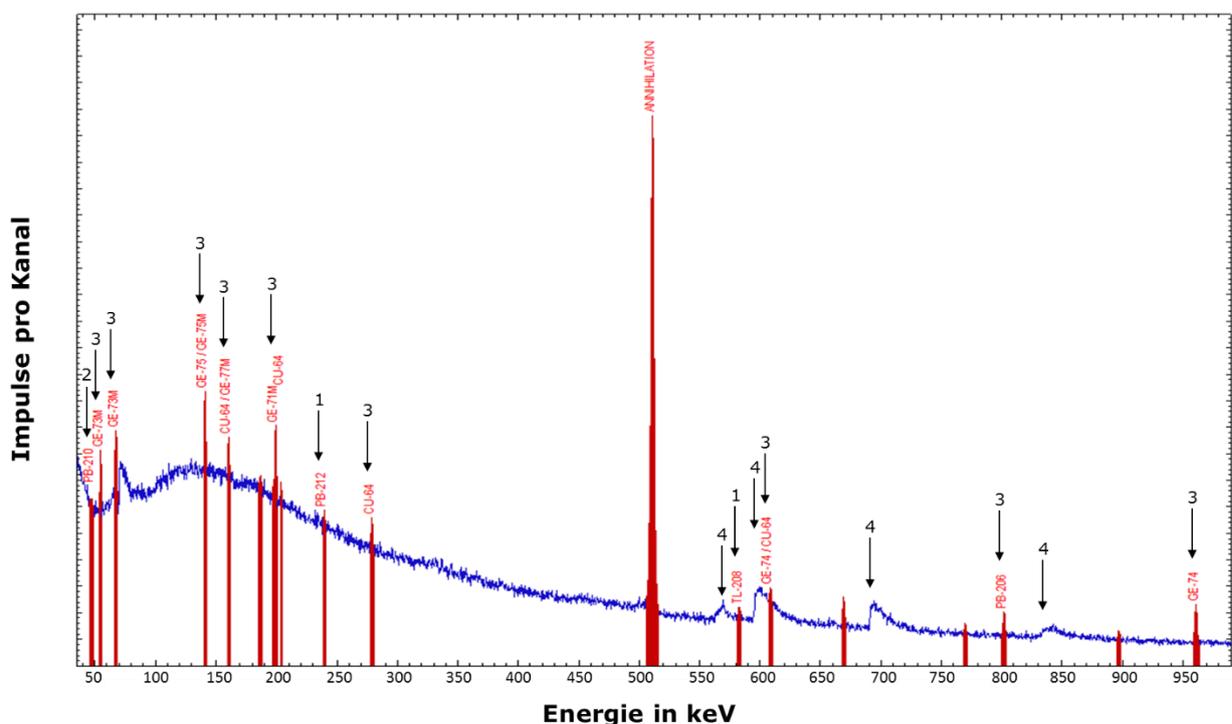


Abb. 1: Ausschnitt eines Impulshöhenspektrums mit Beispielen für die vier Liniengruppen, wobei die Nulleffektbeiträge der Gruppe 3 und der Gruppe 4 dominieren, während Linien der Gruppe 4 nur noch schwach erkennbar sind. (Messung mit Detektor Nr. 6 ohne Messgefäß, Messdauer $3,25 \cdot 10^5$ s).

Abbildung 1 zeigt typische Nulleffektbeiträge im Energiebereich zwischen 35 keV und ca. 970 keV. Das Impulshöhenspektrum wurde mit der in Tabelle 1 beschriebenen Low-level-Gammaspektrometriemesseinrichtung „Detektor Nr. 6“ aufgenommen.

Tab. 1: Für die Messung der in den Abbildungen gezeigten Impulshöhenspektren eingesetzten Messanordnungen

Detektor-nummer	Detektorspezifikation	Besonderheit
3	<ul style="list-style-type: none"> — HPGe-Bohrlochdetektor — empfindliches Volumen: 190 cm³ — relative efficiency (ϵ_{rel}): 41 % — Endkappe aus Aluminium 	<ul style="list-style-type: none"> — 20 cm dicke Pb-210-arme Bleiabschirmung mit Innenabschirmung aus 0,5 cm dickem Elektrolytkupfer — Spülung mit gasförmigem Stickstoff — Betrieb in einem Kellerraum
5	<ul style="list-style-type: none"> — HPGe-Detektor — empfindliches Volumen: 50 cm³ — Endkappe aus Aluminium mit Beryllium-Fenster 	<ul style="list-style-type: none"> — „reversed electrode“ — 10 cm dicke Pb-210-arme Bleiabschirmung mit Innenabschirmung aus 10 mm dickem Elektrolytkupfer als Absorber für Röntgenphotonen — Betrieb in begehbare Messkammer aus 10 cm dickem Pb-210-armen Blei
6	<ul style="list-style-type: none"> — HPGe-Detektor — empfindliches Volumen: 202 cm³ — relative efficiency (ϵ_{rel}): 50 % — Endkappe aus Aluminium 	<ul style="list-style-type: none"> — 20 cm dicke Pb-210-arme Bleiabschirmung mit Innenabschirmung aus 0,5 cm dickem Elektrolytkupfer — Spülung mit gasförmigem Stickstoff
7	<ul style="list-style-type: none"> — semiplanarer HPGe-Detektor — empfindliches Volumen: 30 cm³ (Fläche: 2000 mm², Dicke: 15 mm) — Endkappe aus Elektrolytkupfer mit uranarmen Beryllium-Fenster 	<ul style="list-style-type: none"> — besonders empfindlich im Energiebereich von 10 keV bis 100 keV, — 10 cm dicke Pb-210-arme Bleiabschirmung mit Innenabschirmung aus 10 mm dickem Elektrolytkupfer als Absorber für Röntgenphotonen — Betrieb in begehbare Messkammer aus 10 cm dickem Pb-210-armen Blei
10	<ul style="list-style-type: none"> — Koaxialer HPGe-Detektor — empfindliches Volumen: 311 cm³ — relative efficiency (ϵ_{rel}): 82 % — Endkappe: Aluminium 	<ul style="list-style-type: none"> — 20 cm dicke Pb-210-arme Bleiabschirmung mit Innenabschirmung aus 0,5 cm dickem Elektrolytkupfer — Spülung mit gasförmigem Stickstoff

Anmerkung:

Für den Aufbau einer Standardabschirmung wird auf (1) verwiesen.

3 Beitrag des Detektornulleffekts

Im Allgemeinen bezeichnet der Detektornulleffekt die Beiträge aus der Messeinrichtung und der Umgebung.

Die Komponenten in der Nähe des Detektors sollten aus Materialien bestehen, die möglichst frei von radioaktiven Verunreinigungen sind. Als systematisch nach Materialien mit geringer Eigenaktivität natürlicher Radionuklide für den Bau von Detektor-komponenten gesucht wurde, wurden die in Abbildung 2 dargestellten historischen Impulshöhenspektren aufgenommen.

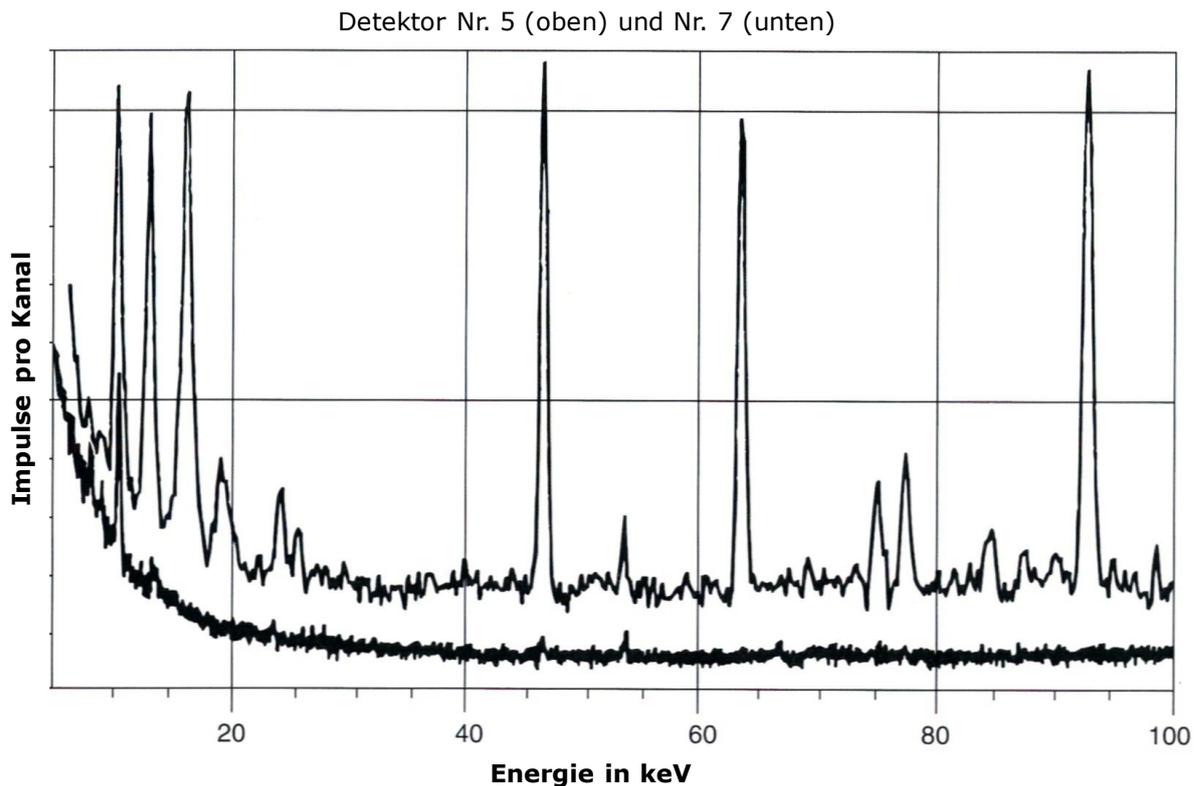


Abb. 2: Impulshöhenspektren des Detektornulleffektes im Energiebereich unter 100 keV, gemessen mit zwei unterschiedlichen Detektoren (Detektor Nr. 5, und Detektor Nr. 7) mit weitgehend baugleicher Abschirmung.

Die Unterschiede in den beiden Spektren ergeben sich aus den unterschiedlichen Detektormaterialien. Im Energiebereich von 40 keV bis 100 keV dominiert der Einfluss von Verunreinigungen mit natürlichen Radionukliden in der Endkappe des Detektors Nr. 5. Die Gammalinien unterhalb von 40 keV gehen im Wesentlichen auf Aktivierungsprodukte (Gruppe 3) zurück. Im Gegensatz dazu wird aufgrund der Materialien seiner Endkappe mit dem Detektor Nr. 7 hauptsächlich die Röntgenlinie bei der Energie von 10,4 keV nachgewiesen. Diese entsteht als Summenlinie aller Röntgen-K-, L- und -M-Fluoreszenzphotonen des stabilen Gallium-71.

Der Effekt einer Bleiabschirmung auf den Detektornulleffekt wird in Abbildung 3 verdeutlicht.

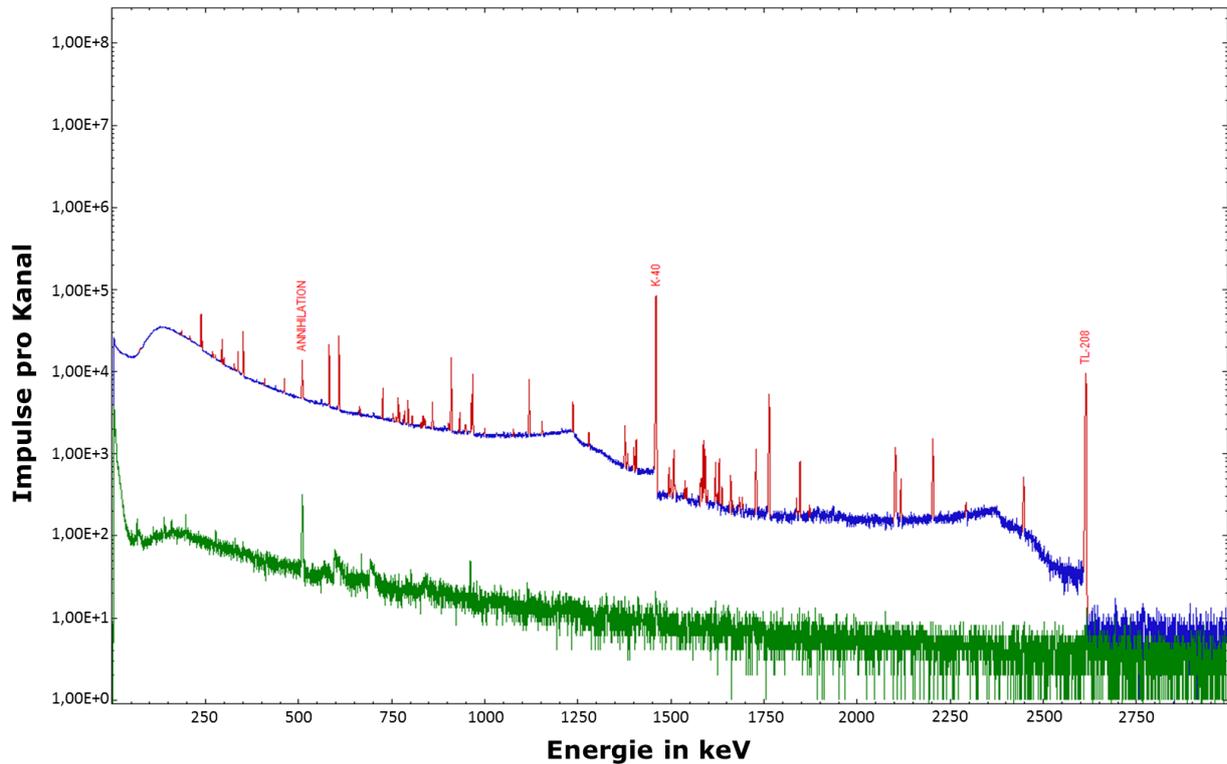


Abb. 3: Impulshöhenspektren des Detektornulleffektes (Detektor Nr. 3) im Energiebereich von ca. 5 keV bis ca. 3000 keV, gemessen zum einen ohne Abschirmung (blau) und zum anderen mit einer Abschirmung gemäß Tabelle 1 (grün) bei nahezu gleicher Messdauer. Die Spektren sind auf die Messdauer normiert dargestellt.

Im Impulshöhenspektrum ohne Abschirmung sind 77 Linien deutlich erkennbar, während es im Impulshöhenspektrum mit Abschirmung nur noch 26 Linien sind. Eine Auswahl dieser Linien ist in Tabelle 2 zusammengestellt. Die Intensitäten der Linien sind mit Abschirmung deutlich geringer; Linien der Gruppe 4 werden durch die Abschirmung überhaupt erst sichtbar.

Tab. 2: Vergleich der Zählraten ausgewählter Nulleffektlinien, gemessen mit Detektor Nr. 3 (siehe Tabelle 1)
 (a) ohne Abschirmung
 (b) mit Abschirmung

Energie der Linie in keV	Radionuklid	Zählrate in s ⁻¹	
		(a)	(b)
186,03*	Cu-65, Ra-226, U-235	1,02E-00	2,49E-03
197,89	Ge-71m	n. n.	6,77E-03
209,16	Ac-228	6,63E-01	–
238,63	Pb-212	1,31E+00	–
242,00	Pb-214	7,53E-01	–
270,25	Ac-228	6,33E-01	–
295,22	Pb-214	8,52E-01	–
300,09	Pb-212	4,61E-01	–
328,00	Ac-228	3,96E-01	–
338,32	Ac-228	6,40E-01	–
351,93	Pb-214	8,43E-01	–
463,00	Ac-228	2,58E-01	–
511,00	Annihilation	6,72E-01	–
583,19	Tl-208	5,31E-01	–
609,26*	Ge-73, Bi-214	6,57E-01	1,75E-03
669,70	Cu-63	n. n.	1,38E-03
727,33	Bi-212	2,01E-01	–
768,36	Bi-214	1,99E-01	–
794,94	Ac-228	1,62E-01	–
860,53	Tl-208	1,60E-01	–
911,20	Ac-228	3,81E-01	–
934,06	Bi-214	1,15E-01	–
964,79	Ac-228	1,46E-01	–
962,68	Cu-63	n. n.	1,50E-03
968,96	Ac-228	2,46E-01	–
1115,48	Cu-65	n. n.	7,20E-04
1120,29	Bi-214	2,50E-01	–
1238,11	Bi-214	1,59E-01	–
1377,67	Bi-214	8,16E-02	–
1407,98	Bi-214	6,77E-02	–
1417,70	Cu-63	n. n.	5,29E-04
1460,82	Ka-40	2,17E+00	5,26E-04
1509,23	Bi-214	3,76E-02	–

Energie der Linie in keV	Radionuklid	Zählrate in s ⁻¹	
		(a)	(b)
1588,20	Ac-228	1,20E-01	4,00E-04
1592,51	Th (Double Escape)**	4,12E-02	–
1729,60	Bi-214	3,94E-02	–
1764,49	Bi-214	1,55E-01	–
1847,42	Bi-214	2,87E-02	–
2103,51	Th (Single Escape**)	5,42E-02	–
2204,21	Bi-214	5,41E-02	–
2614,51	Tl-208	3,17E-01	4,86E-04

* Lage der Linie, die sich auch einzelnen Gammalinien zusammensetzt, die nicht aufgelöst werden können.

** siehe Allgemeines Kapitel γ -SPEKT/SUMESC dieser Messanleitungen.

n.n. nicht nachweisbar

Durch kosmische Strahlung induzierte Linien lassen sich weiter unterdrücken, wenn die Gammaskopfmessungseinrichtung beispielsweise in einem Untertagelabor betrieben wird (4, 17). Dieser Effekt wird in Abbildung 4 veranschaulicht. Die vier gezeigten Nulleffektspektren wurden mit Detektor Nr. 10 jeweils mit und ohne Abschirmung in einem Kellerraum bzw. in einem Untertagelabor im ehemaligen Salzbergwerk Asse II aufgenommen.

Anmerkung:

Das Untertagelabor befand sich auf der 925-m-Sohle des ehemaligen Salzbergwerkes Asse II. Die Gamma-Ortsdosisleistung betrug dort nur ca. 1 % der im Freien an der Erdoberfläche gemessenen Ortsdosisleistung. Die Intensität der Myonenkomponente der kosmischen Höhenstrahlung war um mehr als fünf Größenordnungen geringer (17).

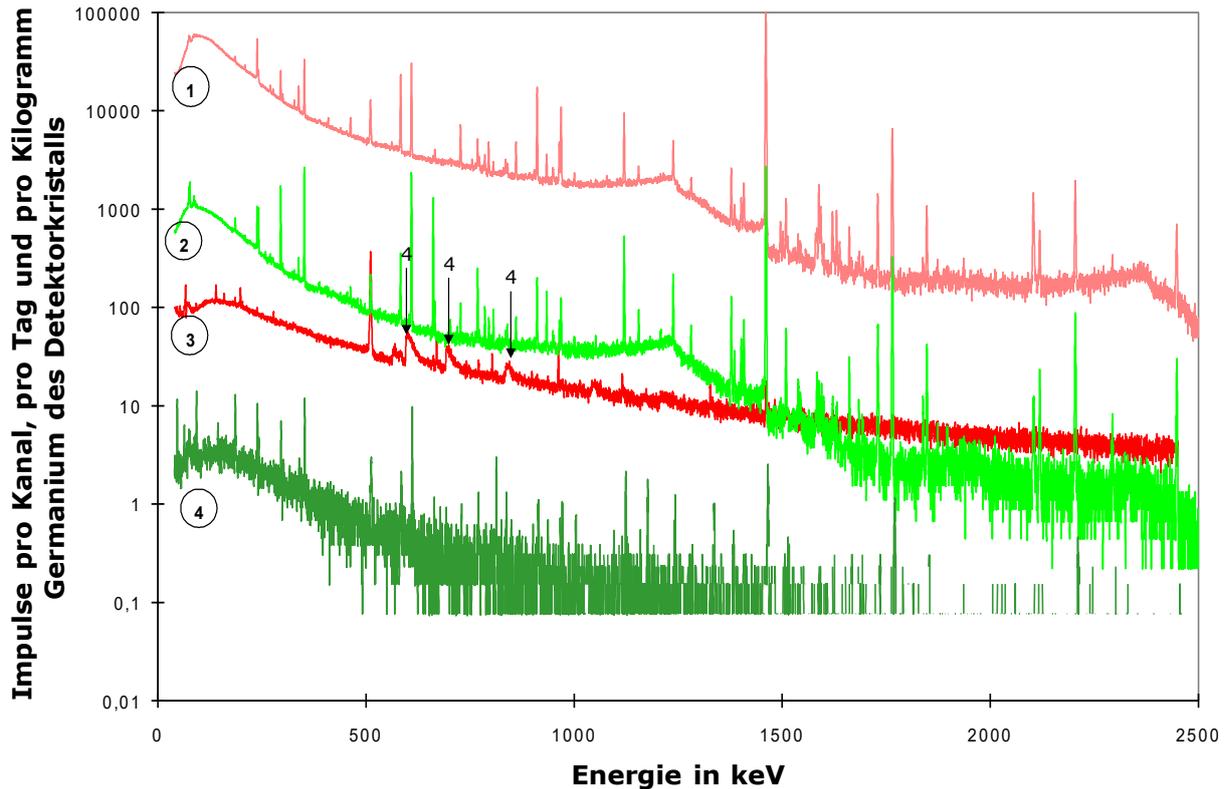


Abb. 4: Impulshöhenspektren aufgenommen mit Detektor Nr. 10.
 „1“: ohne Abschirmung im Kellerraum,
 „2“: ohne Abschirmung im Untertagelabor,
 „3“: mit Abschirmung im Kellerraum,
 „4“: mit Abschirmung im Untertagelabor.

In Abbildung 4 fallen besonders die Unterschiede zwischen den Spektren „3“ und „4“ auf: Die im Spektrum „3“ deutlich hervortretenden Nulleffektlinien der Gruppe 4 entstehen durch Wechselwirkung der kosmischen Höhenstrahlung mit dem Germanium des Detektorkristalls und sind aufgrund der abschirmenden Wirkung des Deckgebirges im Spektrum „4“ nicht mehr erkennbar.

4 Beiträge des Messpräparates

Auch das Messpräparat, bestehend aus Messgefäß und Messgut, kann zum Impulshöhenspektrum des Nulleffekts beitragen.

Zur Veranschaulichung dieses Beitrags wurden mit der Gammaskpektrometriemess-einrichtung „Detektor Nr. 6“ zwei Nulleffektmessungen mit besonders langer, vergleichbarer Messdauer von etwa $2,5 \cdot 10^6$ s durchgeführt:

- Messung des Beitrags aus dem Detektornulleffekt („Det.-NE“);
- Messung des Beitrags aus dem Detektornulleffekt und des Beitrags aus dem Messpräparat bestehend aus 1 l destilliertem Wasser in einer 1-l-Ringschale („H₂O-NE“).

In den Abbildungen 5 bis 8 sind die sich eigentlich überlagernden Impulshöhenspektren zur besseren Darstellung der einzelnen Effekte gegeneinander verschoben gezeigt und daher nur qualitativ vergleichbar. Die Abbildungen 6 bis 8 zeigen ausgewählte Energiebereiche der in Abbildung 5 gezeigten Nulleffektspektren, um dicht nebeneinander liegende Linien besser unterscheiden zu können.

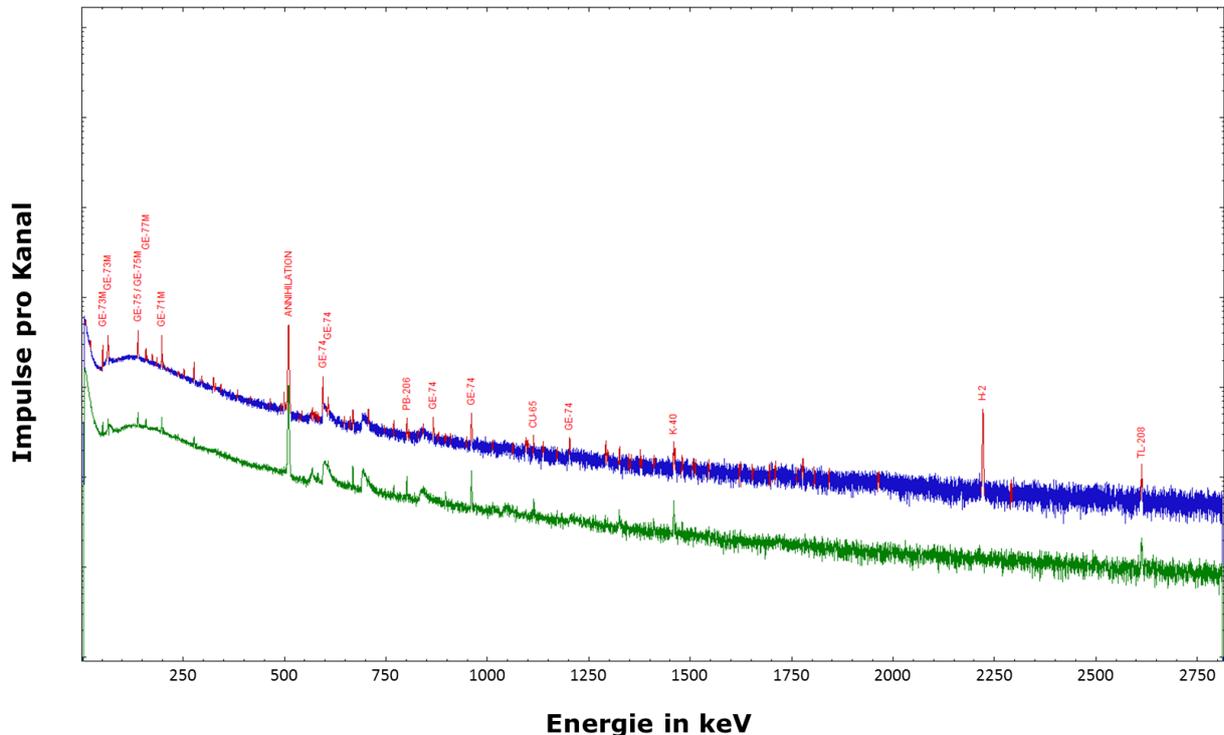


Abb. 5: Logarithmische Darstellung der Impulshöhenspektren des Nulleffekts „Det.-NE“ (grün) und „H₂O-NE“ (blau).

Der Einfluss, den ein Liter destilliertes Wasser auf das Impulshöhenspektrum eines Nulleffekts hat, wird in Abbildung 5 deutlich:

- Das Wasser schirmt ab.
- Das Wasser moderiert Neutronen der kosmischen Höhenstrahlung.

Als Folge davon werden die Linien verstärkt, die durch Neutronenwechselwirkungen im Germaniumkristall selbst und in den ihn umgebenden Materialien erzeugt werden. Bei diesen Linien handelt es sich meist um Linien, die nach einer n, γ oder $n, n' \gamma$ Reaktion durch prompte oder verzögerte Gammaphotonen erzeugt werden. Diese Linien sind meist nicht in den gängigen Datenbanken für kernphysikalische Daten enthalten. Kernphysikalische Daten zur Zuordnung und Interpretation von Aktivierungslinien und prompten Gammalinien sind im Internet verfügbar (12, 13).

Gleichzeitig werden mit dem „H₂O-NE“ Linien erfasst, die bei einem Impulshöhenspektrum, das nur den Detektornulleffekt abbildet, nicht auftreten, abgeschwächt oder verstärkt werden.

In Abbildung 6 werden die Moderatoreffekte des Wassers im Energiebereich von 15 keV bis 210 keV eines Impulshöhenspektrums verdeutlicht. Besonders auffällig ist dieser Effekt im Fall der Ge-71-Gammalinie bei 174,9 keV, die nur im blauen „H₂O-NE“-Spektrum auftritt.

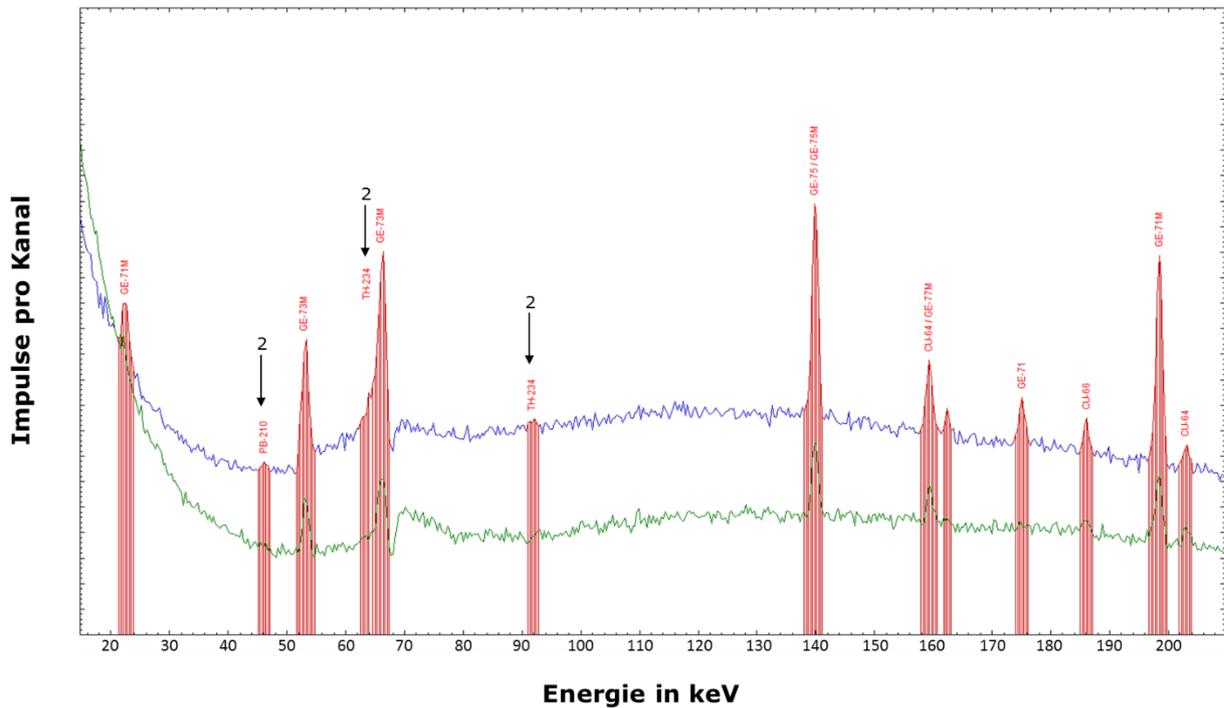


Abb. 6: Ausschnitt des Energiebereichs von 15 keV bis 210 keV; markiert sind die verstärkten bzw. zusätzlich messbaren charakteristischen Linien im blauen „H₂O-NE“-Spektrum.

In Abbildung 7, die den Energiebereich von 450 keV bis 820 keV zeigt, fällt neben der Annihilationslinie bei 511 keV besonders die Nulleffektlinie bei der Energie von 595,8 keV auf, die auf der linken Flanke der „Sägezahn-Linie“ zu sehen ist. Es handelt sich hierbei um die kosmogen hervorgerufene Aktivierungslinie des Ge-74 aus der Gruppe 3.

Anmerkung:

Bei Low-level-Gammaspektrometriemesseinrichtungen mit hoher Messempfindlichkeit kann in Nulleffektspektren mit langer Messdauer die Gammalinie von Kr-85 bei 514,0 keV auftreten, wenn zur Kühlung Flüssigstickstoff mit technischem Reinheitsgrad eingesetzt wird, der Spuren von Krypton enthalten kann (14, 15).

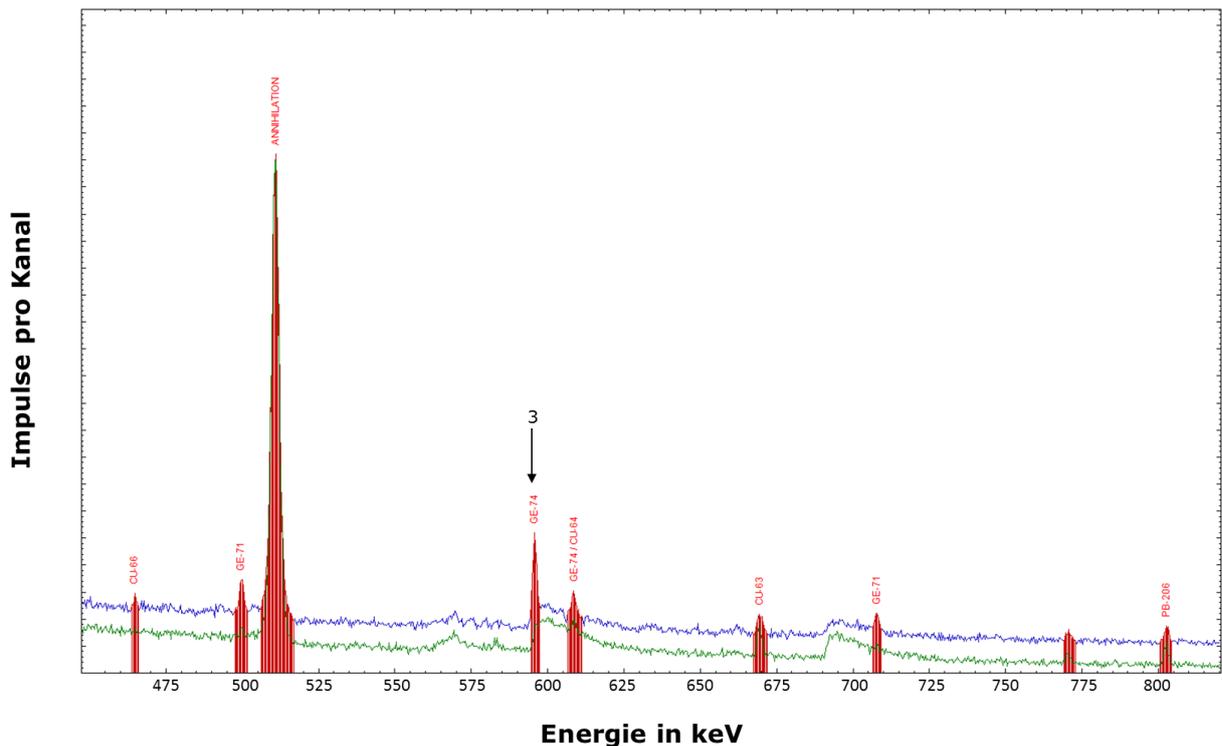


Abb. 7: Ausschnitt des Energiebereichs von 450 keV bis 820 keV; rot markiert sind die verstärkten bzw. zusätzlich messbaren charakteristischen Linien im blauen „H₂O-NE“-Spektrum.

Abbildung 8 zeigt den Energiebereich von 1080 keV bis 1480 keV. Wichtig sind in diesem Ausschnitt:

- die sich überlagernden Gammalinien von Cu-65 bei 1115,5 keV und von Zn-65 bei 1115,7 keV, die durch kosmische Höhenstrahlung hervorgerufen werden (16);
- der Doppelpeak der kosmogenen Aktivierungslinie von Kr-84 bei 1463,9 keV mit der 1460,8-keV-Linie des K-40.

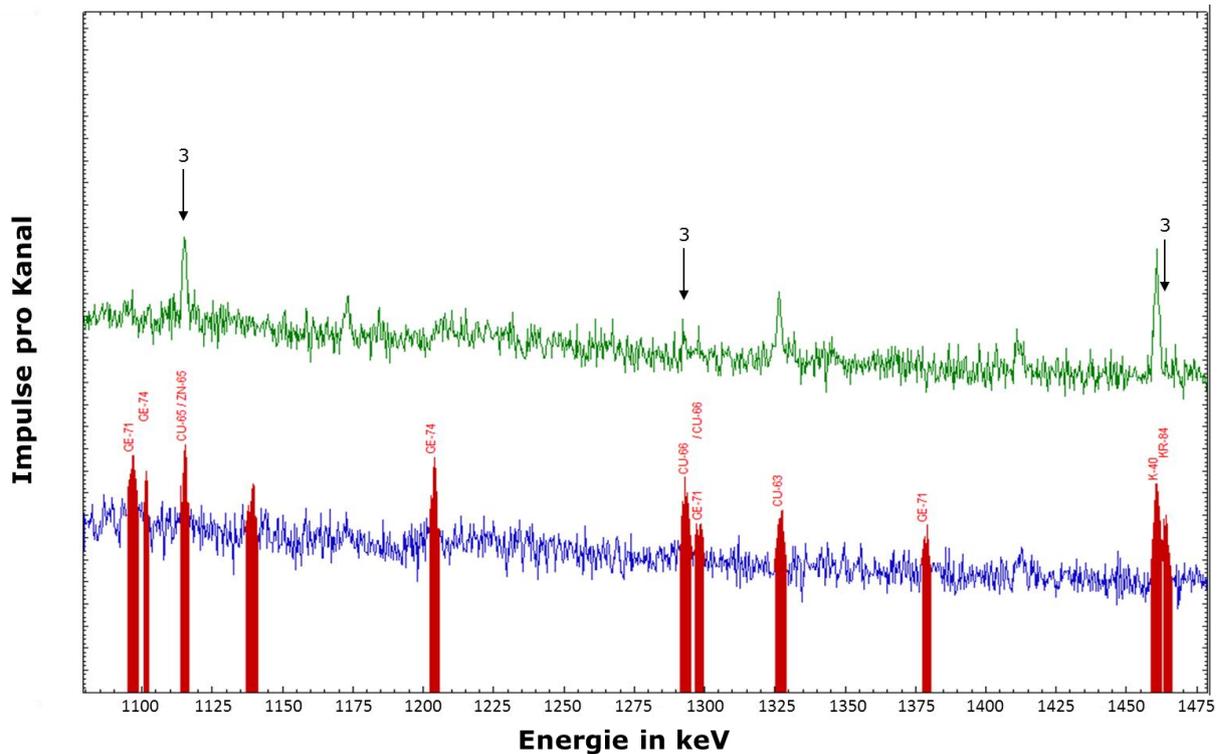


Abb. 8: Energiebereich von 1080 keV bis 1480 keV; rot markiert sind die verstärkten bzw. zusätzlich messbaren charakteristischen Linien im blauen „H₂O-NE“-Spektrum.

In Tabelle 3 ist eine Auswahl der in den Abbildungen 5 bis 8 gezeigten Impulshöhenspektren beobachteten Nulleffektlinien und deren Zählratenverhältnis „H₂O-NE/Det.-NE“ zusammengestellt. Bei schwach ausgeprägten Linien sind wegen der relativ großen statistischen Messunsicherheit die Zählratenverhältnisse zwischen etwa 0,8 und 1,2 praktisch gleichwertig. Damit liegt kein signifikanter Effekt zwischen „Det.-NE“ und „H₂O-NE“ vor.

Tab. 3: Auswahl charakteristischer Linien in den Nulleffektspektren „H₂O-NE“ und „Det.-NE“ aus Abbildung 5 zur Verdeutlichung des Moderatoreffektes des Wassers

Linie mit der Energie	Zählrate „H₂O-NE“	Zählrate „Det.-NE“	Zählratenverhältnis „H₂O-NE/Det.-NE“	Ursprung bzw. Radionuklid
in keV	in s⁻¹	in s⁻¹		
10,36	9,6E-04	1,8E-04	5,3	Ga- Σ K,L,M
22,80	9,0E-04	2,2E-04	4,1	In-116
53,47	1,9E-03	7,7E-04	2,5	Ge-73m
66,75	3,5E-03	1,1E-03	3,2	Ge-73m
139,20	3,2E-03	1,2E-03	1,0	Ge-75m
159,50	1,1E-03	4,5E-04	2,7	Ge-77m
174,88	6,8E-04	–		Ge-71
186,01	3,9E-04	2,1E-04	1,9	Cu-66
197,90	3,4E-03	1,3E-03	2,6	Ge-71m
202,95	3,4E-04	3,2E-04	1,1	Cu-64
278,24	1,3E-03	4,7E-04	2,8	Cu-64
298,66	2,1E-04	–		In-116
326,00	7,5E-04	–		Ge-71
343,94	2,5E-04	–		Cu-64
465,15	1,3E-04	–		Cu-66
492,94	8,2E-05	–		Ge-74
499,85	6,4E-04	7,0E-05	9,1	Ge-71
511,00	1,6E-02	1,7E-02	0,94	Annihilation
513,99	–*	*		Kr-85
595,85	3,2E-04	9,5E-05	3,4	Ge-74
608,35	5,1E-04	1,9E-04	2,7	Ge-74
669,60	5,2E-04	5,0E-04	1,1	Cu-63
803,00	3,7E-04	3,7E-04	1,	Pb-206
867,90	3,6E-04	–		Ge-74
961,05	6,7E-04	–		Ge-74
962,68	–	7,6E-04		Cu-63
1063,60	7,7E-05	–		Pb
1101,27	7,7E-05	–		Ge-74
1115,48	1,5E-04	–		Cu-65
1115,54	1,5E-04	–		Zn-65
1139,65	9,7E-05	–		Cu-66
1204,21	1,8E-04	–		Ge-74
1293,59	2,2E-04	–		Sn-116

Linie mit der Energie in keV	Zählrate „H ₂ O-NE“ in s ⁻¹	Zählrate „Det.-NE“ in s ⁻¹	Zählraten- verhältnis „H ₂ O-NE/Det.-NE“	Ursprung bzw. Radionuklid
1298,80	7,8E-05			Ge-71
1327,00	2,0E-04	7,4E-05	2,6	Cu-63
1378,80	9,1E-05	–		Ge-71
1411,70	9,4E-05	2,3E-05	4,1	Cu-63
1463,86	1,8E-04*	–		Kr-84
1481,75	9,8E-05	6,5E-05	1,5	Cu-64
1777,80	1,4E-04	–		Ge-71
2223,30	1,7E-03 ⁺	–		H-2

* Flüssigstickstoff mit technischem Reinheitsgrad enthält Spuren von Krypton (14, 15).

⁺ In Nulleffektspektren von großvolumigen wässrigen Messpräparaten erscheint auch die Gammalinie von H-2 bei 2223,3 keV, die durch die Aktivierung des natürlichen Wasserstoffs durch kosmogene Neutronen verursacht wird.

Literatur

- (1) DIN 25702:1995, *Abschirmungen von Detektoren für nuklidspezifische Aktivitätsmessungen*.
- (2) Debertain, K.: *Meßanleitung für die Bestimmung von Gammastrahlen-Emissionsraten mit Germanium-Detektoren*. PTB Ra-12, Braunschweig: PTB, September 1980
- (3) Gehrke, R. J., Davidson, J. R.: *Aquisition of quality γ -ray spectra with HPGe spectrometers*. Appl. Radiat. Isot., 2005, Vol. 62, S. 479–499. ISSN 0969-8043.
- (4) Laubenstein, M., Hult, M., Gasparro, J., Arnold, D., Neumaier, S., Heusser, G., Köhler, M., Povinec, P., Reyss, J.-L., Schwaiger, M., Theodorsson, P.: *Underground measurements of radioactivity*. Appl. Radiat. Isot., 2004, Vol. 61, S. 167–172. ISSN 0969-8043.
- (5) Jovancevic, N., Krmar, M., Mrda, D., Slivka, J., Biki, I.: *Neutron induced background gamma activity in low-level Ge-spectroscopy systems*. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 2010, Vol. 612, S. 303–308.
- (6) Ljungvalla, J., Nyberg, J.: *A study off ast neutron interactions in high-purity germanium detectors*. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 2005, Vol. 546, S. 553–573.
- (7) Roy, J.-C., Cöte, J.-E., Durham, R. W., Joshi, S. R.: *A study of the indium and germanium photo peaks in the background spectra of Ge spectrometers with a passive shield*. J. Radioanal. Nucl. Chem., 1989, Vol. 130, S. 221–230. ISSN 0236-5731.

- (8) Mouchel, D.: *A high-purity-Ge detector system for the measurement of low-level radioactivity in environmental samples*. In: Garcia-Leon, M., Madurga, G., eds.: *Low-level measurements of manmade radionuclides in the environment*. Proceedings of the Second International School, Rabida, Huelva, Spain, 25 June to 6 July 1990. World Scientific Publishing Co., 1991, S. 106–118.
- (9) Lindstrom, R. M., Lindstrom, D. J., Slaback, L. A., Langland, J. K.: *A low-background gamma-ray assay laboratory for activation analysis*. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 1990, Vol. 229, S. 425–429.
- (10) Heusser, G.: *Studies of gamma-ray background with a low-level germanium spectrometer*. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 1991, Vol. 58, S. 79–84.
- (11) Breier, R., Povinec, P.: *Simulation of background characteristics of low-level gamma-ray spectrometers using Monte Carlo method*. Appl. Radiat. Isot., 2010, Vol. 68, S. 1231–1235. ISSN 0969-8043.
- (12) Brookhaven National Nuclear Data Center, Upton, NY, USA: *Thermal Neutron Capture Gammas by Energy (CapGam by Energy)*. Verfügbar unter: <https://www.nndc.bnl.gov/capgam/indexbye.html>, [Zugriff am: 15. April 2019]
- (13) International Atomic Energy Agency (IAEA), Wien, Österreich: *Evaluated Gamma-ray Activation File (EGAF)*. Verfügbar unter: <https://www-nds.iaea.org/pgaa/egaf.html>, [Zugriff am: 15. April 2019]
- (14) Zusel, G., Simgen, H., Heusser, G.: *Ar and Kr concentrations in nitrogen as a measure of the ^{39}Ar and ^{85}Kr activities in connection with the solar neutrino experiment Borexino*. Appl. Radiat. Isot., 2004, Vol. 61, S. 197–201. ISSN 0969-8043.
- (15) Simgen, H., Heusser, G.: *Analysis of radioactive trace impurities with μBq -sensitivity in Borexino*. Internat. J. Mod. Phys. A, 2014, Vol. 29, No. 16, DOI: 10.1142/S0217751X14420093
- (16) Verplancke, J., Fettweis, P. F., Venkatarman, R., Young, B. M., Schwenn, H.: *Chapter 5: Semiconductor Detectors*. In: L'Annunziata, M. F., ed.: *Handbook of Radioactivity Analysis*. 3rd Edition. Amsterdam (Niederlande): Elsevier Academic Press, 2012, S. 320–326. ISBN 978-0-12-0384873-4.
- (17) Neumaier, S., Arnold, D., Böhm, J., Funck, E.: *The PTB underground laboratory for dosimetry and spectrometry*, Appl. Radiat. Isot., 2000, Vol. 53, S. 173–178. ISSN 0969-8043.