



Hochschule
Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

FAKULTÄT
MASCHINENWESEN

Teil II: Abschlussbericht

**VERBUNDPROJEKT: „RADIOLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG
VON KERNTÉCHNISCHEN ANLAGEN UND GEBÄUDEN MITTELS
KOLLIMATIONSFREIER, RICHTUNGS-AUFGEÖSTER IN-SITU-
GAMMA-SPEKTROMETRIE“**

QGRIS („Quantitative Gamma-Ray Imaging System“)

FKZ 15S9431C

Juni 2025

Projektleiter: **Prof. Dr. rer. nat. Thomas Schönmath**

Autoren: **S. Alt, T. Kaden, T. Schönmath**

Projektlauzeit: **01.06.2021 – 31.12.2024**

Hochschule Zittau/Görlitz
Fakultät Maschinenwesen
Fachgebiet Strahlentechnik und Strahlenschutz
Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 15S9431C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Berichts-Nr./Report-No.:
HSZG-FM-2025/QGRIS-ASB

Kurzbeschreibung

Gesamtziel des Verbundprojektes QGRIS war die Entwicklung und Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens für die Bewertung des radiologischen Zustands von Gebäuden und kerntechnischen Anlagenteilen im Rahmen der radiologischen Erkundung zur Rückbauplanung und Erfolgskontrolle. Das Vorhaben wurde im Rahmen des Forschungsprogramms FORKA des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt gefördert.

Im Teilprojekt C entwickelte die HSZG zwei Positioniersysteme für Gammaquellen und Schwächungswände und führte an diesen Versuchsständen mit den vom Projektpartner Hellma zur Verfügung gestellten Prototypen RSL2 und RSL7 umfangreiche experimentelle Untersuchungen durch.

Im Rahmen der Tests mit RSL7 zeigte sich, dass zusätzliche Untersuchungen zum Einschaltverhalten der Geräte erforderlich waren. Als Ergebnis ergaben sich für die weiteren Experimente Wartezeiten von mindestens 120 min nach Einschalten.

Zusätzlich zum Projektantrag der HSZG erfolgten die ursprünglich bei Hellma vorgesehenen Langzeitmessungen zur Temperaturkalibrierung aller 7 Einzeldetektoren des RSL7 in einem regelbaren Ofen für die zu berücksichtigenden Temperaturbedingungen von 0 °C bis 30 °C an der HSZG. Als Ergebnis steht eine Prozedur zur Energiekalibrierung zur Verfügung, welche die zeitliche Drift nach Einschalten des RSL7 sowie die Detektortemperatur während der Messung berücksichtigt. Diese Untersuchungen wurden im Rahmen einer Masterarbeit durchgeführt und dokumentiert.

RSL7-Messungen für Punkt-, Linien-, Flächen- und Volumenquellen wurden hauptsächlich mit den Nukliden ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs und ^{152}Eu durchgeführt, ausgewertet und in diesem Abschlussbericht dokumentiert. Die Auswertung mit der RSL7-Applikationssoftware GARISO-V7 zeigte eine gute spektrale Analyse zu dem jeweiligen Nuklid. Eine automatische Nukliderkennung ist derzeit nicht implementiert. Bei den Messungen mit Flächen- und Volumenquellen konnte bei 50 cm Abstand eine örtliche Verteilung der Aktivität ermittelt werden. Bei größeren Abständen neigt die Rekonstruktions-Auswertung von GARISO-V7, die Aktivitätsverteilung punktförmigen Orten im 2D-Koordinatensystem zuzuordnen.

Im Rahmen des Teilprojektes C wurden weiterhin mit dem am CERN entwickelten Simulationsprogramm FLUKA [FER15] umfangreiche Simulationsrechnungen für den RSL2 und RSL7 durchgeführt und ausgewertet. Die Detektorereignisse als auch die koinzidenten Detektorereignisse wurden für die Nuklide ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs und ^{235}U unter Berücksichtigung verschiedener Abstände und Raumwinkel bestimmt, um abgeleitete Größen zu ermitteln. Neben Simulationen zu den vorhandenen Prototypen RSL2 und RSL7 wurden auch Simulationen für den bei Hellma geplanten RSL4 realisiert.

Weitere FLUKA-Simulationen wurden für acht Detektorgruppen gerechnet. Die Simulationen erfolgten unter Vorgabe von jeweils drei Nukliden (^{60}Co , ^{137}Cs und ^{241}Am) als Punktquellen, die an sieben verschiedenen Positionen mit einem Abstand von 1 m zur jeweiligen Detektorgruppe angeordnet waren. Damit liegen 168 Ergebnisdatensätze vor. Zusätzlich wurde eine Detektorgruppe neun entworfen, mit der an den sieben verschiedenen Positionen die Nuklide ^{60}Co und ^{137}Cs nachgebildet und simuliert wurden. Die Ergebnisse der FLUKA-Simulationen wurden bei den regelmäßigen Projekttreffen den Projektpartnern in Form von Präsentationen vorgestellt, diskutiert und in internen Berichten sowie in diesem Abschlussbericht dokumentiert.

Im KKW Rheinsberg (KKR) des EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH (EWN) erfolgten Validierungsmessungen mit dem RSL7 durch die Projektpartner Hellma, VKTA und HSZG. Die Auswertung der Daten erfolgte bei Hellma und VKTA.

Abstract

The overall aim of the joint project QGRIS was to develop and implement a new type of measurement procedure for assessing the radiological condition of buildings and nuclear plant components as part of radiological exploration for decommissioning planning and success monitoring. The project was funded as part of the FORKA research program of the Federal Ministry of Research, Technology and Space.

In sub-project C, the HSZG developed two positioning systems for gamma sources and attenuation walls and carried out extensive experimental investigations on these test rigs using the RSL2 and RSL7 prototypes provided by project partner Hellma.

The tests with RSL7 showed that additional investigations into the switch-on behavior of the devices were necessary. This resulted in waiting times of at least 120 minutes after switching on for the other experiments.

In addition to the HSZG's project application, the long-term measurements originally planned at Hellma for the temperature calibration of all 7 individual detectors of the RSL7 were carried out in a controllable oven for the temperature conditions of 0 °C to 30 °C to be taken into account at the HSZG. The result is an energy calibration procedure that takes into account the drift over time after switching on the RSL7 and the detector temperature during the measurement. These investigations were carried out and documented as part of a master's thesis.

RSL7 measurements for point, line, area and volume sources were mainly carried out with the nuclides ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs and ^{152}Eu , evaluated and documented in this final report. The evaluation with the RSL7 application software GARISO-V7 showed a good spectral analysis for the respective nuclide. Automatic nuclide detection is not currently implemented. In the measurements with area and volume sources, a local distribution of the activity could be determined at a distance of 50 cm.

At larger distances, the reconstruction evaluation of GARISO-V7 tends to assign the activity distribution to point-like locations in the 2D coordinate system.

As part of sub-project C, extensive simulation calculations for RSL2 and RSL7 were carried out and evaluated using the FLUKA [FER15] simulation program developed at CERN. The detector events as well as the coincident detector events were determined for the nuclides ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs and ^{235}U , taking into account different distances and solid angles, in order to determine derived quantities. In addition to simulations for the existing prototypes RSL2 and RSL7, simulations were also carried out for the RSL4 planned at Hellma.

Further FLUKA simulations were calculated for eight detector groups. The simulations were carried out using three nuclides each (^{60}Co , ^{137}Cs and ^{241}Am) as point sources, which were arranged at seven different positions at a distance of 1 m from the respective detector group.

This means that 168 result data sets are available. In addition, a detector group nine was designed, with which the nuclides ^{60}Co and ^{137}Cs were simulated at the seven different positions. The results of the FLUKA simulations were presented to the project partners at the regular project meetings in the form of presentations, discussed and documented in internal reports and in this final report.

Validation measurements with the RSL7 were carried out at the Rheinsberg NPP (KKR) of EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH (EWN) by the project partners Hellma, VKTA and HSZG. The data were evaluated at Hellma and VKTA.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis	IX
1 Einleitung.....	10
2 Experimente mit Strahlungsdetektoren, Entwurf des Positioniersystems, Planung der Versuchsreihen (AP1).....	12
2.1 Übersicht zum Entwurf der Positioniersysteme.....	12
2.2 Planung der Versuchsreihen	13
2.3 Experimente mit Strahlungsdetektoren.....	15
2.3.1 Übersicht.....	15
2.3.2 Ergebnisse der Testmessungen mit RSL2.....	16
2.3.3 Ergebnisse der Testmessungen mit RSL7.....	19
3 Detektor-Simulation mit FLUKA, Bereitstellung der Simulationsdaten für Projektpartner, Aufbereitung der Messdaten aus AP1 (AP2)	23
3.1 Übersicht zu FLUKA-Simulationen	23
3.2 FLUKA-Simulationen zu RSL2 und RSL7	25
3.2.1 Ortung einer Punktquelle	25
3.2.2 Analyse der Vielfachstreuung im PVT-Streudetektor	27
3.2.3 Betrachtung der Halbräume vor und hinter der Detektorebene (RSL7).....	28
3.2.4 Variation der Detektorabstände (RSL7).....	29
3.3 Detektorgruppensimulationen mit FLUKA.....	30
3.3.1 Definition der Detektorgruppen (DG)	30
3.3.2 Ergebnisse der FLUKA-Simulationen zu den DG	32
3.4 Aufbereitung der Messdaten aus AP1	38
4 Anfertigung des Positioniersystems, Vorbereitung der Tests für AP4 (AP3).....	40
5 Positionierung von Gammaquellen und Messsystem, Durchführung und Auswertung von Versuchsreihen (AP4).....	41
5.1 Experimente zum Einschaltverhalten und zur Energiekalibrierung.....	41
5.1.1 Ergebnisse zum Einschaltverhalten.....	41
5.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen zur Energiekalibrierung	42
5.2 Vorbereitung der Experimente im AP4.....	47
5.3 Experimente mit FQ, VQ und Mehrfachquellen.....	49
5.3.1 Geometrische Bedingungen und Versuchsmatrix	49
5.3.2 Ergebnisse zur Ermittlung der Spektren und Einfluss von Abstandsvariationen	51
5.3.3 Ergebnisse der Experimente mit FQ.....	53
5.3.4 Ergebnisse der Experimente mit VQ.....	55
5.3.5 Ergebnisse der Experimente mit Mehrfachquellen.....	55

5.4	Vorbereitungen zu den Validierungsarbeiten im AP5.....	57
6	Beteiligung an der Durchführung und Auswertung der Validierungsmessungen mit dem VKTA (AP5).....	58
7	Zusammenfassung, Wissenschaftliche Bewertung und Dokumentation der Messungen und Simulationen, einschließlich Positioniersystem, Abschlussbericht (AP6).....	60
8	Literaturverzeichnis.....	62
9	Eigene Publikationen und Beteiligungen als Co-Autoren sowie interne Dokumentationen [...] im Rahmen des Projektes QGRIS.....	63
A	Anhang: Versuchseinrichtungen der HSZG und Prototypen von HELLMA.....	64
A.1	Überblick zum Strahlenlabor.....	64
A.2	Beschreibung VS „CASTOR“.....	64
A.3	Beschreibung VS „GARAY TF“.....	65
A.4	Aufbau Prototyp RSL2.....	66
A.5	Aufbau Prototyp RSL7.....	67
A.6	Übersicht zu radioaktiven Quellen im Strahlenlabor der HSZG.....	68

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Übersicht zur Zusammenarbeit und Aufgliederung der Projektpartner auf wesentliche AP innerhalb der Entwicklungsstrategie	11
Abb. 2-1:	Mögliche Anordnungen des RSL2 (horizontal-links, vertikal-Mitte) und Lagen von Punktquellen am VS „CASTOR“ (rechts)	13
Abb. 2-2:	Lage der Punktquellen in der x-y-Ebene für Simulationen und Experimente	14
Abb. 2-3:	Ergebnisse einer Nulleffektmessung im Strahlenlabor der HSZG mit RSL2 horizontal, Gesamtspektrum in den beiden CeBr ₃ -Detektoren (links), Koinzidenz (rechts)	16
Abb. 2-4:	Ausgewählte Beispiele für die Lagepositionen beim TEST von RSL2 am VS „CASTOR“	16
Abb. 2-5:	Gesamtspektren (links) und Koinzidenz (rechts) beim TEST von RSL2 mit ¹³⁷ Cs-Punktquelle (y = 0 cm) am VS „CASTOR“	17
Abb. 2-6:	Gesamtspektren (links) und Koinzidenz (rechts) beim TEST von RSL2 mit ¹³⁷ Cs-Punktquelle (y = 50 cm) am VS „CASTOR“	17
Abb. 2-7:	Gesamtspektren (links) und Koinzidenz (rechts) beim TEST von RSL2 mit ¹³⁷ Cs-Punktquelle (y = 75 cm) am VS „CASTOR“	17
Abb. 2-8:	Gesamtspektren (links) und Koinzidenz (rechts) beim TEST von RSL2 mit 4 Stück ¹³⁷ Cs-Punktquellen am VS „CASTOR“ mit verkürzter Messdauer	18
Abb. 2-9:	Einfluss eines zusätzlichen ⁶⁰ Co-Störstrahlers am RSL2 (lateral und rückseitig) auf die Gesamtspektren(links) und auf die Koinzidenzen (rechts) beim TEST von RSL2 mit ¹³⁷ Cs-Punktquelle am VS „CASTOR“	18
Abb. 2-10:	Rekonstruktion einer ⁶⁰ Co-Punktquelle bei der Position x = 1 m und y = 1 m in einem Abstand von z = 1 m von der Compton-Kamera RSL 7 – Variation der Iterationszahl N _i bei PB = 33	19
Abb. 2-11:	Rekonstruktion einer ⁶⁰ Co-Punktquelle bei der Position x = 1 m und y = 1 m in einem Abstand von z = 1 m von der Compton-Kamera RSL 7 – Variation des Background Parameters PB bei N _i = 200	20
Abb. 2-12:	Verständnis der Rekonstruktionsparameter für RSL7 – Variation Iterationszahl N _i und Backgroundparameter PB	20
Abb. 2-13:	Verständnis der Rekonstruktionsparameter für RSL7 – Variation PVT threshold	20
Abb. 2-14:	Berechnete Compton-Kamerabilder der aufgenommenen Messwerte mit verschiedenen Positionierungen der RSL7-Gammakamera zu einer Cs-137 Quelle	21
Abb. 2-15:	Rekonstruktionsergebnisse zur Lokalisierung der Quellenpositionen für RSL7-Messungen mit Variation der Höhenposition bei gleicher Entfernung	21
Abb. 2-16:	Gammaspektren im Absorptionsdetektor des RSL7 (links); Koinzidenzspektren (rechts) für Quellenposition C und Einsatz von Abschirmmaterialien	22
Abb. 3-1:	FLUKA Output: Beispiel für die Ausgabe von Detektorereignissen und Koinzidenzereignissen im Absorberdetektor	23
Abb. 3-2:	Anordnung von radioaktiver Quelle und 2“ CeBr ₃ -Detektor in der FLUKA-Simulation (links), simuliertes und tatsächlich gemessenes Impulshöhenspektrum von ¹³⁷ Cs (rechts)	24

Abb. 3-3:	Energieabhängige Berechnungsgleichungen zur Bestimmung des Pseudoraumwinkels bei der Auswertung der FLUKA-Simulationsergebnisse	24
Abb. 3-4:	Darstellung der Abstrahlbedingungen für FLUKA-Simulationen aus einer Punktquelle für RSL2	25
Abb. 3-5:	Ergebnisse der FLUKA-Simulation für Cs-137 bei einem Winkel von Punktquelle zu Detektor von $\vartheta = 0^\circ$	26
Abb. 3-6:	Ergebnisse der FLUKA-Simulation für ^{137}Cs bei verschiedenen Winkeln	26
Abb. 3-7:	Ergebnisse der FLUKA-Simulation für monoenergetische γ -Strahlung mit 1332 keV-Photonen (z.B. für ^{60}Co) bei verschiedenen Winkeln zwischen Quelle und RSL2-Detektor	27
Abb. 3-8:	Koinzidenzereignis eines Photons (gelbe Linie) mit einer Energie von 662 keV, bestehend aus zwei Streuereignissen in Detektor 0 (DETO, Plastik-Szintillator, unten) und einem Absorptionsereignis in Detektor 1 (DET1, CeBr_3 -Detektor, oben).....	27
Abb. 3-9:	Berechnete Compton-Kamerabilder für RSL7-Simulation mit Punktquelle ^{137}Cs bei dezentraler Positionierung.....	28
Abb. 3-10:	Berechnete Compton-Kamerabilder für RSL7-Simulation mit Punktquelle ^{137}Cs bei dezentraler Positionierung und mit gekürztem Detektorgehäuse.....	29
Abb. 3-11:	Berechnete Compton-Kamerabilder für RSL7-Simulation mit Punktquelle ^{137}Cs bei dezentraler Positionierung, mit gekürztem Detektorgehäuse und angepasstem Abstand.....	29
Abb. 3-12:	Rekonstruktion einer ^{137}Cs -Quelle mit jeweils 3,5 Mio. Ereignissen beim RSL7 (links) und RSL7 XXL (rechts).....	30
Abb. 3-13:	Übersicht zu den geometrischen Bedingungen der DG	31
Abb. 3-14:	Definition einer zusätzlichen DG-9 mit einem kegelförmigen Aufbau über 3 Ebenen.....	32
Abb. 3-15:	Vorgehensweise bei der Bewertung der FLUKA-Simulationsergebnisse für die verschiedenen DG für monochromatische Punktquellen an den Quellenpositionen A bis F.....	33
Abb. 3-16:	Aufbau der DG-9 (links), 200 Simulationsereignissen einer Punktquelle und der DG-9 (rechts), die Spuren der jeweiligen Photonen sind als gelbe Linien dargestellt	34
Abb. 3-17:	Detektoranordnung für DG-3 (links) und Lage der in den Simulationsrechnungen jeweils verwendeten Punktquellen und Detektoren mit einem Abstand von $z = 100$ cm (rechts)	34
Abb. 3-18:	Mittelpunktlage der Punktquelle bei $x, y, z = 0$ und Detektoren bei $x, y = 0, z = 100$ cm (links), berechnete Verteilung der Compton-Winkel der unidirektionalen Detektorpaare (rechts).....	35
Abb. 3-19:	Lage der Punktquelle weit außerhalb der Mittelpunktlage bei $x, y = -50$ cm, $z = 0$ und Detektoren bei $x, y = 0, z = 100$ cm (links), berechnete Verteilung der Compton-Winkel der unidirektionalen Detektorpaare (rechts)	35
Abb. 3-20:	FLUKA Output: Gesamt- und Koinzidenzereignisse für die verschiedenen DG für eine ^{137}Cs -Punktquelle an Quellenposition C	36
Abb. 3-21:	FLUKA Output: Gesamt- und Koinzidenzereignisse für die verschiedenen DG für eine angenommene monochromatische ^{60}Co -Punktquelle an Quellenposition C	36
Abb. 3-22:	Analyseergebnisse zum Vergleich uni- und bidirektionaler Streuereignisse in den DG für Quellenposition C und Einfluss der	

	Anzahl der CeBr ₃ -Detektoren in der DG auf den Anteil bidirektionaler Streuereignisse	37
Abb. 3-23:	Simulationsergebnisse für DG-6 mit einer ⁶⁰ Co-Punktquelle auf einer 4 m ² Bildfläche bei unterschiedlich langen Messdauern (Koinzidenzereignisse).....	37
Abb. 3-24:	Randbedingungen der FLUKA-Simulation (links), Vergleich der Lagerekonstruktion zwischen Simulation und Messung (rechts) für Quellenposition C.....	38
Abb. 3-25:	Randbedingungen der FLUKA-Simulation (links), Vergleich der Lagerekonstruktion zwischen Simulation und Messung (rechts) für eine alternative Quellenposition mit großem Einfallswinkel	38
Abb. 3-26:	Auswertung der Intensitätsprofile für die beiden Nuklide ¹³⁷ Cs und ⁶⁰ Co bei unterschiedlichen Lagepositionen.....	39
Abb. 4-1:	Foto (links) und Konstruktion (rechts) der Komponenten des VS „GARAY TF“.....	40
Abb. 4-2:	VS „GARAY TF“ – Aufbau im Labor Strahlentechnik der HSZG mit Comptonkamera RSL7 im Vordergrund.	40
Abb. 5-1:	Verschiebung der Peaklage des Photopeaks von ¹³⁷ Cs (662 keV) für CeBr ₃ -Detektoren und verschiedener Auswerteelektroniken nach dem Einschalten des Messsystems	41
Abb. 5-2:	Verschiebung der Peaklage des Photopeaks von ¹³⁷ Cs (662 keV) für einen 3“ CeBr ₃ - und einen 3“ LaBr ₃ -Szintillationsdetektor mit CAEN-Digitizer nach dem Einschalten (links); prozentuale Verschiebung der Peaklage bei 662 keV und 1460 keV für einen 3“ CeBr ₃ -Detektor nach dem Einschalten (rechts) [RIE23].....	42
Abb. 5-3:	Energiespektrum für eine ⁶⁰ Co-Kalibrierung anhand der zwei Photopeaks mit dem CeBr ₃ -Detektor DT00 des RSL7 bei 25 °C nach berücksichtigter Einschaltzeit [RIE23]	43
Abb. 5-4:	Energiespektren für verschiedene Kalibrierungen mit dem PVT-Detektor DT04 [RIE23].....	44
Abb. 5-5:	Datenschild zum eingesetzten Klimaschrank für die Messungen zur Temperaturkalibrierung	44
Abb. 5-6:	Abhängigkeit der Lage der Peakenergien der Kalibriernuklide zu den temperaturabhängigen CoP des CeBr ₃ -Detektors des RSL7 [RIE23].....	45
Abb. 5-7:	Prozentuale Verschiebung der Peaklage (Drift) mit zunehmender Messdauer nach Einschalten (links) und ermittelte quadratische Abhängigkeit des Parameters B(T) für die verschiedenen Temperaturen der Kalibrierexperimente des CeBr ₃ -Detektors DT00 des RSL7 (rechts) [RIE23]	45
Abb. 5-8:	Kalibriertes Spektrum einer Cs-137-Quelle, gemessen bei 30°C [RIE23].....	46
Abb. 5-9:	Ermittelter quadratischer Verlauf der Fit-Funktion für den Parameter B(T) in (5.2) für den PVT-Detektor DT04 [RIE23].....	46
Abb. 5-10:	Laminierte Flächenquellen auf Flies ¹⁵² Eu (links), ⁶⁰ Co (Mitte) und im Kunststoffrohr positionierte ¹³³ Ba-Volumen-(Rollen-)-Quelle (rechts) des Projektpartners VKTA.....	47
Abb. 5-11:	Messpositionen mit Randmessungen (oben) und ohne Randmessungen (unten) bei Anwendung des Oberflächendosisleistungsmessgerätes RadEye B20-ER für die Bestimmung der Aktivitätsverteilung auf den vom VKTA gefertigten FQ aus laminiertem Flies	47
Abb. 5-12:	Prozentuale Aktivitätsverteilung auf der ¹³⁷ Cs-FQ mit ID 4837/4	48

Abb. 5-13: Prozentuale Aktivitätsverteilung auf der ^{60}Co -FQ mit ID 4836/4	48
Abb. 5-14: Prozentuale Aktivitätsverteilung auf der ^{152}Eu -FQ mit ID 4839/4	49
Abb. 5-15: Positionierungsmöglichkeiten der FQ, VQ und Kombinationsmöglichkeiten als Mehrfachquellen (unten rechts) am VS „GARAY TF“ (Vorderansicht-rechts, Seitenansicht-links).....	49
Abb. 5-16: Ausrichtung der vertikalen (links) und horizontalen (rechts) FQ- Positionen mittels Positionierlaser des RSL7 am VS „GARAY TF“	50
Abb. 5-17: Anordnung einer VQ- ^{133}Ba am VS „GARAY TF“ vor dem RSL7	50
Abb. 5-18: Positionierung von horizontal versetzten Mehrfachquellen (FQ- ^{137}Cs und VQ- ^{60}Co) am VS „GARAY TF“	50
Abb. 5-19: Positionierung von vertikal übereinander liegenden Mehrfachquellen (FQ- ^{137}Cs und VQ- ^{60}Co) am VS „GARAY TF“	50
Abb. 5-20: Abstandsabhängige Gesamt- und Koinzidenzzählraten des RSL7 für horizontale ^{137}Cs -VQ	52
Abb. 5-21: Spektrale Ergebnisse der Messungen mit RSL7 bei horizontalen VQ (VQ- ^{137}Cs , VQ- ^{60}Co , VQ- ^{133}Ba und VQ- ^{152}Eu) am VS „GARAY TF“ und einem Abstand von 100 cm	52
Abb. 5-22: Ergebnisse der Messungen mit vertikaler FQ- ^{137}Cs bei unterschiedlichen Abständen zwischen Quelle und RSL7 und Visualisierung mit GARISO-V7	53
Abb. 5-23: Gesamt- und Koinzidenzzählraten des RSL7 für vertikale und horizontale Anordnung der ^{152}Eu -FQ	54
Abb. 5-24: Ergebnisse der Messungen mit horizontaler und vertikaler FQ- ^{152}Eu bei einem Abstand von 100 cm zwischen Quelle und RSL7 sowie Visualisierung mit GARISO-V7	54
Abb. 5-25: Ergebnisse der Messungen mit horizontaler VQ- ^{137}Cs bei unterschiedlichen Abständen zwischen Quelle und RSL7 und Visualisierung mit GARISO-V7	55
Abb. 5-26: Ergebnisse der Messungen mit Mehrfachquellen (vertikale FQ- ^{137}Cs , horizontale VQ- ^{60}Co) bei einem Abstand von 150 cm zwischen Quellen und RSL7, Variation der Anordnungen (Abb. 5-18-oben, Abb. 5-19-unten) sowie Visualisierung mit GARISO-V7	56
Abb. 5-27: Darstellung der Messergebnisse mit Mehrfachquellen (vertikale FQ- ^{137}Cs , horizontale VQ- ^{60}Co) bei einem Abstand von 150 cm zwischen Quellen und RSL7, Anordnung nach Abb. 5-18 sowie Visualisierung mit GARISO-V7	56
Abb. 5-28: Darstellung der Messergebnisse mit Mehrfachquellen (vertikale FQ- ^{137}Cs , horizontale VQ- ^{60}Co) bei einem Abstand von 150 cm zwischen Quellen und RSL7, Anordnung nach Abb. 5-19 sowie Visualisierung mit GARISO-V7	57
Abb. 5-29: Darstellung der Messergebnisse mit ^{137}Cs Punktquelle bei einem Abstand von ca. 200 cm zwischen Quelle und RSL7 mit Überlagerung von Foto- und Auswertebild der Rekonstruktion.....	57
Abb. 6-1: Screenshot eines 3D-LiDAR-Raumvideos im Bereich c4.4 (Abb. A-1)	58
Abb. 6-2: Beispiel für eine Validierungsmessung mit dem eingehausten RSL7 im Kontrollbereich des KKR.....	59
Abb. A-1 Grundriss des Strahlenlabors der HSZG und freie Verschiebewege für Gamma-Kamera	64
Abb. A-2 Aufbau des VS „CASTOR“ [REI20]	65
Abb. A-3 Aufbau des VS „GARAY-TF“	65
Abb. A-4 Aufbau des Prototypen RSL2 mit 2 CeBr3-Detektoren	66

Abb. A-5 Abmessungen und Aufbau des Prototypen RSL7 mit zentralem
CeBr3-Detektor und 6 ringförmig angeordneten PVT-Plastik-
Detektoren67

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1:	AP im Projekt QGRIS (FKZ 15S9431C)	11
Tab. 2-1:	Lage von Punktquellen mit Abständen zu den simulierten DG und Randbedingungen für Experimente	14
Tab. 2-2:	Übersicht rückbaurelevanter monoenergetischer Gammastrahler sowie ^{60}Co	15
Tab. 3-1:	Übersicht und Ergebnisse der durchgeführten FLUKA-Simulationen für RSL2	25
Tab. 3-2:	Übersicht zu den von Hellma vorgeschlagenen Detektorgruppen [PET22]	30
Tab. 5-1:	Übersicht zu verschiedenen Kombinationen von Detektoren und Elektroniken	41
Tab. 5-2:	Übersicht zu den verwendeten Kalibriernukliden und den zugehörigen Energien	43
Tab. 5-3:	Übersicht der Experimente mit FQ, VQ und Mehrfachquellen	51
Tab. A-1:	Übersicht zu radioaktiven Quellen der HSZG und des VKTA	69

Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

ABKÜRZUNGEN

Al	Aluminium
AP	Arbeitspaket
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CERN	Europäische Organisation für Kernforschung
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron Hamburg
DG	Detektorgruppe
EWN	EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH
EZ	Einzelziel
FAU	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
FKZ	Förderkennzeichen
FLUKA	fully integrated particle physics MonteCarlo simulation package
FORKA	Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen
FQ	Flächenquelle
FWHM	Full Width at Half Maximum (Halbwertsbreite)
Hellma	Hellma Materials GmbH Jena
HSZG	Hochschule Zittau/Görlitz
KKW	Kernkraftwerk
KKR	Kernkraftwerk Rheinsberg des EWN
LiDAR	Light Detection and Ranging
N_i	Iterationsschritte
PB	Background parameter
PVT	Plastikszintillatoren
QGRIS	Quantitative Gamma-Ray Imaging System
VKTA	VKTA – Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e.V.
VQ	Volumenquelle
VS	Versuchstand

FORMELZEICHEN

A, B, C	Koeffizienten
CoP	Charge of Pulse
d	Abstand
E	Energie
max	Maximum
min	Minimum
N_{bi}	Anzahl bidirektionaler Koinzidenzereignisse
N_{ges}	Anzahl Gesamttereigniss
N_K	Anzahl Koinzidenzereignisse
N_{uni}	Anzahl unidirektionaler Koinzidenzereignisse
R_{bi}	Verhältnis N_{bi}/N_{ges}
R_K	Verhältnis N_K/N_{ges}
R_{uni}	Verhältnis N_{uni}/N_{ges}
T	Temperatur
γ	Gammastrahlung
Theta-griechisch	Winkel

1 Einleitung

Auf die Stilllegung kerntechnischer Anlagen, wie z.B. von Kernkraftwerken (KKW), folgt der Anlagenrückbau. Zur Vorbereitung, Durchführung und Lenkung des Rückbaus sind eine Vielzahl von Informationen zur Kontaminationssituation der kerntechnischen Anlage erforderlich. Je umfangreicher und rationeller diese gewonnen werden können, umso zügiger, kosteneffizienter und dosisoptimierter kann der Rückbau erfolgen.

Mit der Förderrichtlinie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) vom 31.08.2017 [BMBF17] und im Rahmen des Förderkonzeptes "Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (FORKA)" will das BMBF durch die Entwicklung, Optimierung und Erprobung anwendungsorientierter Technologien und Verfahren die Bewältigung der anstehenden Aufgaben unterstützen. Die Ziele dieser Fördermaßnahme sind, den Schutz von Mensch und Umwelt im Rückbau und in der Entsorgung der dabei anfallenden radioaktiven Abfälle zu verbessern, den Kompetenzerhalt und die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses zu unterstützen und die Position deutscher Unternehmen auch beim Rückbau kerntechnischer Anlagen im internationalen Umfeld auszubauen.“

Explizit werden dabei auch die Entwicklung von Verfahren zur vereinfachten bzw. automatisierten Messung von Anlageteilen und Gebäuden und die Förderung der Hochschulforschung und des wissenschaftlichen Nachwuchses angesprochen.

Gesamtziel dieses Projektes war die Entwicklung und Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens für die Bewertung des radiologischen Zustands von Gebäuden und kerntechnischen Anlagenteilen im Rahmen der radiologischen Erkundung zur Rückbauplanung und Erfolgskontrolle, der Lenkung/Optimierung einzelner Rückbauschnitte sowie der schnellen Erkundung im Rahmen der Gefahrenabwehr (Störfallvorsorge, Notfallenschutz). Durch im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren aufwandsärmer gewonnene Informationen über Art und Höhe der Radionuklide lassen sich radiologische Daten einfacher und umfangreicher gewinnen, mit denen der Rückbau dosis- und kostenoptimiert geplant werden kann.

Im Mittelpunkt der Arbeiten stand die technische Demonstration, dass das Messverfahren der richtungsaufgelösten In-situ-Gammaspektrometrie einen sinnvollen Beitrag zu radiologischen Untersuchungen im Rückbau kerntechnischer Anlagen sowie der Schnelerkundung im Rahmen der Notfallvorsorge leisten kann. Das Messverfahren der richtungsaufgelösten In-situ-Gammaspektrometrie sollte so als Ergänzung oder als Alternative zu den etablierten Erkundungsverfahren entwickelt werden.

Der gemeinsame Projektantrag von 4 Projektpartnern für die Durchführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurde als Vorhaben mit den Förderkennzeichen (FKZ): 15S9431A-D bewilligt.

Es wurde ein Projektkonsortium aus vier Verbundpartnern ausgewählt, welches über die erforderlichen Teilkompetenzen verfügt. Im Rahmen dieser interdisziplinären Zusammenarbeit sollte am Projektende ein praxistaugliches Messverfahren mit einem Demonstrator vorliegen.

Die Projektpartner des Verbundvorhabens waren:

- FKZ 15S9431A: Hellma Materials GmbH Jena (Hellma)
- FKZ 15S9431B: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU),
Deutsches Elektronen-Synchrotron Hamburg (DESY)
- FKZ 15S9431C: Hochschule Zittau / Görlitz (HSZG)
- FKZ 15S9431D: VKTA – Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e.V.
(VKTA).

Eine Übersicht zur Zusammenarbeit und Aufgliederung der Projektpartner auf wesentliche Arbeitspakete (AP) der Entwicklungsstrategie zeigt Abb. 1-1.

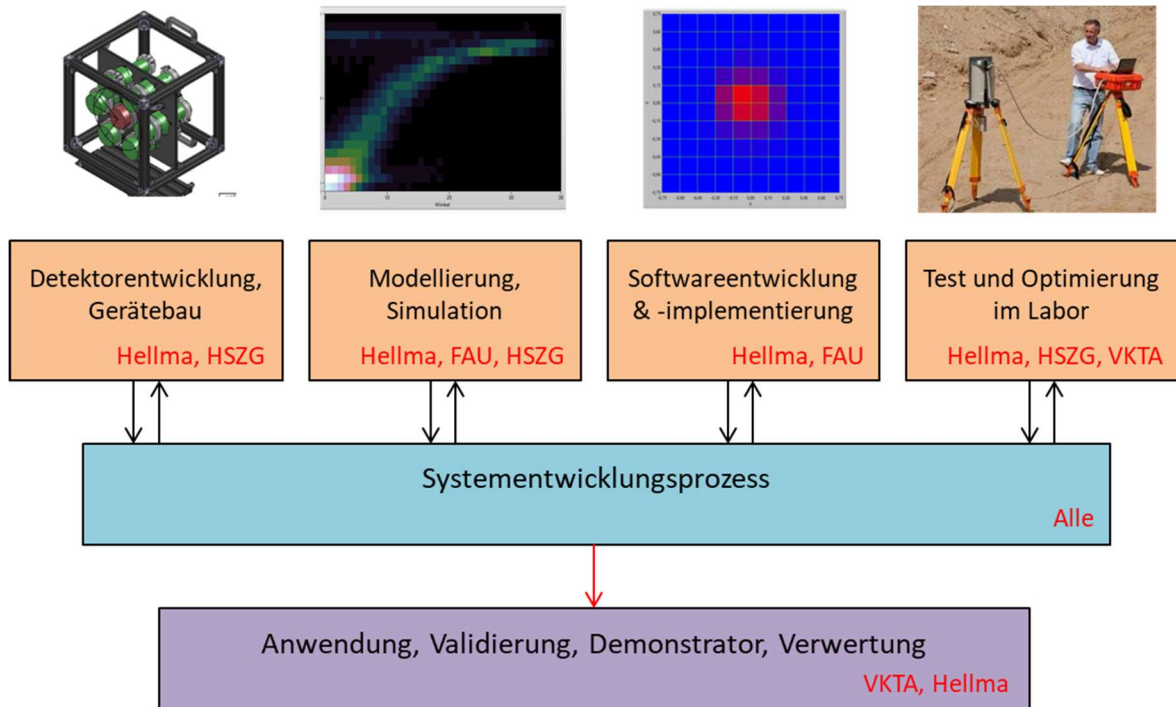


Abb. 1-1: Übersicht zur Zusammenarbeit und Aufgliederung der Projektpartner auf wesentliche AP innerhalb der Entwicklungsstrategie

Die Einzelzielsetzungen der HSZG bestanden in der Durchführung und Ergebnisbewertung von FLUKA-Simulationen für spezifizierte Detektorgruppen zur Entwicklung einer geeigneten Gammakamera sowie in der Planung, Durchführung und Auswertung von Messungen mit entwickelten Prototypen von Hellma. Darauf aufbauend wurden die AP für die HSZG entsprechend Tab. 1-1 in der Vorhabensbeschreibung festgelegt.

Tab. 1-1: AP im Projekt QGRIS (FKZ 15S9431C)

AP 1	Experimente mit Strahlungsdetektoren (Datenbasis für AP1+2), Entwurf des Positioniersystems, Planung der Versuchsreihen
AP 2	Detektor-Simulation mit FLUKA, Bereitstellung der Simulationsdaten für Projektpartner, Aufbereitung der Messdaten aus AP1
AP 3	Anfertigung des Positioniersystems, Vorbereitung der Tests für AP4
AP 4	Positionierung von Gammaquellen und Messsystem, Durchführung und Auswertung von Versuchsreihen
AP 5	Beteiligung an der Durchführung und Auswertung der Validierungsmessungen mit dem VKTA
AP6	Wissenschaftliche Bewertung und Dokumentation der Messungen und Simulationen, einschließlich Positioniersystem, Abschlussbericht

Im Folgenden wird zu den Arbeiten und Ergebnissen der HSZG in den einzelnen AP berichtet.

2 Experimente mit Strahlungsdetektoren, Entwurf des Positioniersystems, Planung der Versuchsreihen (AP1)

2.1 Übersicht zum Entwurf der Positioniersysteme

Die HSZG entwickelte in enger Abstimmung mit dem Verbundkoordinator Hellma und den anderen Projektpartnern zwei Positioniersysteme für Gammaquellen und Schwächungswände und führte an diesen Versuchsständen (VS) umfangreiche experimentelle Untersuchungen durch. Die Entwurfsarbeiten untergliederten sich in folgende Punkte:

- Entwicklungsarbeiten zu zwei Positioniersysteme für Gammakamera, Gammaquellen und Schwächungswände für eine ebene Wand (Messwand) im Strahlenlabor der HSZG
- Festlegung ortsfester Messpunkte für die Gammakamera unter Berücksichtigung:
 - verschiedener Abstände zur Messwand
 - verschiedener Winkel in vertikaler und horizontaler Richtung zur Messwand
- Ausmessung der geometrischen Bedingungen der geplanten Messpunkte und Dokumentation.

In einem ersten Schritt wurde ein vorhandenes Positionierungssystem für radioaktive Quellen des Strahlenlabors der HSZG ausgewählt. Der Versuchsstand (VS) „CASTOR“ wurde ursprünglich im Projekt BMWi 1501518B [REI20] entwickelt und aufgebaut. Im Rahmen des QGRIS-Projektes wurde dieser VS modifiziert (A.2). Dieser Versuchsstand kann bis zu 8 einzelne radioaktive Quellen aufnehmen, die mit einem minimalen Abstand von je 15 mm positioniert werden können. Die 8 Quellenaufnahmen sind an Lineareinheiten gekoppelt, die einzeln über eine Gesamthöhe von 955 m stufenlos verfahrbar sind. Der Versuchsstand ist auf Laufrädern montiert, so dass die Lage im Strahlenlabor (Entfernungen, Höhen, Winkel zu den Sensoren) variabel gestaltet werden kann. Dieser VS „CASTOR“ diente im Projekt hauptsächlich für Eignungstests der von Hellma bereitgestellten Prototypen RSL2 (A.4) und RSL7 (A.5) mit Einsatz einzelner Punkt- bzw. quasi-Linienquellenanordnungen mit mehreren Punktquellen, von seitlichen Störstrahlern und zwischengelagerter Absorptionsmaterialien (Stahl, Beton) im AP1.

Das zweite Positioniersystem für die Messungen im AP4 wurde als VS „GARAY TF“ im AP3 entworfen und errichtet (Kapitel 4 und A.3).

Die möglichen Verfahrenwege für die Gammakamera im Strahlenlabor für beide VS sind in A.1 gekennzeichnet.

Verschiedene Hersteller von 3D-Laserscantechnik wurden im AP1 recherchiert. Eine abschließende Auswahl wurde wegen der Abwägungen zu technischen Leistungsfähigkeiten und wirtschaftlichen Anwendungsbetrachtungen in Abstimmung mit Hellma bei Bearbeitung von AP1 zurückgestellt. Für die Bestimmung der Ortsposition der Gammakamera wurden Alternativen zu den kostenintensiven 3D-Laserscanner-Systemen geprüft. Durch den Projektpartner Hellma wurde die Integration von CMOS-Kameras am Kameragehäuse mit Fisheye-Objektiven in die Messsoftware der Comptonkamera vorangetrieben, um damit eine bildliche Zuordnung der Quelle im Raum herzustellen.

In Absprache mit den Projektpartnern wurde entschieden, für die Experimente im Strahlenlabor der HSZG einfache Messmethoden (Laser-Abstandsmessung, Laser-Pointer, Lineale, Winkelmesser) zu verwenden.

Die rasante Entwicklung der auf Lasertechnologie basierenden LiDAR-Technologie führte in Absprache mit den Projektpartnern zu einer Verschiebung der Investition nach AP5.

2.2 Planung der Versuchsreihen

Zweiter Schwerpunkt im AP1 war die Aufstellung von Versuchsreihen. Dies beinhaltete:

- Auswahl einzelner Punktquellen mit unterschiedlichen Nukliden, Aktivitäten und Energien
- Untersuchungen zu flächigen Quellenverteilungen
- Untersuchungen zu räumlichen Quellenverteilungen (Rohre)
- Untersuchungen zur Anordnung von Linienquellen in ausgewählten vertikalen, horizontalen, geneigten Rohren an der Messwand
- Untersuchungen zu unterschiedlichen Abschirmungen.

Als Zuarbeit des Projektpartners VKTA [JAN21i] wurde eine Übersicht zu möglichen Messgeometrien und Nukliden für die Spezifizierung der Parameter der Compton-Kamera gegeben.

Die Definition von Messgeometrien für die Testreihen der Compton-Kameras unterteilte sich in vier Abschnitte:

- HSZG: einfache Geometrien (Punkt-, Linien- und Flächenquellen)
- HSZG: komplexe Geometrien (Volumenquellen, z.B. in Zylindermänteln)
- VKTA: Sondergeometrien (massive Objekte, Bündel mehrerer Einzelquellen)
- VKTA: Messung Gebinde (Kalibriergebände, reale Gebinde)

Dabei wurden einzeln und additiv jeweils Einflussfaktoren variiert. Dies waren:

- Einflüsse des Messabstandes und der Messwinkel
- Reaktion auf den Einfall von Störstrahlungsfeldern (lateral und rückwärtig)
- Einflüsse von Abschirmungen.

Als erste Versuchsreihe wurde eine einfache Anordnung zwischen Punktquelle und RSL2-Compton-Kamera vorgeschlagen. In dieser Versuchsreihe sollte bei konstantem Abstand nur der Einfluss eines unterschiedlichen Einstrahlwinkels als Funktion der Höhenlage der Punktquelle im VS „CASTOR“ ohne seitlichen Versatz der Kamera untersucht werden. Neben unterschiedlichen Höhenlagen der Quelle, war auch die Aufstellgeometrie der Kamera (horizontal, vertikal) als zu variierende Randbedingung zu berücksichtigen (Abb. 2-1).

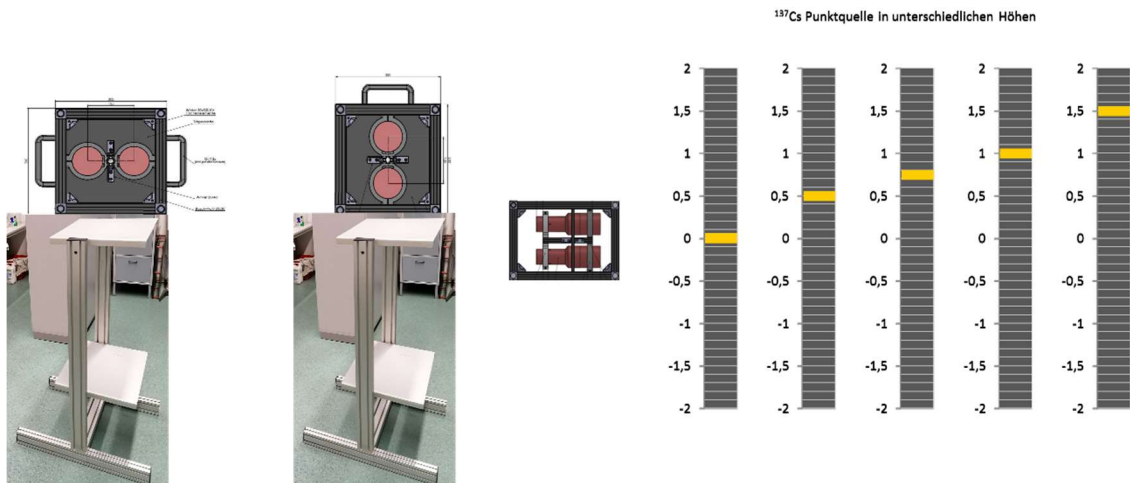


Abb. 2-1: Mögliche Anordnungen des RSL2 (horizontal-links, vertikal-Mitte) und Lagen von Punktquellen am VS „CASTOR“ (rechts)

Im technischen Bericht [ALT21i] erfolgte darauf aufbauend die Darstellung möglicher Messanordnungen für den VS „CASTOR“ für einfache Objekte als Punkt- und Linienstrahler unter Einsatz vorhandener monoenergetischer Strahlungsquellen und ^{60}Co im Strahlenlabor der HSZG. Einen Überblick zum HSZG-Strahlenlabor enthält A.1.

Für den Vergleich zwischen den Detektorgruppen (DG)-Simulationen mit FLUKA und den adäquaten experimentellen Versuchsreihen mit Punktquellen wurde Lagepositionen (A bis G) nach Tab. 2-1, Abb. 2-2 aufgestellt. Die Variation der Anordnung von Punktquellen war in der x(Breite)-y(Höhe)-Ebene vorgesehen bei Abständen von $z = 100$ bis 200 cm zwischen Quelle und Detektor.

Tab. 2-1: Lage von Punktquellen mit Abständen zu den simulierten DG und Randbedingungen für Experimente

Punkt- quelle	Abstand x in cm	Abstand y in cm	Abstand z in cm	Abstand d in cm
A	0	0	100	100
B	0	-25	100	103
C	0	50	100	112
D	-25	25	100	106
E	25	25	100	106
F	-50	-50	100	122
G	50	-50	100	122

Der Abstand d ist der direkte Abstand zwischen Quelle und Detektor.

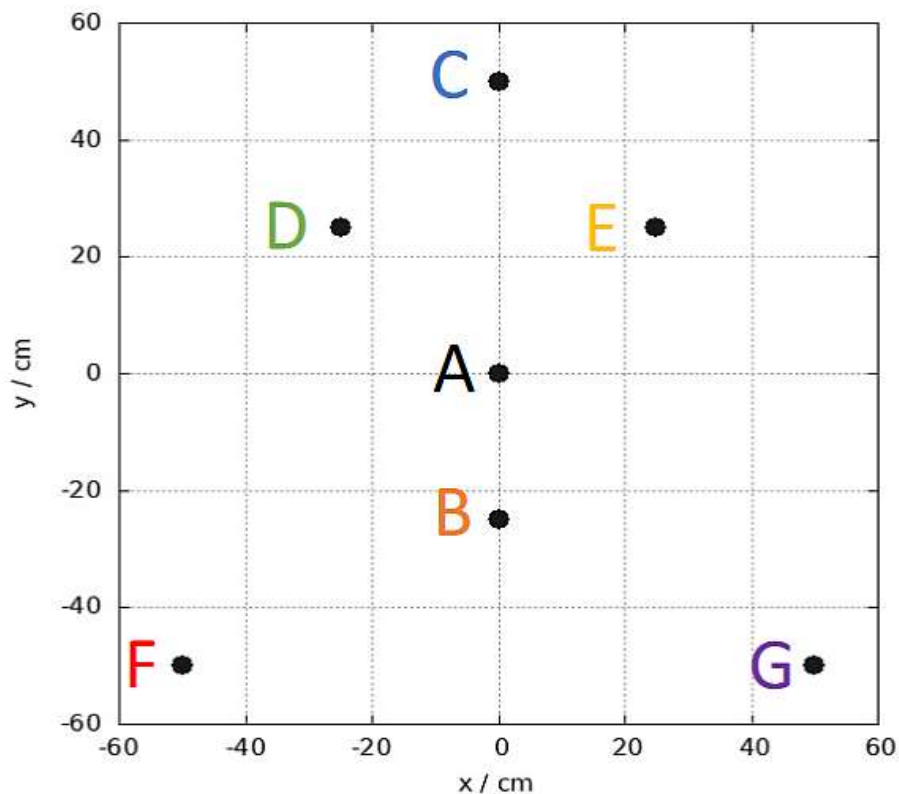


Abb. 2-2: Lage der Punktquellen in der x-y-Ebene für Simulationen und Experimente

Für den Rückbau kerntechnischer Anlagen sind Nuklide mit relevanten Halbwertszeiten oberhalb von ca. 200 d relevant. Diese lassen sich in folgende Gruppen einordnen:

- Spaltstoffe (^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , Pu-Isotope, untergeordnet ^{241}Am)
- Aktivierungsprodukte:
 - In Beton, Bauschutt (^3H , ^{22}Na , ^{134}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , bei Schwerbeton (Barytbeton) zusätzlich ^{131}Ba , vor allem ^{133}Ba)
 - In Stahl/Edelstahl: ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{65}Zn
 - In Kabel: ^{36}Cl und/oder verschiedene Al- oder Cu-Isotope
 - In Abschirmungen: Blei-, Antimon-Isotope
 - Kollimatoren: Wolfram-Isotope, ggf. Cu-Isotope
- Spaltprodukte: (^{90}Sr , ^{134}Cs und ^{137}Cs).

Die rückbaurelevanten monoenergetischen Gammastrahler und ^{60}Co wurden vom Projektpartner VKTA in [JAN21i] (Tab. 2-2) ermittelt und wurden bei den FLUKA-Simulationen und den Messungen an der HSZG berücksichtigt.

Tab. 2-2: Übersicht rückbaurelevanter monoenergetischer Gammastrahler sowie ^{60}Co

Nuklid	Energie [keV]	Compton-Kante [keV]	Emissions-Wahrscheinlichkeit [%]	Zuordnung zum Auftreten	Halbwertszeit [a]
^{241}Am	59,5	~11	35,9	Brennstoff	432
^{109}Cd	88,0	~22	3,6	Aktivierung	1,3
^{235}U	185,7	~78	57,2	Brennstoff	$7,0 \cdot 10^8$
^{137}Cs	661,6	~477	85,1	Spaltprodukt	30
^{54}Mn	834,8	~639	100	Aktivierung	0,85
^{22}Na	1274,5	~1061	100	synth.	2,6
^{40}K	1460,8	~1243	11,0	natürlich	$1,2 \cdot 10^9$
^{60}Co	1173,2 1332,5	~963 ~1117	100 100	Aktivierung	5,2

Für die Messaufgaben in AP1 und AP4 wurden vorhandene Strahlenquellen des Strahlenlabors der HSZG genutzt. Im Rahmen des Projektes wurde nach erfolgter Freigabe durch den Projektträger ein ^{60}Co -Quellensatz (BE-1376 bis BE-1383, A.6), bestehend aus acht Strahlern mit einer Aktivität von jeweils 18,5 MBq erworben. Eine Gesamtübersicht zu vorhandenen und im Rahmen des QGRIS-Projektes erworbenen Strahlenquellen enthält A.6.

2.3 Experimente mit Strahlungsdetektoren

2.3.1 Übersicht

Experimente in AP1 wurden als Testexperimente mit einfachen Objekten (Punkt- und quasi Linienquellen) mit den Nukliden ^{60}Co und ^{137}Cs sowie den von Hellma bereit gestellten Pilotgeräten:

- RSL2 (A.4) und
- RSL7 (A.5)

durchgeführt.

Der RSL2 ist dadurch gekennzeichnet, dass in einer Ebene zwei zylindrische $3''\text{-CeBr}_3$ -Detektoren positioniert waren (Abb. A-4). Es wurden Experimente mit horizontaler und vertikaler Lageausrichtung, mit Punkt- und quasi Linienquellen, mit zusätzlichen lateral und rückseitigen Störstrahlern sowie mit Abschirmungen durchgeführt.

Im RSL7 (Abb. A-5) waren sieben zylindrische 3"-Detektoren in einer Ebene angeordnet. Als zentraler Detektor kam ein 3"-CeBr₃-Detektor (Bezeichnung: DT00) als Absorptionsdetektor zum Einsatz, um den in 60°-Anordnung Plastik-(PVT-) Detektoren (Bezeichnungen: DT01 bis DT06) als Streudetektoren verbaut waren. Die Mittelpunktabstände der Streudetektoren zum zentralen Absorptionsdetektor am RSL7 beträgt 12,5 cm. Die Experimente mit RSL7 orientierten sich an den mit RSL2 durchgeführten Versuche.

Die Bezeichnung der PVT-Detektoren erfolgte vom direkt über dem DT00 angeordneten DT01 aus Ansicht hinter dem Gerät stehend gegen den Uhrzeigersinn von DT02 bis DT06.

In den Messanordnungen waren jeweils die Detektorebene parallel zur Quellenanordnung positioniert.

Als Abschirmmaterialien wurden Stahlblech und Beton eingesetzt.

Für Experimente mit seitlichen oder hinter den Detektoren angebrachten Störstrahlern wurden Kalibrierstrahler aus dem HD 330-Quellensatz (A.6) verwendet.

2.3.2 Ergebnisse der Testmessungen mit RSL2

Der Prototyp RSL2 wurde bei den Testmessungen im Aluprofilrahmen als aufstellbares Tischgerät im Strahlenlabor der HSZG eingesetzt. Die Testmessungen mit RSL2 wurden am VS „CASTOR“ durchgeführt (Abb. 2-4).

Mit RSL2 wurden Nulleffektexperimente (Messdauer: 2 h) im vorderen und hinterem Bereich des Strahlenlabors der HSZG durchgeführt. Abb. 2-3 zeigt die Ergebnisse der Messung im hinteren Bereich. Die Messung im vorderen Bereich ergab ähnliche Ergebnisse.

Auffällig ist insbesondere der ⁴⁰K-Peak als natürliche Hintergrundstrahlung im Labor.

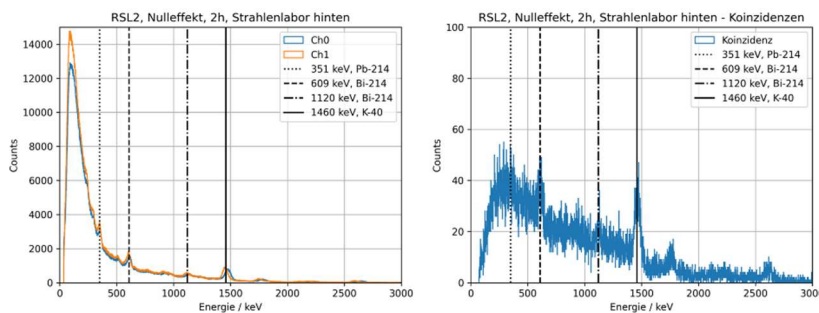


Abb. 2-3: Ergebnisse einer Nulleffektmessung im Strahlenlabor der HSZG mit RSL2 horizontal, Gesamtspektrum in den beiden CeBr₃-Detektoren (links), Koinzidenz (rechts)

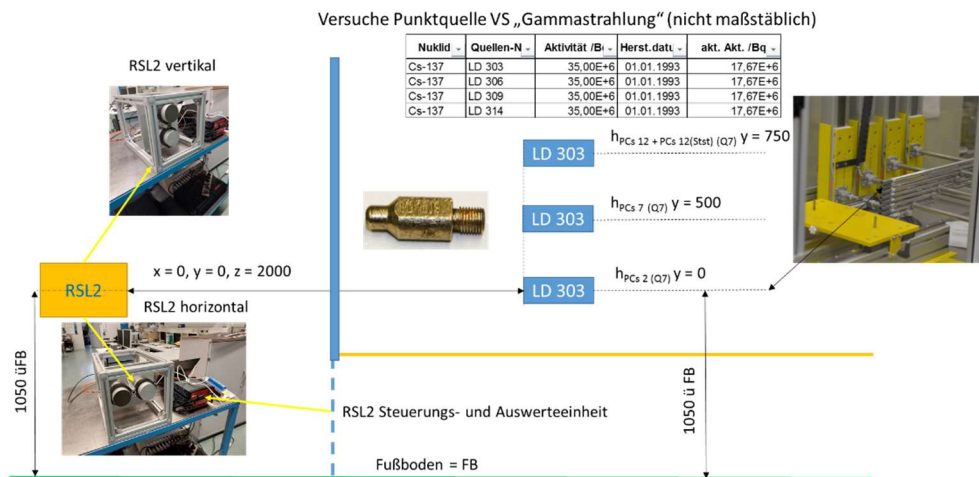


Abb. 2-4: Ausgewählte Beispiele für die Lagepositionen beim TEST von RSL2 am VS „CASTOR“

Die Abb. 2-5 und Abb. 2-6 enthalten die Ergebnisse der mit den beiden CeBr₃-Detektoren ermittelten Gesamtspektren (links, Linien: grün, ocker) und dem Koinzidenzspektrum (rechts) für die Lagepositionen A und C (Abb. 2-2). Zusätzlich wurde die Punktquelle noch auf eine Höhe von 75 cm gefahren. Die Ergebnisse sind in Abb. 2-7 dargestellt.

RSL2-Test

Quelle: Cs-137 (LD 303), Position: x = 0 cm, y = 0 cm, z = 200 cm

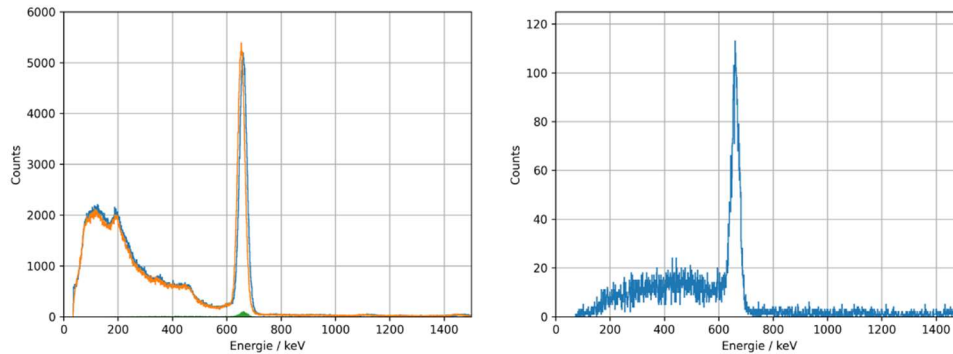


Abb. 2-5: Gesamtspektren (links) und Koinzidenz (rechts) beim TEST von RSL2 mit ¹³⁷Cs-Punktquelle (y = 0 cm) am VS „CASTOR“

RSL2-Test

Quelle: Cs-137 (LD 303), Position: x = 0 cm, y = 50 cm, z = 200 cm

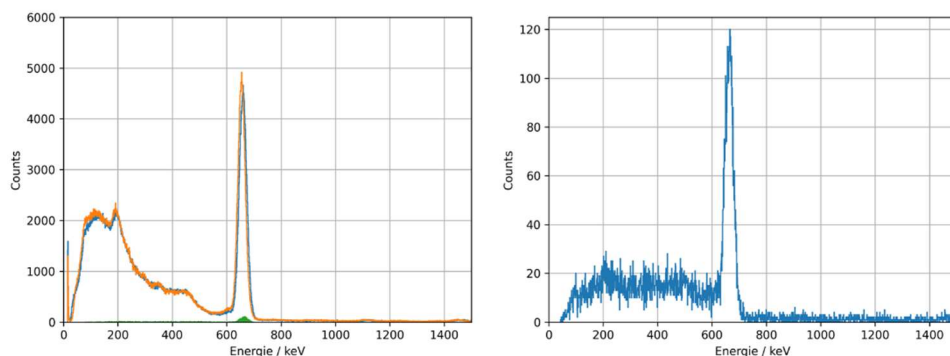


Abb. 2-6: Gesamtspektren (links) und Koinzidenz (rechts) beim TEST von RSL2 mit ¹³⁷Cs-Punktquelle (y = 50 cm) am VS „CASTOR“

RSL2-Test

Quelle: Cs-137 (LD 303), Position: x = 0 cm, y = 75 cm, z = 200 cm

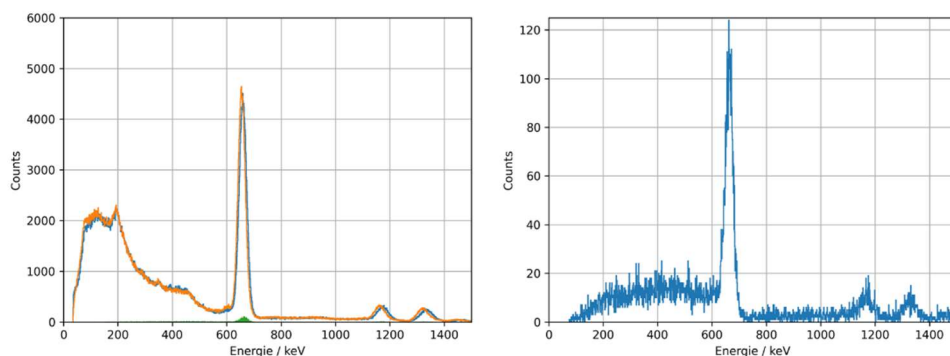


Abb. 2-7: Gesamtspektren (links) und Koinzidenz (rechts) beim TEST von RSL2 mit ¹³⁷Cs-Punktquelle (y = 75 cm) am VS „CASTOR“

Deutlich zu erkennen ist der typische ^{137}Cs -Peak bei 662 keV. Wie zu erwarten war, nahm die Impulsanzahl (Counts) auf der Peak-Spitze mit höherer Quellenlage zum RSL2 bei gleicher Messdauer ab. Die Koinzidenzen zeigen fast gleiche Verläufe und können damit nicht zur Lokalisierung der Quellenlage herangezogen werden. Nicht zu erklären ist, warum bei den kürzeren Abständen die Hintergrundstrahlung nicht detektiert wurde.

Abb. 2-8 zeigt eine Messung mit Verwendung von 4 Punktquellen als quasi Linienquelle und verkürzter Messdauer. Auch mit diesen Ergebnissen war es schwierig, eine Lokalisierung der Punktquellen zu ermitteln.

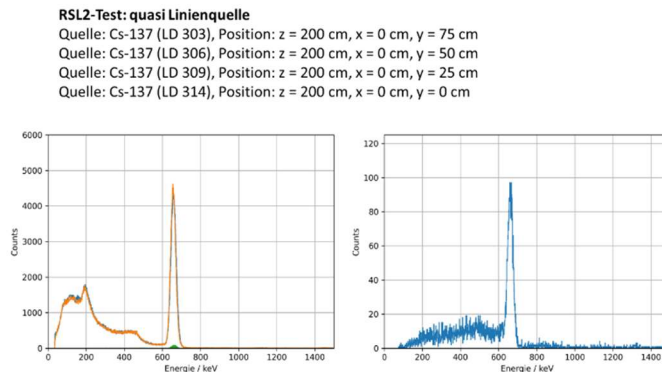


Abb. 2-8: Gesamtspektren (links) und Koinzidenz (rechts) beim TEST von RSL2 mit 4 Stück ^{137}Cs -Punktquellen am VS „CASTOR“ mit verkürzter Messdauer

Mit weiteren Experimenten wurde der Einfluss eines zusätzlichen ^{60}Co -Störstrahlers auf die Spektren bei gleicher Messdauer untersucht (Abb. 2-9). Der lateral zu den zwei CeBr_3 -Detektoren des RSL2 angebrachte Störstrahler beeinflusste die Ergebnisse erheblich. Die Impulszahl erhöhte sich entlang des ganzen Spektrums. Im horizontalen RSL2 wurden die beiden ^{60}Co -Peaks vom zum Störstrahler näherliegenden Detektor deutlich erkannt. In der Koinzidenz übertrafen die Impulshöhen des ^{60}Co -Störstrahlers den ^{137}Cs -Peak deutlich. Das kann auf die wesentlich kürzere Entfernung des Störstrahlers zum Gerät begründet werden. Eine rückseitige Positionierung hinter dem Detektor erzeugte nur eine geringfügige Erhöhung der Impulszahlen über das ganze Spektrum. Im Bereich der ^{60}Co -Peaks wurden die Peak-Lagen schwach erkannt. Das Verhalten bei rückwärtigem Störstrahler kann durch den Aufbau der Detektoren erklärt werden (vorderseitig: Messvolumen, rückseitig: Photomultiplier und Elektronik, die als Abschirmung wirken).

Störstrahler Co-60 (lateral und rückseitig zu RSL2)

Quelle: Cs-137 (LD 303), Position: z = 150 cm, x = 0 cm, y = 50 cm

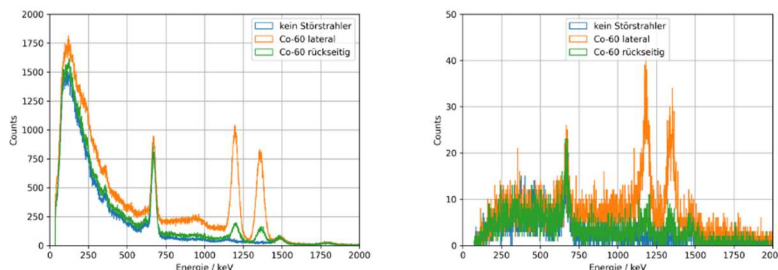


Abb. 2-9: Einfluss eines zusätzlichen ^{60}Co -Störstrahlers am RSL2 (lateral und rückseitig) auf die Gesamtspektren (links) und auf die Koinzidenzen (rechts) beim TEST von RSL2 mit ^{137}Cs -Punktquelle am VS „CASTOR“

Messungen mit horizontaler und vertikaler Lage der beiden Detektoren führten zu keinen weiteren Erkenntnissen. Bei beiden Lagen wurden die Nuklide identifiziert, jedoch war eine Rekonstruktion zur Quellenlage nicht erfolgreich. Auf Basis der Messergebnisse der

Experimente mit RSL2 und der in 0 beschriebenen Simulationsergebnisse (insb. Ergebnisse bei Berechnung der Pseudowinkel) wurde im Verbund mit den Projektpartnern vereinbart, den Prototyp RSL2 im Labor nicht weiter zu untersuchen, sondern sich auf die Verwendung des RSL7 zu konzentrieren.

2.3.3 Ergebnisse der Testmessungen mit RSL7

Für die Positionierung des RSL7 im Labor wurde ein handelsübliches mobiles Gerätetativ verwendet (Abb. A-5). Im Projektverlauf erfolgten mehrmals adaptive Einstellungen am Gerät und in der Auswertesoftware beim Projektpartner und Hersteller des RSL7 Hellma in Jena.

In ersten Testmessungen wurde der Einfluss der Einstellparameter bei Verwendung des RSL7 auf das Rekonstruktionsergebnis untersucht. Ein wesentlicher Teil der Geräteentwicklung ist die Entwicklung eines Rekonstruktionsalgorithmus und Überführung in eine Anwendersoftware. Dieses Arbeitspaket wurde vom Projektpartner FAU/DESY Imaging bearbeitet. Die entwickelte Anwendersoftware wurde mit Modellversuchen an der HSZG getestet und daraus in Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern weitere Entwicklungsschritte abgeleitet.

Neben sehr praxisnahen Modifikationen der Software war die Bewertung von zwei wesentlichen Parametern des Rekonstruktionsalgorithmus essentiell: der Iterationszahl N_I und des Background Parameters PB. Zur Bewertung der Datenakquise wurde außerdem der Energieschwellwert der PVT-Detektoren E_{\min} (PVT threshold) betrachtet, der im finalen Algorithmus jedoch nicht frei wählbar ist, sondern bereits bei der Datenakquise festgesetzt wird. Für die drei Parameter wurde mit Parameterstudien der jeweilige Wertebereich ermittelt, der eine ausreichend genaue Positionsermittlung der radioaktiven Quelle ermöglicht.

Exemplarisch sind in den Abb. 2-10 und Abb. 2-11 Rekonstruktionen einer ^{60}Co -Punktquelle in einer $2 \times 2 \text{ m} = 4 \text{ m}^2$ -Bildfläche gezeigt, die sich im Abstand von 1 m vor der Compton-Kamera (RSL7) bei den Koordinaten $x = 1 \text{ m}$ und $y = 1 \text{ m}$ befand. Erwartungsgemäß wird bei geringen N_I eine sehr ausgedehnte Intensitätsverteilung rekonstruiert (Abb. 2-10, links). Mit steigendem N_I (Abb. 2-10, Mitte und rechts) wird die Intensitätsverteilung immer schmaler und würde sich bei weiterer Erhöhung auf wenige Pixel konzentrieren. Die Position der Punktquelle wird mit hoher Genauigkeit rekonstruiert (das Maximum der Verteilung entspricht der Quellenposition) und ist unabhängig von N_I . Ein Wertebereich von $N_I = 150 \dots 300$ ist hier zu empfehlen.

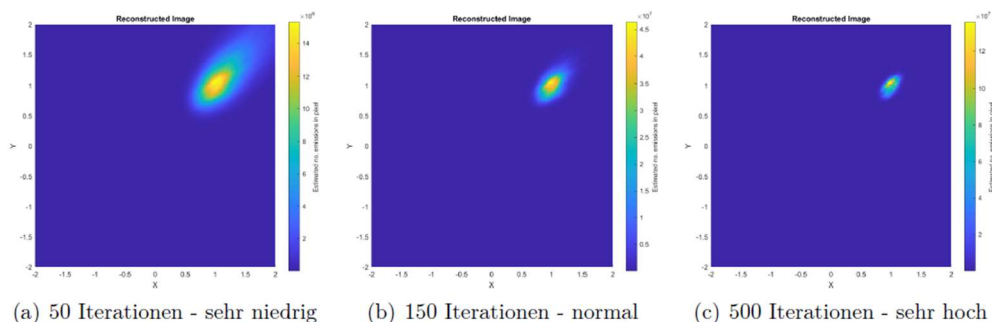


Abb. 2-10: Rekonstruktion einer ^{60}Co -Punktquelle bei der Position $x = 1 \text{ m}$ und $y = 1 \text{ m}$ in einem Abstand von $z = 1 \text{ m}$ von der Compton-Kamera RSL 7 – Variation der Iterationszahl N_I bei $PB = 33$.

Der Einfluss von PB ist in Abb. 2-11 dargestellt. Ein zu geringer Wert erzeugt eine sehr breite Intensitätsverteilung, ein zu hoher Wert verzerrt die punktförmige Darstellung der Quelle in Richtung der Außenkanten der rekonstruierten Fläche und verschiebt das Zentrum der rekonstruierten Quelle weg von der eigentlichen Position. Ein optimaler Wertebereich für ^{60}Co ist $PB = 10$ bis 35 .

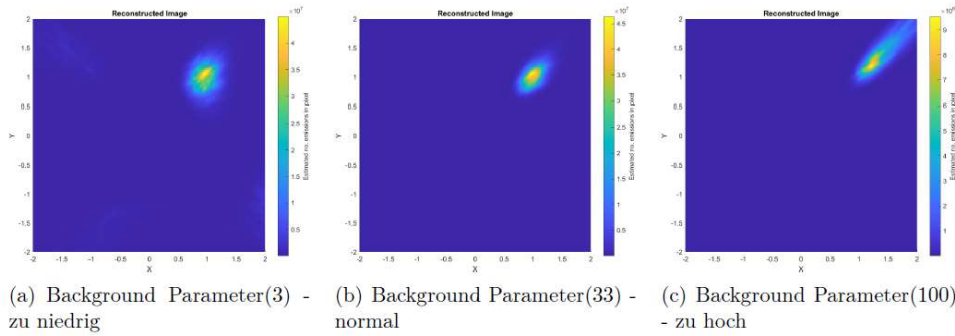


Abb. 2-11: Rekonstruktion einer ^{60}Co -Punktquelle bei der Position $x = 1\text{ m}$ und $y = 1\text{ m}$ in einem Abstand von $z = 1\text{ m}$ von der Compton-Kamera RSL 7 – Variation des Background Parameters PB bei $N_i = 200$.

Die Ergebnisse für eine ^{137}Cs -Quelle für gleiche Analysen zu den Einstellparametern werden in Abb. 2-12 und Abb. 2-13 mit Experimenten zur Quellenposition C verdeutlicht, die als roter Punkt in den Darstellungen visualisiert ist.

- Cs-137, 600 MBq, $x = 0$, $y = 50\text{ cm}$, $z = 100\text{ cm}$
- Rekonstruktion: 64x64 Pixel, 2x2m

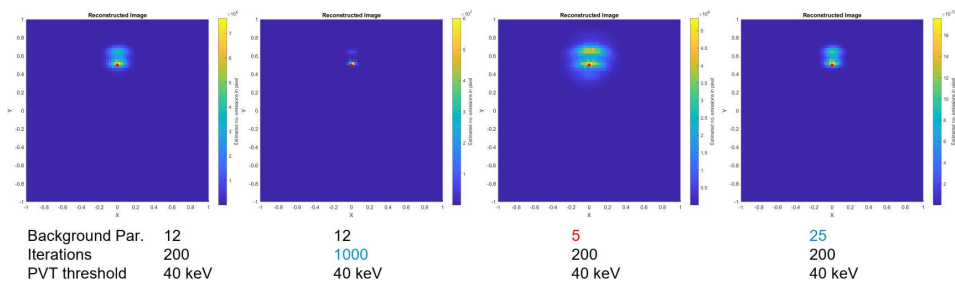


Abb. 2-12: Verständnis der Rekonstruktionsparameter für RSL7 – Variation Iterationszahl N_i und Backgroundparameter PB

- Cs-137, 600 MBq, $x = 0$, $y = 50\text{ cm}$, $z = 100\text{ cm}$
- Rekonstruktion: 64x64 Pixel, 2x2m

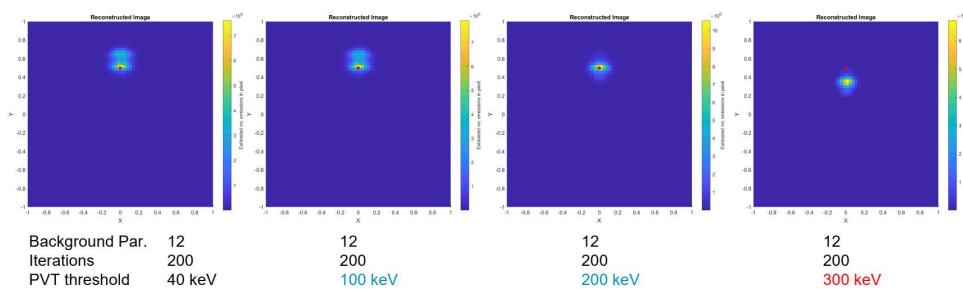


Abb. 2-13: Verständnis der Rekonstruktionsparameter für RSL7 – Variation PVT threshold

Die mit blauer Schrift markierten Einstellungen für die Background Parameter (PB), die Anzahl der Iterationsschritte (N_i) und Schwellenwerteneinstellungen (PVT threshold) zeigen dabei die besten Ergebnisse hinsichtlich einer guten Lagerekonstruktion.

Für die in Abb. 2-2 definierten Lagepositionen wurden Experimente mit einer Punktquelle ^{137}Cs mit einer angenommenen Installation 100 cm vor der Gamma-Kamera RSL7 durchgeführt. Die dabei in einer $1 \times 1\text{ m} = 1\text{ m}^2$ -Bildfläche rekonstruierten Kamerabilder sind für die Messpunkte A bis D sowie F in Abb. 2-14 dargestellt.

Quelle

- Cs-137, Aktivität 612 kBq (56 nSv/h)

Messgeometrie und -parameter

- Abstand Quelle – Detektorebene: 1 m
- Messpositionen A, B, C, D und F wie in Simulation
- Messdauer 600 s

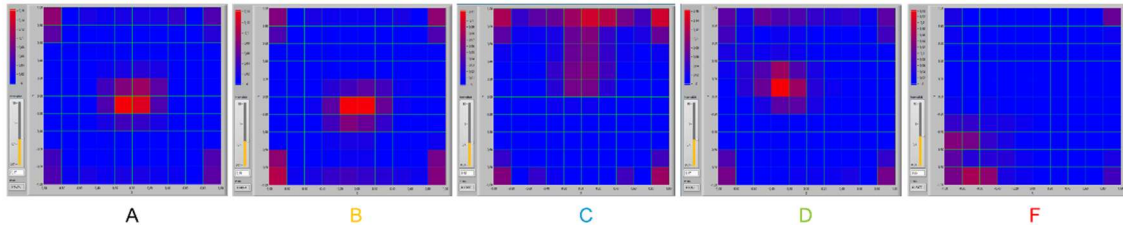
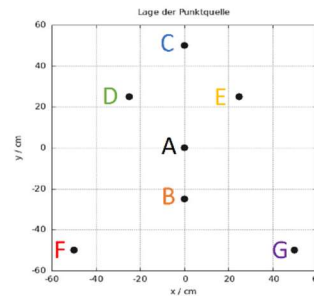


Abb. 2-14: Berechnete Compton-Kamerabilder der aufgenommenen Messwerte mit verschiedenen Positionierungen der RSL7-Gammakamera zu einer Cs-137 Quelle

Zusätzlich zu den für den Vergleich mit den FLUKA-Simulationsergebnisse geplanten Quellenpositionen (A bis G) wurde eine Serie von Experimenten mit Änderung der Quellenhöhenlage am VS „CASTOR“ durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Abb. 2-15. Die Höhenlagenverschiebungen wurden mit dem RSL7-Algorithmus gut rekonstruiert.

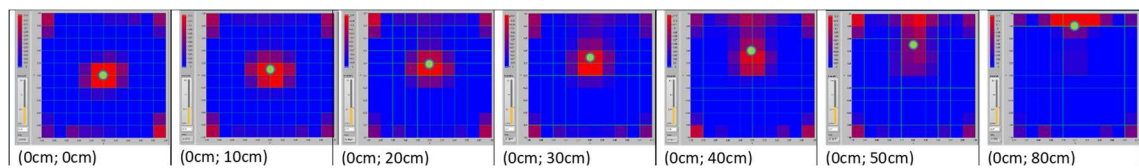


Abb. 2-15: Rekonstruktionsergebnisse zur Lokalisierung der Quellenpositionen für RSL7-Messungen mit Variation der Höhenposition bei gleicher Entfernung

Im Rückbau kerntechnischer Anlagen werden vorhandene radioaktive Quellen durch verschiedene Materialien in unterschiedlichen Geometrien abgeschirmt. Mit einfachen Modellexperimenten am VS „CASTOR“ wurde der Einfluss von Abschirmungen auf die Koinzidenzspektren untersucht. Eine ^{137}Cs -Quelle wurde im Abstand von 1 m vor der Gammakamera RSL7 positioniert und mit einem 3 mm dicken Stahlblech und anschließend zusätzlich mit einer 40 mm dicken Betonplatte abgeschirmt. In Abb. 2-16 (links) sind die Gammasppektren im Absorptionsdetektor des RSL7 (3"-CeBr₃-Detektor) sowie die Koinzidenzspektren (rechts) dargestellt. Neben der zu erwartenden Abschwächung der Impulsanzahlen, die insbesondere durch die 40 mm Betonschicht im Gammasppektrum beobachtet wurde, treten keine zusätzlichen Effekte durch Comptonstreuung in den Abschirmmaterialien in den Koinzidenzspektren auf.

Abschirmung mit 3 mm Stahlblech und 40 mm Betonplatte

- Quelle: ^{137}Cs , Position: $x = 0 \text{ cm}$, $y = 50 \text{ cm}$, $z = 100 \text{ cm}$

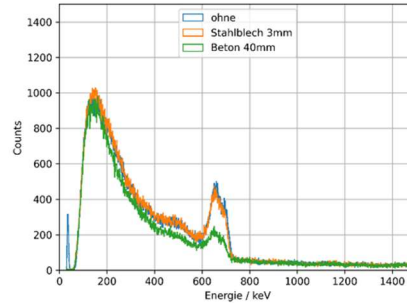
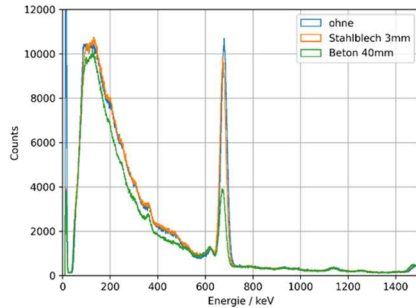
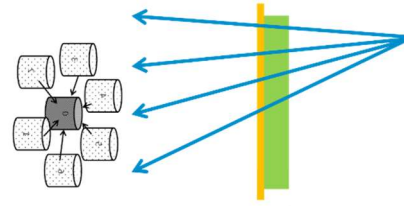


Abb. 2-16: Gammaspektren im Absorptionsdetektor des RSL7 (links); Koinzidenzspektren (rechts) für Quellenposition C und Einsatz von Abschirmmaterialien

Bei Arbeiten zur Energiekalibrierung der Detektoren des RSL7 wurden Instabilitäten nach dem Einschalten und bei Temperaturwechsel beobachtet. Experimente zur Temperaturstabilität der Prototypen in Form von Langzeittests waren im Rahmen des Verbundprojektes ursprünglich im AP5 bei Hellma vorgesehen.

Aus Praktikabilitätsgründen wurden in Absprache mit den Verbundpartnern diese aufwendigen und langwierigen Untersuchungen zu temperaturabhängigen Energiekalibrierungen von Detektoren und Auswerteeinheit zusätzlich in die Experimente an der HSZG eingebunden. Im Kapitel 5.1 werden Ergebnisse dieser Untersuchungen ausführlich dargestellt und diskutiert.

3 Detektor-Simulation mit FLUKA, Bereitstellung der Simulationsdaten für Projektpartner, Aufbereitung der Messdaten aus AP1 (AP2)

3.1 Übersicht zu FLUKA-Simulationen

Das Simulationsprogramm FLUKA wurde am CERN entwickelt und wird fortwährend weiterentwickelt. Grundlagen zum FLUKA-Codepaket sind in [FER15] dokumentiert und wurden bei der Erstellung der Eingabedatensätze mittels FLAIR (Input) berücksichtigt [FLR24]. Die jeweils aktuelle Dokumentation ist online unter [FLU24] verfügbar. FLUKA ist für strahlenschutztechnische Probleme optimiert und basiert auf dem Prinzip der Monte-Carlo-Simulationen. Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Auswertung der FLUKA-Simulationsergebnisse für die im Projekt QGRIS relevanten Fragestellungen ist beispielhaft in Abb. 3-1 gezeigt.

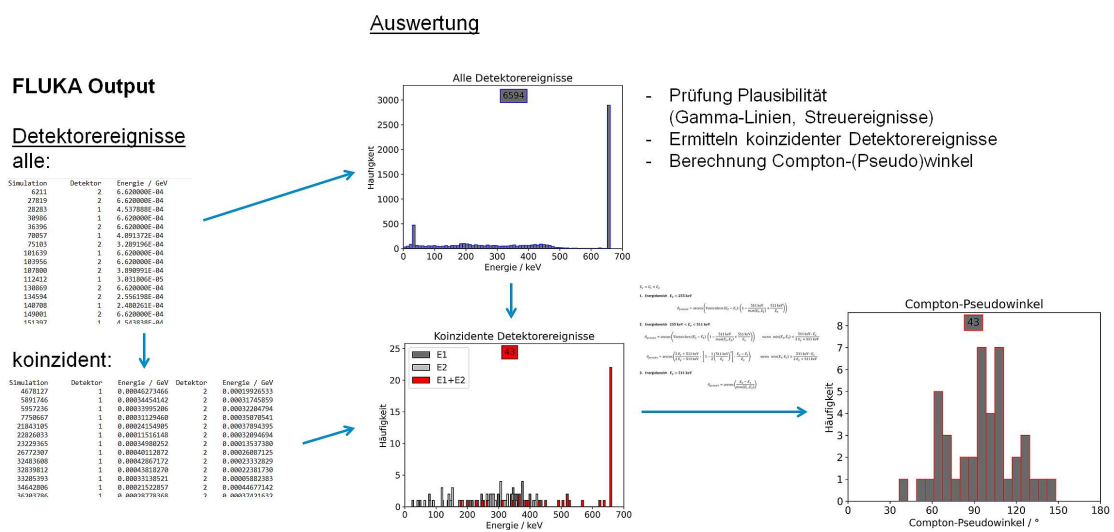


Abb. 3-1: FLUKA Output: Beispiel für die Ausgabe von Detektorereignissen und Koinzidenzereignissen im Absorberdetektor

Die prinzipielle Eignung der FLUKA-Simulationen zur Spektralanalyse (alle Detektorereignisse) wurde durch Vergleich von simulativen und experimentelle Untersuchungen für einen einzelnen ^{137}Cs -Detektor, der vom Projektpartner Hellma zur Verfügung gestellt wurde, verifiziert. Die Verwendung von ^{137}Cs als Quelle ergab die für Simulation und Messung in Abb. 3-2 dargestellten Impulshöhenspektren. Das simulierte Spektrum stimmt sehr gut mit dem tatsächlich gemessenen Spektrum überein. Dies gilt sowohl für die Form und Lage der charakteristischen Peaks als auch für die Zahl der Impulse pro Messkanal. Die Ergebnisse wurden durch Untersuchungen an sieben weiteren Nukliden bestätigt.

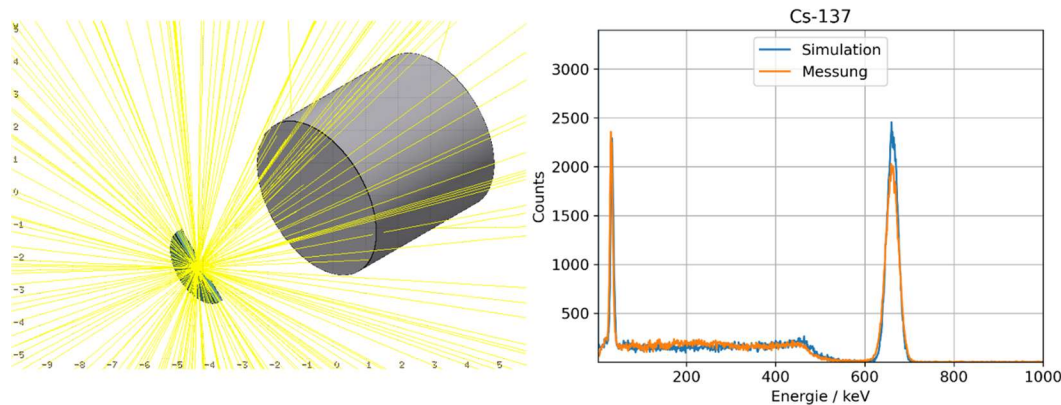


Abb. 3-2: Anordnung von radioaktiver Quelle und $2''$ CeBr₃-Detektor in der FLUKA-Simulation (links), simuliertes und tatsächlich gemessenes Impulshöhenspektrum von ^{137}Cs (rechts)

Die grundlegenden energieabhängigen Berechnungsgleichungen zur Bestimmung des Compton-Pseudowinkels bei der Auswertung der FLUKA-Simulationsergebnisse sind in Abb. 3-3 aufgeführt.

$$E_\gamma = E_1 + E_2$$

1. Energiebereich $E_\gamma < 255 \text{ keV}$

$$\vartheta_{pseudo} = \arccos\left(\text{Vorzeichen}(E_2 - E_1) \left(1 - \frac{511 \text{ keV}}{\max(E_1, E_2)} + \frac{511 \text{ keV}}{E_\gamma}\right)\right)$$

2. Energiebereich $255 \text{ keV} < E_\gamma < 511 \text{ keV}$

$$\vartheta_{pseudo} = \arccos\left(\text{Vorzeichen}(E_2 - E_1) \left(1 - \frac{511 \text{ keV}}{\max(E_1, E_2)} + \frac{511 \text{ keV}}{E_\gamma}\right)\right) \quad \text{wenn } \min(E_1, E_2) < \frac{511 \text{ keV} \cdot E_\gamma}{2 E_\gamma + 511 \text{ keV}}$$

$$\vartheta_{pseudo} = \arccos\left(\frac{2 E_\gamma + 511 \text{ keV}}{2 E_\gamma - 511 \text{ keV}} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{511 \text{ keV}}{E_\gamma}\right)^2\right] \cdot \frac{E_2 - E_1}{E_\gamma}\right) \quad \text{wenn } \min(E_1, E_2) > \frac{511 \text{ keV} \cdot E_\gamma}{2 E_\gamma + 511 \text{ keV}}$$

3. Energiebereich $E_\gamma > 511 \text{ keV}$

$$\vartheta_{pseudo} = \arccos\left(\frac{E_2 - E_1}{\max(E_1, E_2)}\right)$$

Abb. 3-3: Energieabhängige Berechnungsgleichungen zur Bestimmung des Pseudoraumwinkels bei der Auswertung der FLUKA-Simulationsergebnisse

Die HSZG führte FLUKA-Simulationen zu den Prototypen RSL2 und RSL7 sowie zu den von Hellma vorgeschlagenen weiteren Detektorgruppen (DG) durch. Der RSL7 entspricht im Aufbau der DG-1.

Die Simulationen zum RSL2 (2 CeBr₃-Detektoren) wurden für das Verständnis grundlegender Effekte und zur Validierung der Verteilungsfunktionen realisiert. Die weiteren FLUKA-Simulationen dienen zur Festlegung einer bevorzugten Detektorgeometrie für Weiterentwicklungen zum möglichen Geräteaufbau einer optimierten Gammakamera.

Aufgrund der Arbeiten von Hellma und in Absprache mit den Projektpartnern wurden zusätzlich weitere Simulationen zu ausgewählten DG durchgeführt.

3.2 FLUKA-Simulationen zu RSL2 und RSL7

3.2.1 Ortung einer Punktquelle

Als Geometriefestlegung für die Simulation des RSL2 wurde eine Punktquelle frei im Raum gewählt, d.h. die Abstrahlung von der Quelle erfolgt aus der Position ($x = 0, y = 0$) in den gesamten Raumwinkel (Abb. 3-4). Als Entfernung zum RSL2 wurde $z = 200$ cm (entspricht d) festgelegt.

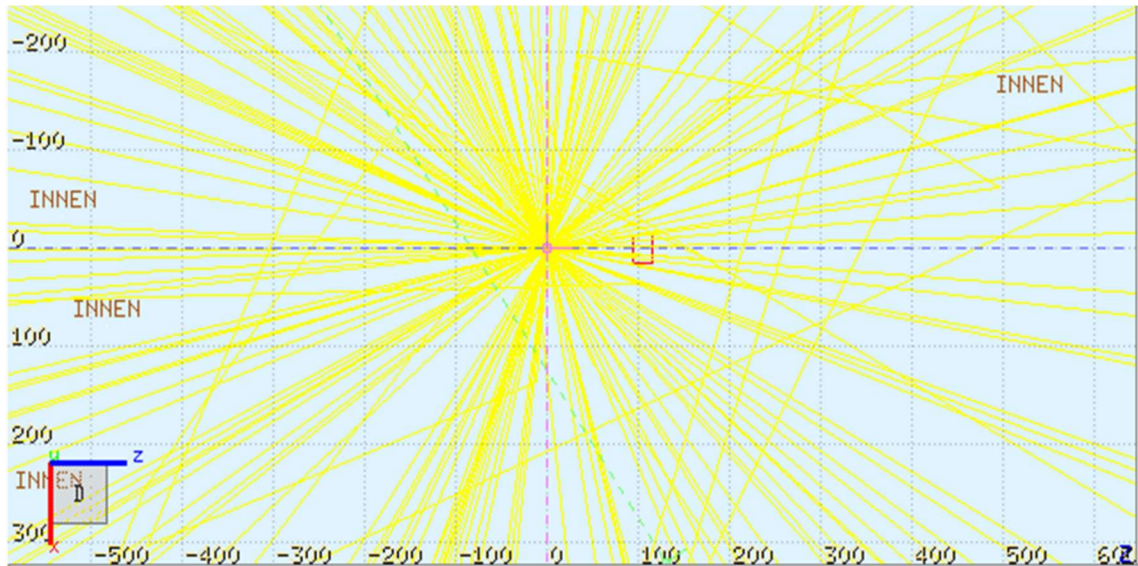


Abb. 3-4: Darstellung der Abstrahlbedingungen für FLUKA-Simulationen aus einer Punktquelle für RSL2

Eine Übersicht zu den eingesetzten Radionukliden und Raumwinkeln sowie Ergebnisse der RSL2-Simulationen mit vertikaler Detektorlage gibt Tab. 3-1.

Tab. 3-1: Übersicht und Ergebnisse der durchgeführten FLUKA-Simulationen für RSL2

Radionuklid	Winkel	Detektorereignisse	Koinzidenzereignisse
U-235	$\vartheta = 0^\circ$	9289	8
	$\vartheta = 14^\circ$	9755	18
	$\vartheta = 20,6^\circ$	9729	18
	$\vartheta = 26,6^\circ$	9410	11
	$\vartheta = 36,9^\circ$	7923	14
Ba-133	$\vartheta = 0^\circ$	5860	5
	$\vartheta = 14^\circ$	5995	7
	$\vartheta = 20,6^\circ$	5834	11
	$\vartheta = 26,6^\circ$	5573	11
	$\vartheta = 36,9^\circ$	4640	9
Cs-137	$\vartheta = 0^\circ$	1926	14
	$\vartheta = 14^\circ$	1921	7
	$\vartheta = 20,6^\circ$	1942	9
	$\vartheta = 26,6^\circ$	1865	12
	$\vartheta = 36,9^\circ$	1436	4
Co-60	$\vartheta = 0^\circ$	3764	21
	$\vartheta = 14^\circ$	3790	22
	$\vartheta = 20,6^\circ$	3487	25
	$\vartheta = 26,6^\circ$	3223	23
	$\vartheta = 36,9^\circ$	2639	22

Beispielhaft sind die FLUKA-Simulationsergebnisse für den monoenergetischen Strahler ^{137}Cs (662 keV) für einen Winkel von $\vartheta = 0^\circ$ zwischen Quelle und RSL2 in Abb. 3-5 gezeigt. Sowohl alle Detektorereignisse als auch die koinzidenten Detektorereignisse

weisen diese γ -Energie klar aus. Die Häufigkeiten der Compton-Pseudowinkel streuen zwischen 45° und 140° .

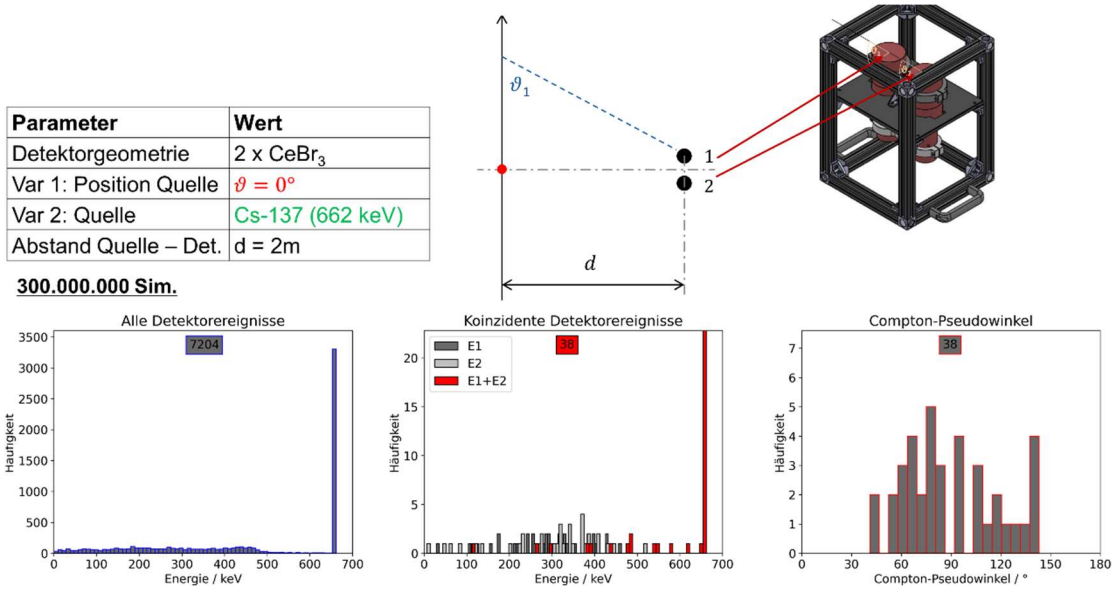


Abb. 3-5: Ergebnisse der FLUKA-Simulation für Cs-137 bei einem Winkel von Punktquelle zu Detektor von $\vartheta = 0^\circ$

Die Winkelabhängigkeiten der Compton-Pseudowinkel-Häufigkeiten für das gleiche Nuklid sind in Abb. 3-6 dargestellt. Mit steigendem Winkel zwischen Strahler und RSL2-Detektor verlagern sich die Häufigkeiten der Compton-Pseudowinkel von einer eher gleichmäßigen Verteilung um 90° zu einer Häufung um 60° .

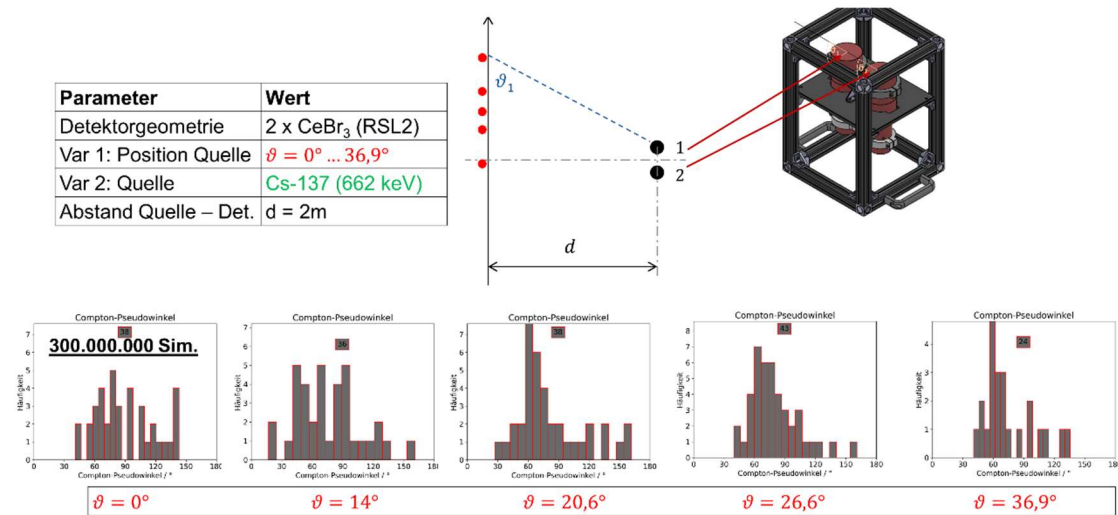


Abb. 3-6: Ergebnisse der FLUKA-Simulation für ¹³⁷Cs bei verschiedenen Winkeln

Im Vergleich dazu sind die Ergebnisse der winkelabhängigen Simulationen für 1332 keV-Photonen (wie z.B. für ⁶⁰Co-Strahler) in Abb. 3-7 aufgeführt.

Parameter	Wert
Detektorgeometrie	2 x CeBr ₃
Var 1: Position Quelle	$\vartheta = 0^\circ \dots 36,9^\circ$
Var 2: Quelle	1332 keV monoenerg.
Abstand Quelle – Det.	d = 2m

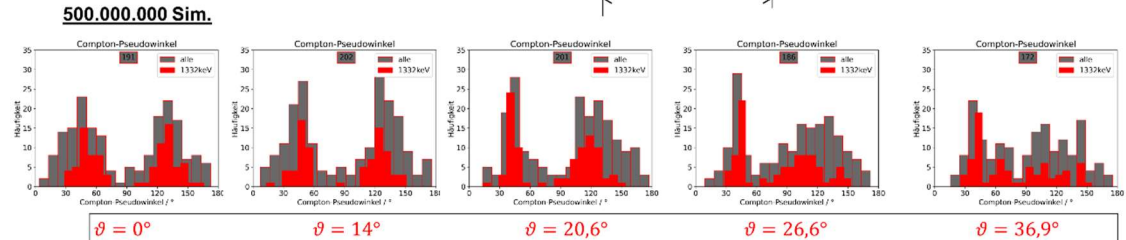
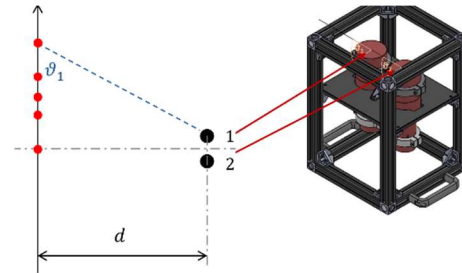


Abb. 3-7: Ergebnisse der FLUKA-Simulation für monoenergetische γ -Strahlung mit 1332 keV-Photonen (z.B. für ⁶⁰Co) bei verschiedenen Winkeln zwischen Quelle und RSL2-Detektor

3.2.2 Analyse der Vielfachstreuung im PVT-Streudetektor

In einem weiteren Schritt wurde die Vielfachstreuung in den PVT-Detektoren untersucht, die in RSL2 und RSL7 als Streudetektoren eingesetzt werden. Für die Berechnung des Compton-Winkels aus Koinzidenzereignissen werden die Energiewerte eines Streuereignisses (Detektor 0 in Abb. 1) und eines Absorptionsereignisses (Detektor 1) benötigt. Wie in Abb. 3-8 zu sehen ist, kann das Streuereignis auch aus mehreren aufeinanderfolgenden Streuprozessen resultieren, in diesem Beispiel finden zwei Streuereignisse in Detektor 0 statt. In den Simulationen hat sich gezeigt, dass in dem gegebenen Detektorvolumen der 3“ Detektoren bis zu acht Streuereignisse eines Gammaphotons zu beobachten sind. Um diese sogenannte Vielfachstreuung zu quantifizieren, wurden die Spuren von Gammaphotonen in Koinzidenzereignissen detailliert ausgewertet. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen wurden dem Projektpartner FAU zur Verwendung im Rekonstruktionsalgorithmus zur Verfügung gestellt.

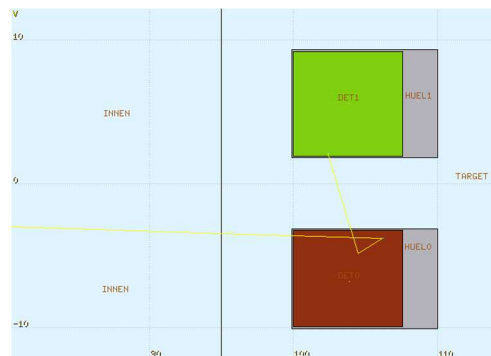


Abb. 3-8: Koinzidenzereignis eines Photons (gelbe Linie) mit einer Energie von 662 keV, bestehend aus zwei Streuereignissen in Detektor 0 (DET0, Plastik-Szintillator, unten) und einem Absorptionsereignis in Detektor 1 (DET1, CeBr₃-Detektor, oben)

3.2.3 Betrachtung der Halbräume vor und hinter der Detektorebene (RSL7)

Aufgrund der Symmetrie des RSL7 sollte es im bestehenden Aufbau nicht möglich sein zu unterscheiden, ob sich eine Quelle an einer gegebenen x-y-Position im Halbraum vor dem RSL7 oder dahinter befindet. Für derartige Symmetriebetrachtungen wurden Simulationen für eine Punktquelle ^{137}Cs (jeweils als roter Punkt dargestellt) mit einer angenommenen Installation 100 cm vor bzw. 100 cm hinter dem RSL7 durchgeführt (Abb. 3-9). Bei gleichen Rekonstruktionsbedingungen konnte die örtliche Lage (50 cm seitlicher Mittenabstand, 100 cm axialer Mittenabstand) gut ermittelt werden. Es konnte jedoch nicht unterschieden werden, ob sich die Quelle im Halbraum vor oder hinter der Kamera befindet.

Simulation: Punktquelle Cs-137

- X = -50 cm, Y = 100 cm, **Z = 100 cm** bzw. **Z = -100 cm** in Blickrichtung der Kamera
- Rekonstruktion: 64x64 Pixel², 4x4 m², 1m Abstand

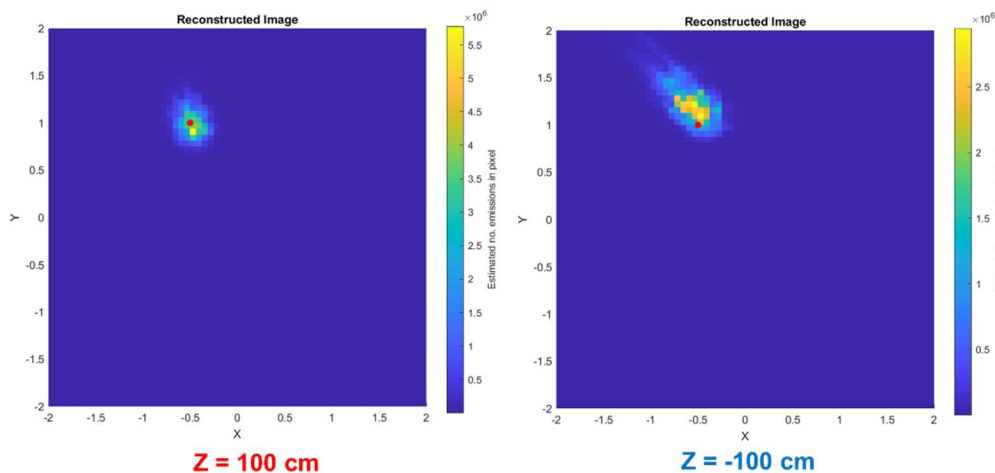


Abb. 3-9: Berechnete Compton-Kamerabilder für RSL7-Simulation mit Punktquelle ^{137}Cs bei dezentraler Positionierung

Eine breitere Intensitätsverteilung zeigte sich für die Rekonstruktion „hinter der Kamera“. Dies kommt durch die Aluminiumgehäuse der Detektoren zustande, die nach hinten verlängert sind, was zusätzliche Streueignisse hervorruft. Mit einer weiteren Simulation unter Annahme verkürzter Gehäuse, so dass nur der Szintillationskristall von Aluminium umgeben ist, wurde eine der Quellposition im vorderen Halbraum entsprechende, schmalere Verteilung berechnet (Abb. 3-10).

Simulation: Punktquelle Cs-137 – Detektorgehäuse gekürzt

- $X = -50$ cm, $Y = 100$ cm, $Z = 100$ cm bzw. $Z = -100$ cm in Blickrichtung der Kamera
- Rekonstruktion: 64×64 Pixel², 4×4 m², 1m Abstand

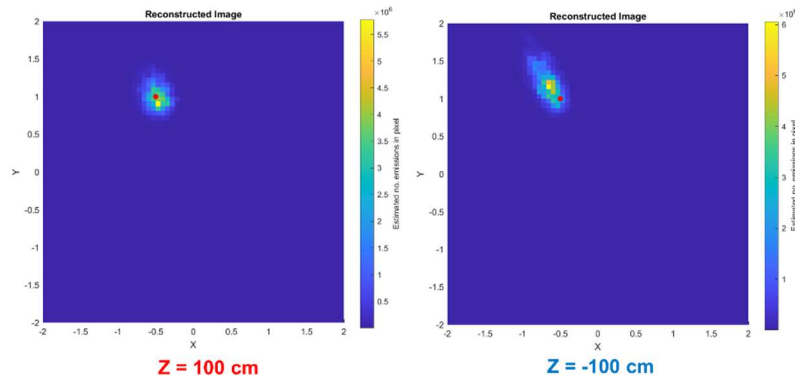


Abb. 3-10: Berechnete Compton-Kamerabilder für RSL7-Simulation mit Punktquelle ¹³⁷Cs bei dezentraler Positionierung und mit gekürztem Detektorgehäuse

Simulation: Punktquelle Cs-137 – Detektorgehäuse gekürzt und Abstand angepasst

- $X = -50$ cm, $Y = 100$ cm, $Z = 100$ cm bzw. $Z = -93$ cm in Blickrichtung der Kamera
- Rekonstruktion: 64×64 Pixel², 4×4 m², 1m Abstand

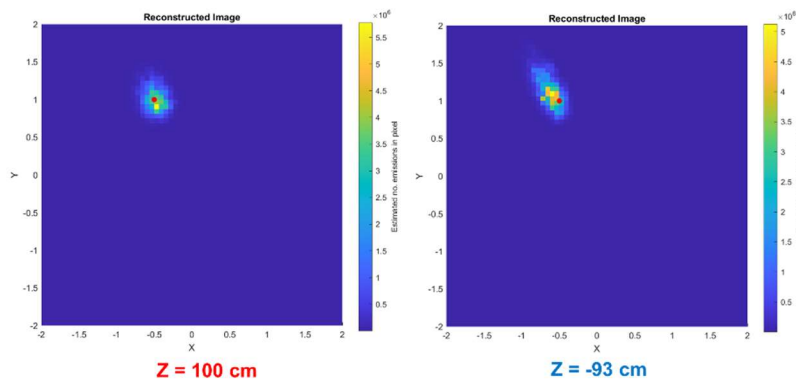


Abb. 3-11: Berechnete Compton-Kamerabilder für RSL7-Simulation mit Punktquelle ¹³⁷Cs bei dezentraler Positionierung, mit gekürztem Detektorgehäuse und angepasstem Abstand

Setzt man in der Rekonstruktion den Abstand auf 93 cm (entsprechend dem Abstand zwischen Quelle und hinterer Detektorfront), so erhöht sich die Genauigkeit der Positionsbestimmung (Abb. 3-11). Aufgrund der Spiegel-Symmetrie (Symmetrieebene = Ebene der Detektoren in halber Detektor-Länge) der Einebenen-Anordnung (RSL7) lässt sich nicht unterscheiden, ob sich eine Quelle im vorderen oder hinteren Halbraum der Compton-Kamera befindet.

3.2.4 Variation der Detektorabstände (RSL7)

Ergänzend zu den durchgeführten RSL7-Simulationen wurde der Frage nachgegangen, inwieweit eine Erhöhung der Detektorabstände in der Compton-Kamera sich positiv auf die räumliche Auflösung in der rekonstruierten Intensitätsverteilung auswirkt. Dafür wurden in den Simulationsrechnungen die Abstände der jeweiligen Detektorpaarungen im RSL7 von 12,5 auf 25 cm verdoppelt („RSL7 XXL“). Bei gleicher Anzahl von simulierten Gammaphotonen, die von einer Punktquelle abgegeben werden, führte das naturgemäß zu einer geringeren Anzahl von Koinzidenzereignissen in der Compton-Kamera (Anzahl der Koinzidenzereignisse reduziert sich etwa auf ein Viertel). Die simulierte Punktquelle

lies sich für den Fall doppelter Detektorabstände jedoch deutlich schärfer, d.h. mit einer besseren räumlichen Auflösung rekonstruieren (Abb. 3-12).

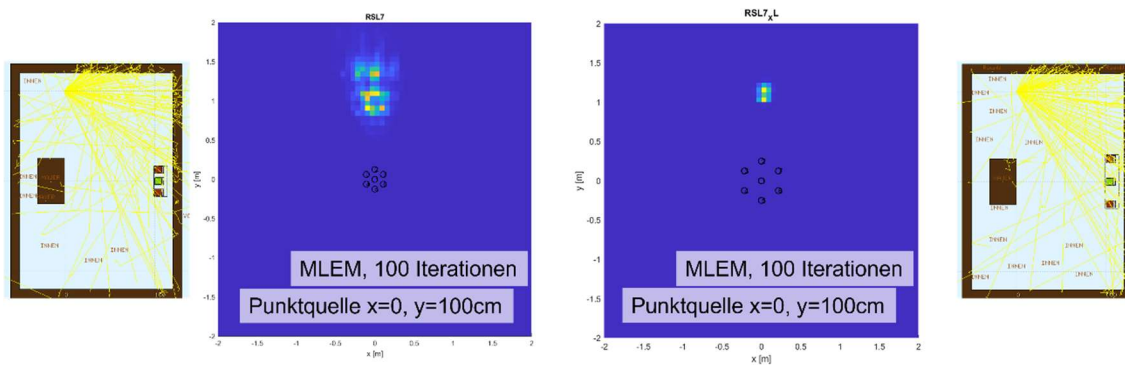


Abb. 3-12: Rekonstruktion einer ^{137}Cs -Quelle mit jeweils 3,5 Mio. Ereignissen beim RSL7 (links) und RSL7 XXL (rechts)

Wie in Abb. 3-12 verdeutlicht, wird bei ca. 1700 Koinzidenzereignissen im RSL7 die Quelle deutlich unschärfer rekonstruiert als beim RSL7 XXL (rechts) mit nur ca. 400 Koinzidenzereignissen.

3.3 Detektorgruppensimulationen mit FLUKA

3.3.1 Definition der Detektorgruppen (DG)

Es wurden Geometrien für FLUKA-Simulationen entwickelt, welche die von Hellma vorgeschlagenen DG berücksichtigen.

Eine Übersicht zu den von Hellma vorgeschlagenen DG [PET22] zeigt Tab. 3-2.

Tab. 3-2: Übersicht zu den von Hellma vorgeschlagenen Detektorgruppen [PET22]

DG	Anzahl Detektoren	Anzahl Detektorpaare	Geometrie
DG-1	7	6	planar, kreisförmig
DG-2	6	12	planar, kreisförmig
DG-3	6	12	planar, dreieckig
DG-4	6	15	planar, fünfeckig
DG-5	4	6	Tetraeder
DG-6	8	22	Würfel
DG-7	6	15	2 Ebenen
DG-8	7	18	2 Ebenen

Die allgemeinen geometrischen Bedingungen der DG sind in Abb. 3-13 dargestellt. Detaillierte Angaben zu weiteren Randbedingungen der DG sind in [PET22i] benannt.

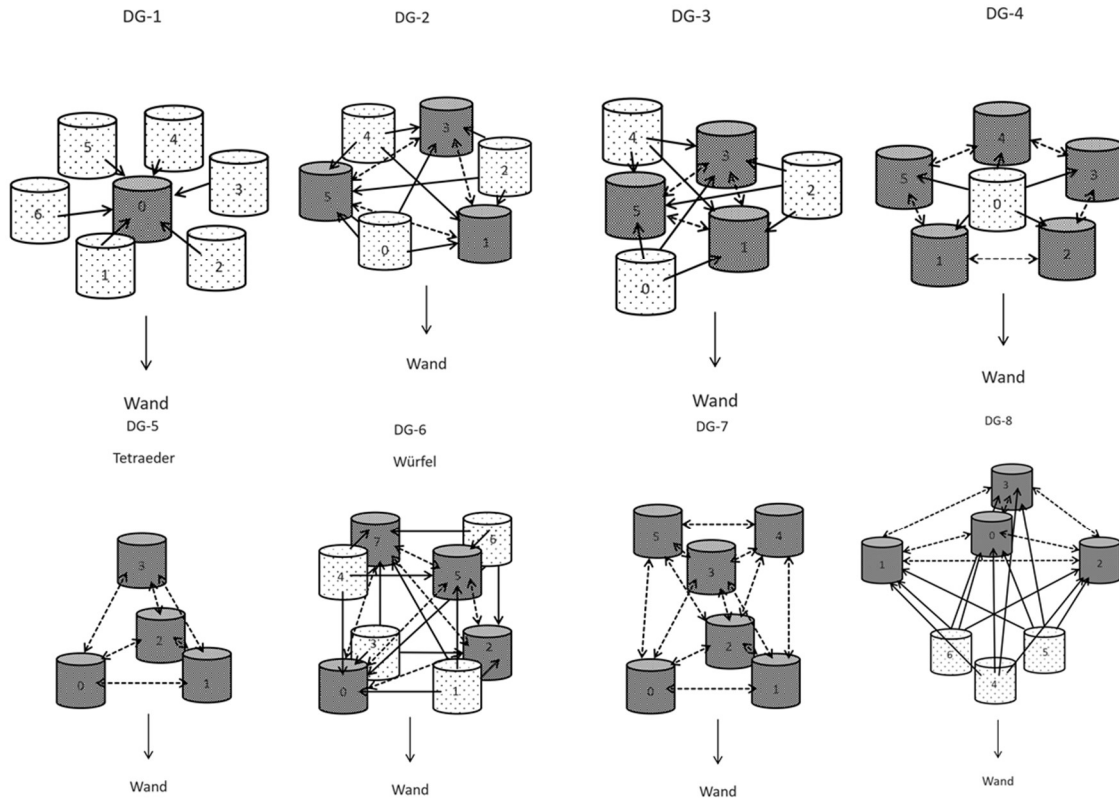


Abb. 3-13: Übersicht zu den geometrischen Bedingungen der DG

Aufgrund der Arbeiten von Hellma und in Absprache mit den Projektpartnern wurde eine weitere Auswahl von in Frage kommenden DG für weitere Simulationen getroffen. Für die zusätzlichen Simulationen wurden die planaren DG und DG, die ausschließlich CeBr_3 -Detektoren enthalten, aussortiert. Für die zusätzlichen Simulationen blieben also DG-6 (bestehend aus 8 Detektoren) und DG-8 (bestehend aus 7 Detektoren).

Die zu simulierenden DG wurden um eine weitere Bauart (DG-9) ergänzt. In dieser DG sind die Detektoren in 3 Ebenen in Form eines Kegels angeordnet (Abb. 3-14).

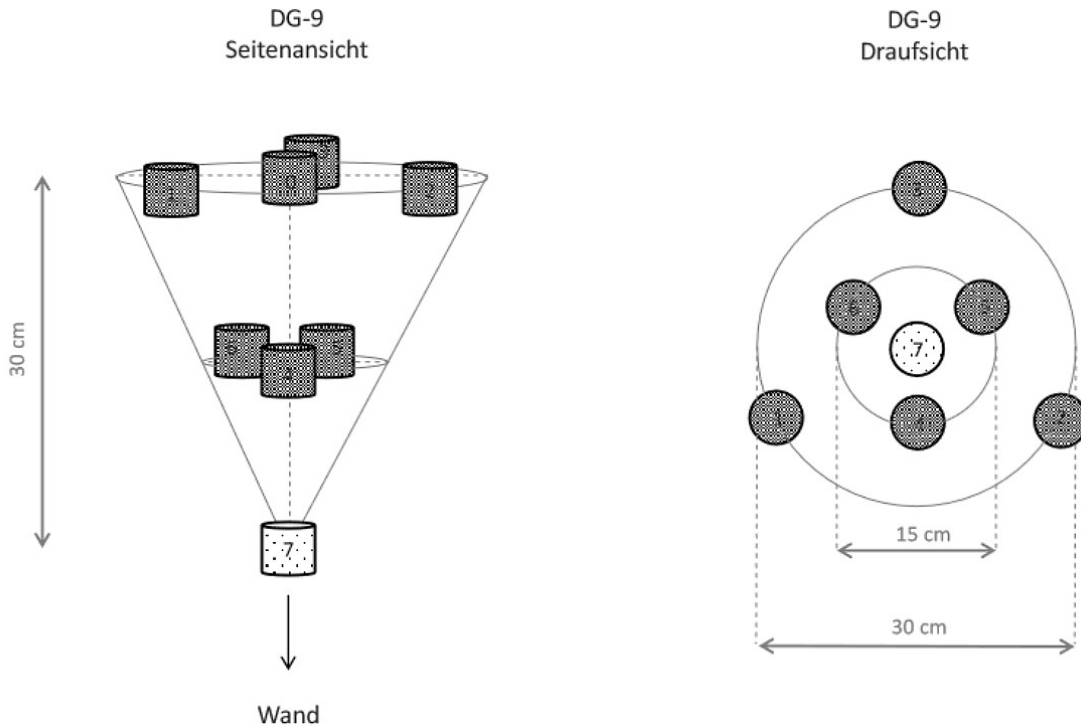


Abb. 3-14: Definition einer zusätzlichen DG-9 mit einem kegelförmigen Aufbau über 3 Ebenen

3.3.2 Ergebnisse der FLUKA-Simulationen zu den DG

An der HSZG wurden mit FLUKA die Detektorereignisse für die DG-1 bis DG-8 jeweils mit drei Nukliden (^{60}Co , ^{137}Cs und ^{241}Am) als Punktquelle an sieben verschiedenen Positionen (A-G, Tab. 2-1, Abb. 2-2) mit FLUKA simuliert. Entsprechend der aufgestellten Versuchsmatrix (2.2) wurde der Mittelpunkt der jeweiligen DG in der x-y-Ebene bei $(x = 0$ und $y = 0$ cm) in einem Abstand von $z = 100$ cm von der Ebene der Punktquellen festgelegt.

Für die Auswertung wurde zunächst der direkte Abstand der Punktquelle zur DG verwendet, ohne den Einfallswinkel zu beachten (Position A, Tab. 2-1). Die weiteren Simulationen berücksichtigten die Positionen B bis G. Pro DG wurden somit 21 Simulationsrechnungen (3 Nuklide an 7 Positionen) mit FLUKA vorbereitet, ausgeführt und ausgewertet. Damit wurden 168 Ergebnisdatensätze erstellt.

Zunächst wurden Radionuklide als Quelle verwendet, d.h. durch FLUKA wurde die gesamte Zerfallsreihe des jeweiligen Nuklids gerechnet. Dies führt zu sehr langen Rechenzeiten, weshalb in Folge nur noch die wesentlichen Energien der Gammastrahlung des jeweiligen Nuklids als monoenergetische Quelle verwendet wurde.

Für DG-9 wurden – analog zu den anderen simulierten DG – FLUKA-Simulationen mit Punktquellen an den sieben verschiedenen Positionen (A bis G) mit den Gammaenergien von ^{60}Co , ^{137}Cs und ^{241}Am ausgeführt.

Die Simulationsziele waren:

- Detektion von koinzidenten Detektorereignissen (Streuereignis + Absorption)
- Auswertung der Häufigkeitsverteilung von Koinzidenzereignissen.

Nachfolgend werden die berechneten Detektorereignisse vergleichend dargestellt und die Simulationsergebnisse bewertet.

Die allgemeine Vorgehensweise bei der Bewertung der FLUKA-Simulationsergebnisse für die verschiedenen DG für monochromatische Punktquellen an den Quellenpositionen A bis G zeigt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Es wurden für jedes Radionuklid 10 Mio. Zerfallsereignisse in einem begrenzten Raumwinkel (1750 mrad) durchgeführt. Dieser Raumwinkel umfasst ausgehend von der Punktquelle die gesamte DG.

Simulation:

- Quelle 662 keV bzw. 1332 keV (monochromatisch)
- Ereignisse: $1 \cdot 10^7$ / 1750 mrad (Punktquelle mit $7,2 \cdot 10^7$ Zerfällen)
- Positionen A – F, Abstand Quelle – DG: $z = 100$ cm

Bewertung anhand:

- Anzahl der Streu- und Absorptionsereignisse in allen Detektoren („Gesamtereignisse“ N_{ges})
- Anzahl der Koinzidenzereignisse (N_K)
- **Verhältnis** $R_K = \frac{N_K}{N_{ges}}$
- Anzahl unidirektionaler Koinzidenzereignisse (N_{uni})
- Anzahl bidirektionaler Koinzidenzereignisse (N_{bi})
- **Verhältnisse** $R_{uni} = \frac{N_{uni}}{N_K}$ und $R_{bi} = \frac{N_{bi}}{N_K}$

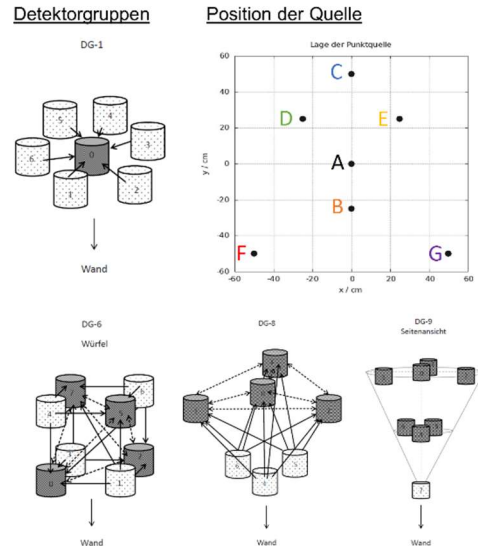


Abb. 3-15: Vorgehensweise bei der Bewertung der FLUKA-Simulationsergebnisse für die verschiedenen DG für monochromatische Punktquellen an den Quellenpositionen A bis F

Eine gesamte Darstellung der Ergebnisse der 168 Ergebnisdatensätze der FLUKA-Simulationen ist im Rahmen dieses Abschlussberichtes nicht möglich. Daher werden beispielhafte Ergebnisse, insbesondere für die DG-1 (RSL7), DG-3, DG-6 (inkl. Variationen), DG-8 und DG-9 gezeigt. Zusätzlich sind Simulationsergebnisse für den während des Projektes bei Hellma in Entwicklung befindlichen RSL4 [PET24] aufgeführt. Die Ergebnisdatensätze sind an der HSZG archiviert und können für weitere Verwendungen auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden. Die vergleichende Bewertung der Simulationsergebnisse mit FLUKA zwischen den verschiedenen DG wird insbesondere durch die Auswertung der detektierten Koinzidenzereignisse durchgeführt.

In Absprache mit Hellma wurden die DG-2 und DG-4 (planare DG) sowie die, ähnlich zum RSL2 mit ausschließlich aus $CeBr_3$ bestehenden DG 5 und DG 7, bereits für die finale Version der Gamma-Kamera ausgeschlossen, da sie im Vergleich zu den DG mit mind. 2 Detektorebenen deutlich weniger Koinzidenzereignisse aufweisen. Die FLUKA-Simulationen wurden um zwei Modifikationen der DG 6 (6a und 6b) und eine neue DG 9 erweitert. Beispielhaft ist die FLUKA-Simulation der DG 9 mit einer Punktquelle in Abb. 3-16 gezeigt. Die Detektoren sind in 3 Ebenen angeordnet, bestehend aus einem Plastikszintillator als Streudetektor und 7 $CeBr_3$ -Szintillatoren als Absorptionsdetektoren.

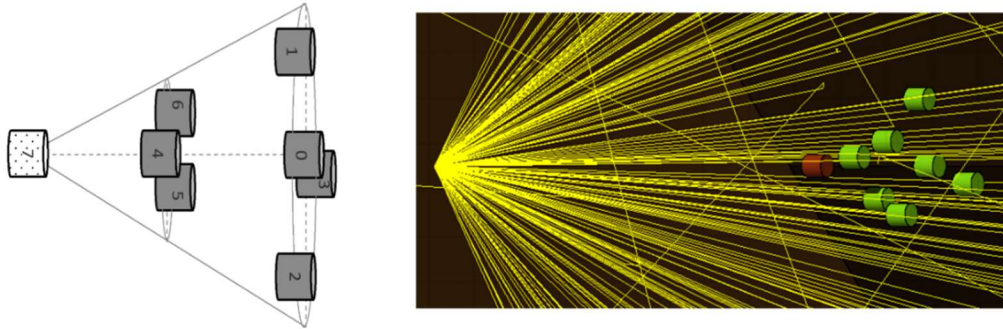


Abb. 3-16: Aufbau der DG-9 (links), 200 Simulationereignisse einer Punktquelle und der DG-9 (rechts), die Spuren der jeweiligen Photonen sind als gelbe Linien dargestellt

Im Folgenden werden ausgewählte Resultate von FLUKA-Simulationen für die DG-3 dargestellt. Diese planare Detektorgeometrie besteht aus jeweils drei CeBr_3 - und drei EJ200-PVT-Detektoren. Die Detektormittelpunkte sind auf einem gleichseitigen Dreieck mit der Kantenlänge 25 cm angeordnet, siehe Abb. 3-17 (links). Die CeBr_3 -Detektoren sind grau dargestellt, EJ200-Detektoren weiß. Die räumliche Zuordnung der Detektoren und der in der ersten Simulationskampagne möglichen Punktquellen ist in Blickrichtung der z-Achse in Abb. 3-17 (rechts) dargestellt. Für die Simulation wird ein Abstand von Punktquelle und Detektorebene in z-Richtung von $z = 100$ cm vorgegeben.

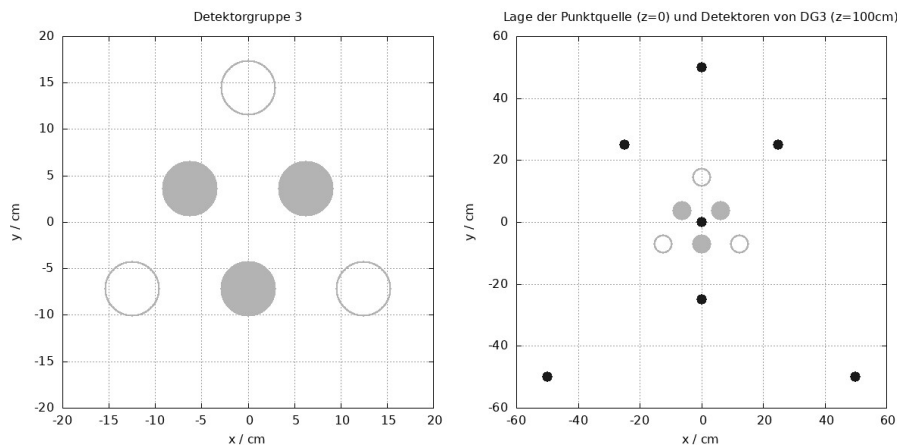


Abb. 3-17: Detektoranordnung für DG-3 (links) und Lage der in den Simulationsrechnungen jeweils verwendeten Punktquellen und Detektoren mit einem Abstand von $z = 100$ cm (rechts)

Laut der Definition von Hellma ergeben sich für DG-3 somit neun unidirektionale (EJ200 \rightarrow CeBr_3) und drei bidirektionale Detektorpaare ($\text{CeBr}_3 \leftrightarrow \text{CeBr}_3$). In der Auswertung werden mit Hilfe der in [PET22i] aufgeführten Gleichungen die Comptonwinkel für unidirektionale Detektorpaare bzw. die Pseudo-Comptonwinkel für bidirektionale Detektorpaare berechnet und als Verteilungsdiagramm im Bereich zwischen 0 und 180° dargestellt.

Exemplarisch ist diese Auswertung für die unidirektionalen Detektorpaare der DG-3 mit einer Am-241 Punktquelle in zwei Position ($[x, y = 0 \text{ cm}]$ bzw. $[x, y = -50 \text{ cm}]$) in den Abb. 3-18 und Abb. 3-19 dargestellt. Im Falle der Quellenposition im Zentrum der Detektoranordnung ergibt sich eine annähernd symmetrische Verteilung der Compton-Winkel mit einem Maximum im Bereich von 90° (siehe Abb. 3-19, rechts). Wird die Quelle deutlich aus der Mittelpunktslage verschoben, in diesem Fall nach links unten, so wird die Verteilung der Comptonwinkel asymmetrisch und verschiebt sich zu kleineren Winkeln. Das Maximum ist nun im Bereich 70° , wie in Abb. 3-20 zu sehen ist. Naturgemäß wird die Anzahl der Detektorereignisse – und damit auch der Streuereignisse – geringer, wenn die Quelle aus der Mittelpunktlage verschoben wird.

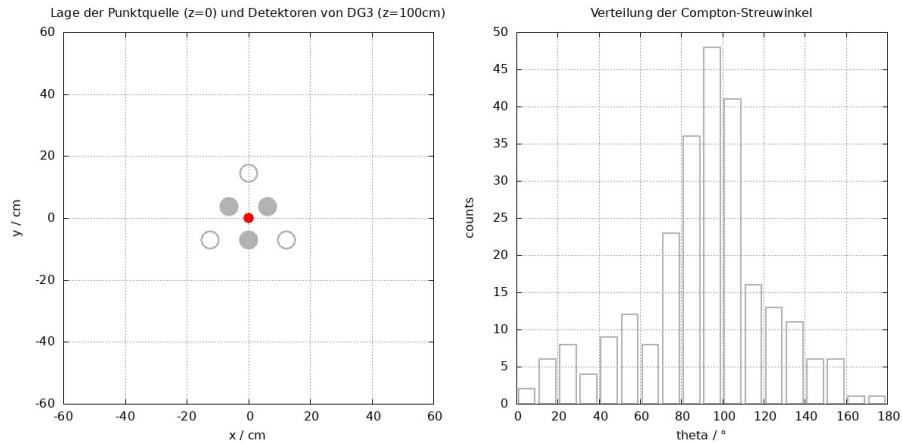


Abb. 3-18: Mittelpunktlage der Punktquelle bei $x, y, z = 0$ und Detektoren bei $x, y = 0, z = 100$ cm (links), berechnete Verteilung der Compton-Winkel der unidirektionalen Detektorpaare (rechts)

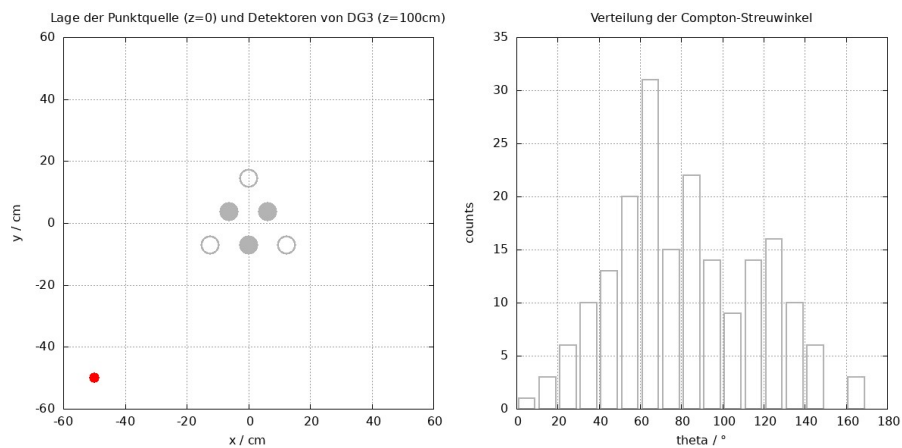


Abb. 3-19: Lage der Punktquelle weit außerhalb der Mittelpunktlage bei $x, y = -50$ cm, $z = 0$ und Detektoren bei $x, y = 0, z = 100$ cm (links), berechnete Verteilung der Compton-Winkel der unidirektionalen Detektorpaare (rechts)

Durch die Lageänderung der Punktquelle zur DG-3 ist eine Verschiebung der Verteilung der Compton-Streuwinkel um 90° hin zu 60° zu beobachten.

Abb. 3-20 zeigt die Gesamt- und Koinzidenzereignisse der Simulationen für die verschiedenen DG für eine ¹³⁷Cs-Punktquelle an Quellenposition C und den Vergleich zu einer entsprechenden Messung mit RSL7. In Abb. 3-21 werden für die gleiche Quellenposition die Simulationsergebnisse für eine angenommene monochromatische ⁶⁰Co-Punktquelle gezeigt.

Gesamtereignisse N_{ges} und Koinzidenzereignisse N_K

- Beispiel Quellposition C
- 662 keV (¹³⁷Cs)

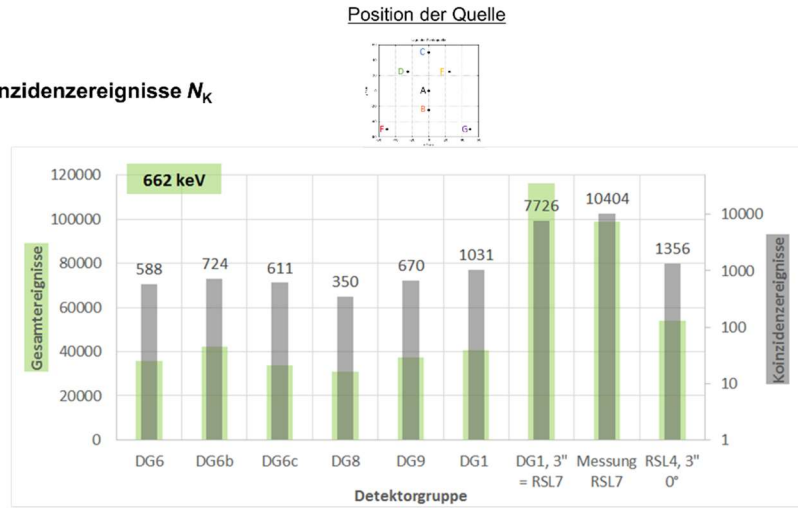


Abb. 3-20: FLUKA Output: Gesamt- und Koinzidenzereignisse für die verschiedenen DG für eine ¹³⁷Cs-Punktquelle an Quellenposition C

Gesamtereignisse N_{ges} und Koinzidenzereignisse N_K

- Beispiel Quellenposition C
- 1332 keV (⁶⁰Co)

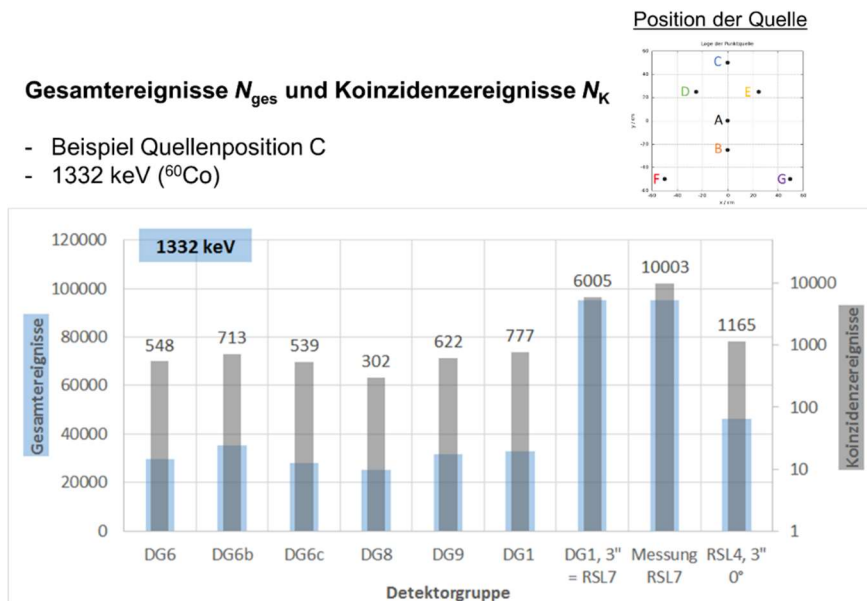


Abb. 3-21: FLUKA Output: Gesamt- und Koinzidenzereignisse für die verschiedenen DG für eine angenommene monochromatische ⁶⁰Co-Punktquelle an Quellenposition C

Aus diesen Ergebnissen lässt sich die gute Eignung der DG-1 ableiten, die ja als RSL7 ausgeführt wurde. Dies wurde auch durch die Messungen im Strahlenlabor bestätigt.

Beim Vergleich uni- und bidirektionaler Streueignisse in den DG für Quellenposition C wird deutlich, dass für RSL7 (DG-1) und RSL4 die unidirektionalen Streueignisse dominieren, was bei den DG-6, DG-8 und DG-9 nicht der Fall ist (Abb. 3-22, rechts).

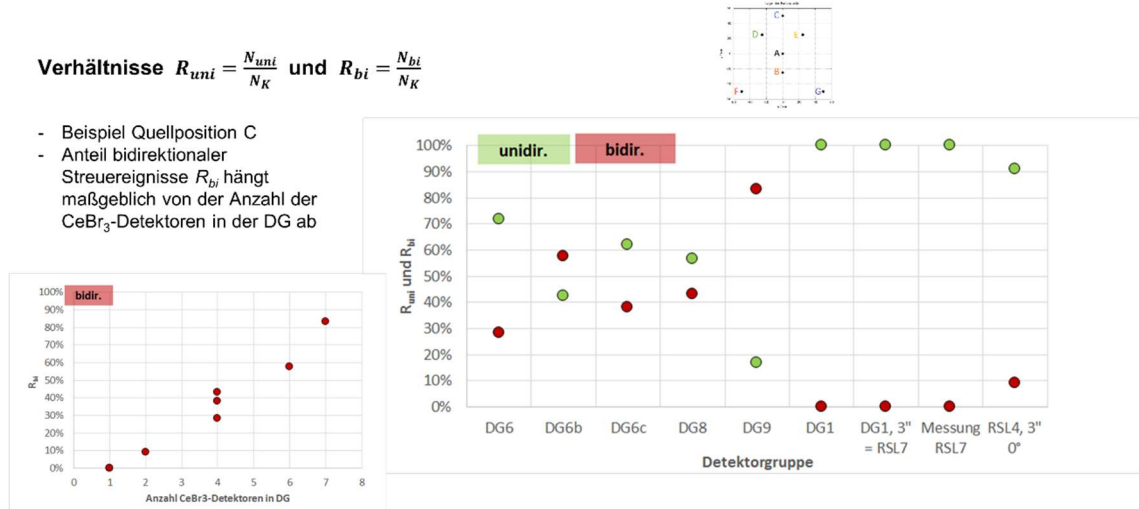


Abb. 3-22: Analyseergebnisse zum Vergleich uni- und bidirektionaler Streueignisse in den DG für Quellenposition C und Einfluss der Anzahl der CeBr₃-Detektoren in der DG auf den Anteil bidirektionaler Streueignisse

Den Einfluss der Anzahl der CeBr₃-Detektoren in der DG auf den Anteil bidirektionaler Streueignisse zeigt Abb. 3-22, links. Der Anteil der bidirektionalen Streueignisse nimmt mit Erhöhung der Anzahl der CeBr₃-Detektoren in den DG rapide zu. Daher ist die Anwendung von ein bis max. zwei CeBr₃-Detektoren in den DG abzuleiten, was für RSL7 und RSL4 zutreffend ist.

Den Einfluss der Messdauer in Form der Anzahl an Koinzidenzereignissen auf die Rekonstruktion der Lage der Punktquelle (roter Punkt) zeigt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Die rekonstruierte Intensitätsverteilung schärft sich mit zunehmender Anzahl von Detektorereignissen und bildet bei > 1000 Koinzidenzereignissen näherungsweise die zu erwartende Punktquelle ab.

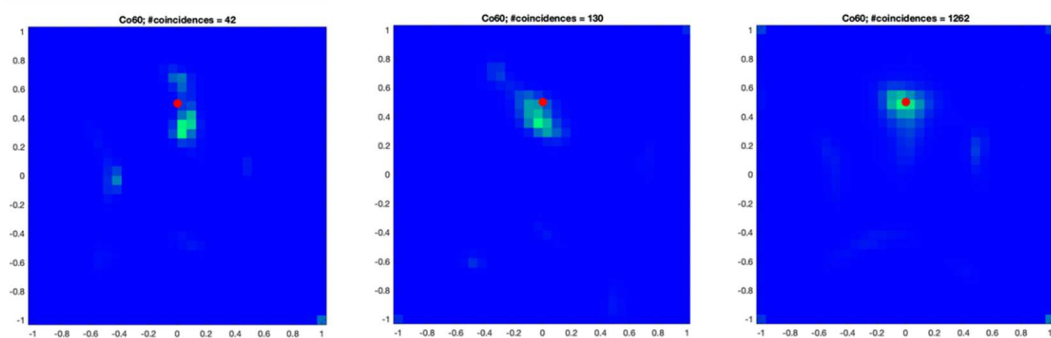


Abb. 3-23: Simulationsergebnisse für DG-6 mit einer ⁶⁰Co-Punktquelle auf einer 4 m² Bildfläche bei unterschiedlich langen Messdauern (Koinzidenzereignisse)

Hier wird klar die Verbesserung der Lagerekonstruktion bei zunehmender Messdauer deutlich.

3.4 Aufbereitung der Messdaten aus AP1

Exemplarisch sind in den Abb. 3-24 und Abb. 3-25 Rekonstruktionen einer ^{137}Cs - und ^{60}Co -Punktquelle in einer $2 \times 2 \text{ m} = 4 \text{ m}^2$ -Bildfläche gezeigt.

Cs-137, Position $x = 0,0 \text{ m} / y = 0,5 \text{ m}$, Abstand 1 m

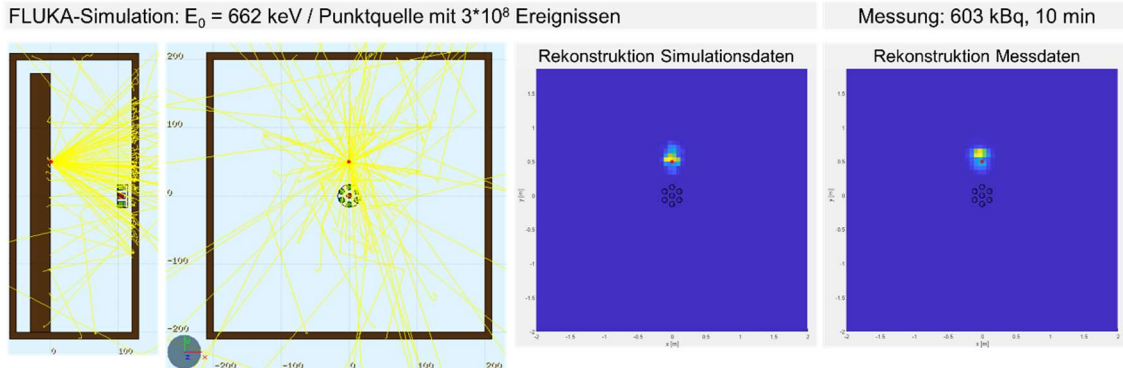


Abb. 3-24: Randbedingungen der FLUKA-Simulation (links), Vergleich der Lagerekonstruktion zwischen Simulation und Messung (rechts) für Quellenposition C

Die Position der ^{137}Cs -Quelle bei den Messungen wurde mit hoher Genauigkeit durch die FLUKA-Simulation rekonstruiert.

Die Messung mit der ^{60}Co -Punktquelle ist mit einer höheren Aktivität und einer längeren Messdauer durchgeführt worden.

Co-60, Position $x = 1,5 \text{ m} / y = -0,9 \text{ m}$, Abstand 1 m

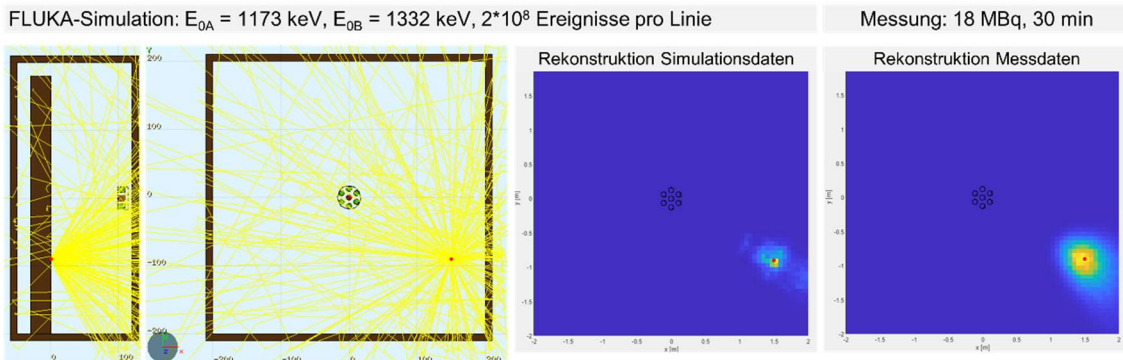


Abb. 3-25: Randbedingungen der FLUKA-Simulation (links), Vergleich der Lagerekonstruktion zwischen Simulation und Messung (rechts) für eine alternative Quellenposition mit großem Einfallswinkel

Ebenfalls wurde die Position der ^{60}Co -Quelle bei den Messungen für eine alternative Quellenposition mit großem Einfallswinkel mit hoher Genauigkeit durch die FLUKA-Simulation rekonstruiert.

Für diese beiden unterschiedlichen Quellen und Lagepositionen wurden die Intensitätsverteilungen mit Halbwertsbreiten (FWHM) ausgewertet (Abb. 3-26).

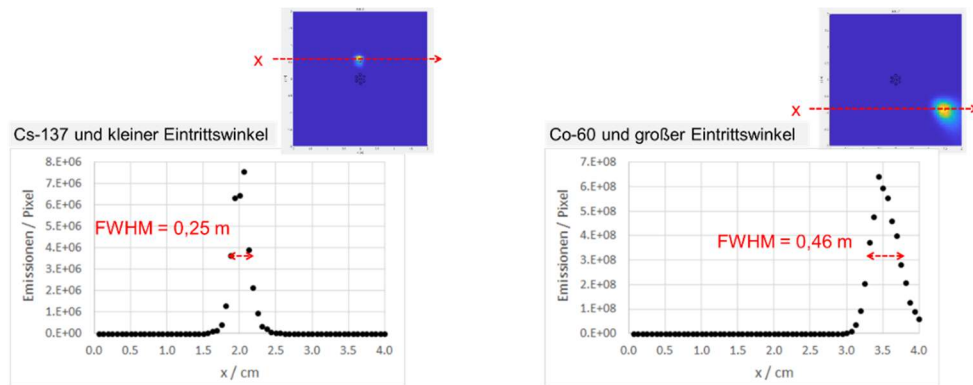


Abb. 3-26: Auswertung der Intensitätsprofile für die beiden Nuklide ^{137}Cs und ^{60}Co bei unterschiedlichen Lagepositionen

In Abhängigkeit von der Photonenenergie und dem Eintrittswinkel werden Punktquellen als Intensitätsverteilung mit FWHM von 0,2 bis 0,5 m bei der Rekonstruktion der RSL7-Daten abgebildet.

4 Anfertigung des Positioniersystems, Vorbereitung der Tests für AP4 (AP3)

Aufgrund verschiedener Schwierigkeiten bei angefragten Unternehmen hinsichtlich der Konstruktion, Ausführung und vertretbarer Lieferzeiten eines Versuchsaufbaues mit elektrisch verfahrbaren Lineareinheiten für den VS „GARAY TF“ wurde eigenständig eine Konstruktion für einen Aufbau mit manuell bedienbaren, vertikal stehenden Lineareinheiten mit dazwischenliegenden Positionierungsrahmen aus Aluprofilen erarbeitet (Abb. 4-1).

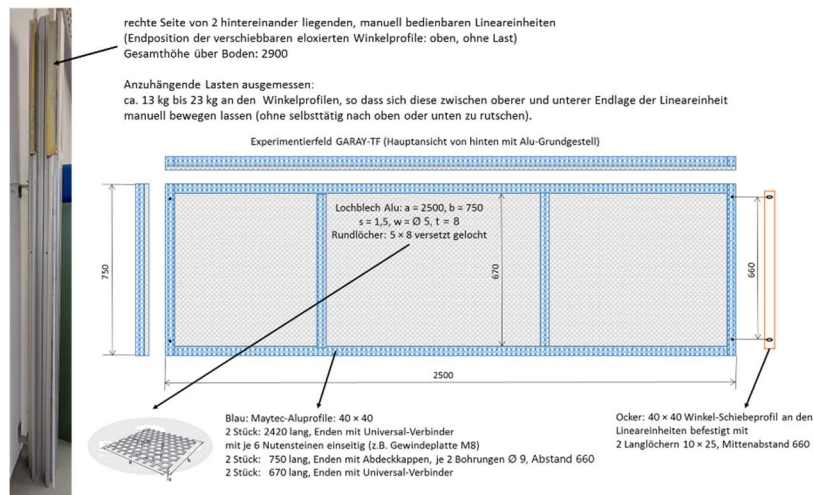


Abb. 4-1: Foto (links) und Konstruktion (rechts) der Komponenten des VS „GARAY TF“

Nach Zulieferung von Komponenten wurde der Aufbau eigenständig von der HSZG umgesetzt. Das Positioniersystem besteht aus zwei Ebenen, an denen die radioaktiven Quellen gehalten und verschoben werden können (hintere Ebene, Abb. 4-2) sowie verschiedene Abschirmmaterialien angebracht werden können (vordere Ebene, Abb. 4-2).



Abb. 4-2: VS „GARAY TF“ – Aufbau im Labor Strahlentechnik der HSZG mit Comptonkamera RSL7 im Vordergrund.

Mit dem VS „GARAY TF“ wurde im AP3 ein manuell bedienbares Positioniersystem für Punkt-, Linien-, Flächen- und Volumenquellen mit einer vorgelagerten Wand für Absorber im Strahlenlabor der HSZG installiert. Dieser VS kam für umfangreiche Messreihen im AP4 zum Einsatz.

5 Positionierung von Gammaquellen und Messsystem, Durchführung und Auswertung von Versuchsreihen (AP4)

5.1 Experimente zum Einschaltverhalten und zur Energiekalibrierung

5.1.1 Ergebnisse zum Einschaltverhalten

Für eine genaue Berechnung des Compton-Winkels aus den gemessenen Energiewerten der Koinzidenzereignisse ist eine hohe zeitliche Stabilität der Energiekalibrierung der Detektoren notwendig. Bei Experimenten zur Energiekalibrierung für den Dauerbetrieb verschiedener Detektormaterialien wurde unter Verwendung mehrerer, verschiedener Messelektroniken (Tab. 5-1) eine Verschiebung der Kanallage der detektierten Energien (Peaklage) mit zunehmender Messdauer nach dem Einschalten beobachtet.

Tab. 5-1: Übersicht zu verschiedenen Kombinationen von Detektoren und Elektroniken

Detektormaterial	Größe	Projektpartner	Elektronik
CeBr ₃	1.5"	HSZG	Canberra
CeBr ₃	2.0"	Hellma Materials	Ortek, FST
CeBr ₃	3.0"	Hellma Materials	CAEN Digitizer
LaBr ₃	3.0"	HSZG	Ortek
Nal(Tl)	3.0"	HSZG	Ortek

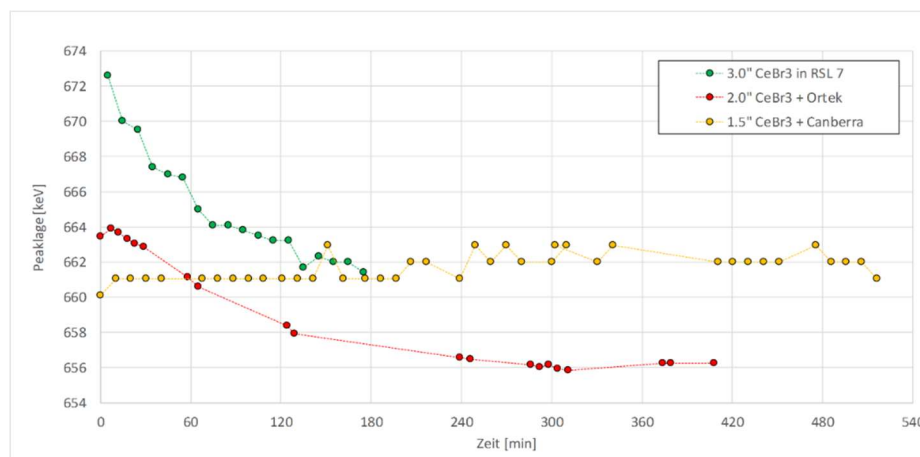


Abb. 5-1: Verschiebung der Peaklage des Photopeaks von ¹³⁷Cs (662 keV) für CeBr₃-Detektoren und verschiedener Auswertelektroniken nach dem Einschalten des Messsystems

Das Verhalten der CeBr₃-Detektoren ist exemplarisch in Abb. 5-1 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass eine Verschiebung der Peaklage zu kleineren Energien mit fortschreitender Messdauer ergab.

Daraus resultierten zusätzliche Experimente zur Energiekalibrierung nach dem Einschalten der 3" CeBr₃-Detektoren für RSL2 und RSL7. Bei einem 3" CeBr₃-Detektor verschob sich die Peaklage des Photopeaks unter Verwendung einer ¹³⁷Cs-Quelle (662 keV) nach 2 h Messdauer um ca. 6 keV, nach 4 h um ca. 8 keV und stabilisierte sich mit weiter zunehmender Messdauer. Der gleiche Effekt trat vergleichsweise bei Experimenten mit einem im Strahlenlabor der HSZG vorhandenen 3" LaBr₃-Detektor auf (Abb. 5-2, links). Betrachtet man das zeitliche Verhalten für CeBr₃-Detektoren bei verschiedenen Photopeak-Energien (662 keV bzw. 1460 keV), so zeigt sich eine bei beiden Energien etwa gleiche prozentuale Verschiebung der Peaklage (Abb. 5-2, rechts) nach dem Einschalten.

Die Drift kommt durch ein Erwärmen des jeweiligen Photomultipliers nach dem Einschalten zustande, wodurch sich der Verstärkungsfaktor und damit die Kanallage im Spektrum verändert. Dieser Effekt ist vergleichbar mit der in [BU18] beschriebenen temperaturabhängigen Änderung des Verstärkungsfaktors in der Photomultiplier-Elektronik.

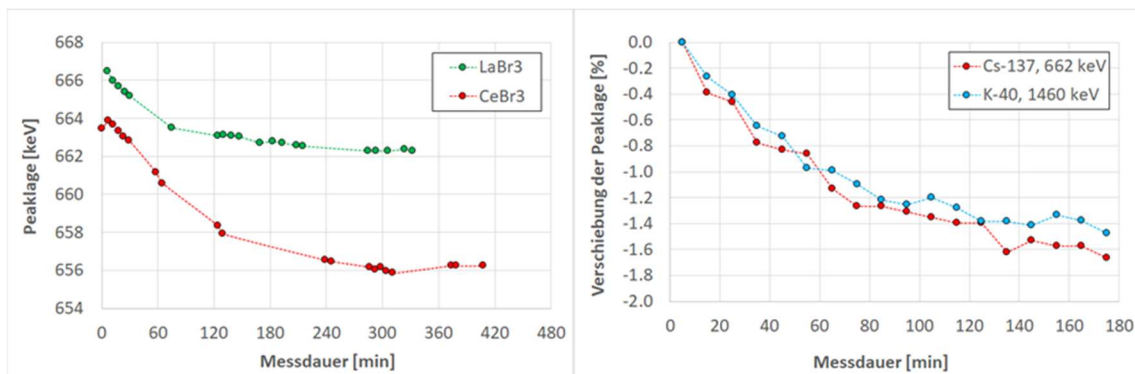


Abb. 5-2: Verschiebung der Peaklage des Photopeaks von ^{137}Cs (662 keV) für einen 3" CeBr_3 - und einen 3" LaBr_3 -Szintillationsdetektor mit CAEN-Digitizer nach dem Einschalten (links); prozentuale Verschiebung der Peaklage bei 662 keV und 1460 keV für einen 3" CeBr_3 -Detektor nach dem Einschalten (rechts) [RIE23]

Durch das Einschaltverhalten und Hochfahren des RSL7 bedingt (Temperaturabhängigkeiten der Sensoren und Auswerteeinheit), musste für die weiteren Experimente eine Wartezeit von mindestens 120 min vor dem eigentlichen Messeinsatz eingehalten werden. Sollte dieses Einschaltverhalten zukünftig im Messalgorithmus der RSL-Systeme berücksichtigt werden, kann das später zu einer Verkürzung der Einschaltzeiten führen.

5.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen zur Energiekalibrierung

Die Energiekalibrierung eines Gammaspektrometriesystems ist erforderlich, um dem im Vielkanalanalysator erfassten Impulshöhenspektrum, das proportional zur absorbierten Energieverteilung der Gammastrahlung ist, die jeweiligen Energien zuordnen zu können. Die Kalibrierung stellt den Zusammenhang zwischen dem Messkanal und der Energie her und erlaubt somit eine Radionuklididentifikation anhand der Photopeaklage (für CeBr_3) oder der Comptonkante (für PVT) eines Spektrums. Ein Messkanal entspricht dabei einem bestimmten Impulsbereich, dem Charge of Pulse (CoP), also der Ladung, welche bei dem Impuls übertragen wird.

Die Energiekalibrierung für die CeBr_3 - und PVT-Detektoren erfolgte zunächst bei Umgebungstemperatur (Raumtemperatur im Strahlenlabor der HSZG) mittels mehrerer bekannter Gammastrahler (Tab. 5 2), zu deren bekannten Photonenenergien die zugehörigen Messkanäle ermittelt wurden.

Tab. 5-2: Übersicht zu den verwendeten Kalibriernukliden und den zugehörigen Energien

Detektor	Nuklide	Energien [keV]
CeBr ₃	²⁴¹ Am	59,5 (Photopeak)
	²² Na	511,0 (Photopeak)
		1274,5 (Photopeak)
	¹³⁷ Cs	661,7 (Photopeak)
	⁶⁰ Co	1173,2 (Photopeak)
1332,5 (Photopeak)		
PVT	²⁴¹ Am	59,5 (Photopeak)
	²² Na	340,2 (Comptonkante)
		1061,7 (Comptonkante)
¹³⁷ Cs	477,3 (Comptonkante)	

Unter der Annahme, dass die zeitliche Drift nach 4 h Messdauer zu vernachlässigen ist, wurde anschließend an die Einschaltzeit die eigentliche Kalibrierfunktion für den CeBr₃-Detektor, d.h. die Zuordnung der Energie zu den gemessenen CoP-Werten durch ein quadratischen Fit der Messwerte bei einer eingestellten Temperatur am Detektor ermittelt:

$$E_{Tm}(\text{keV}) = A_{Tm} * CoP^2 + B_{Tm} * CoP + C_{Tm} \quad (5.1)$$

der Index Tm bezeichnet die Messtemperatur; A_{Tm} , B_{Tm} und C_{Tm} sind die aus der Datenanalyse ermittelten Fitparameter. Die experimentellen Kalibrieruntersuchungen und die Auswertung der Daten sowie die Ergebnisse sind in [RIE23] ausführlich dargestellt. Beispielsweise wird hier das ermittelte Impulsspektrum eines Kalibrierexperiments für den 3" CeBr₃-Detektor des RSL7 mit einer ⁶⁰Co-Quelle bei 25°C Detektortemperatur in Abb. 5-8 gezeigt und die Impulsspektren für Kalibrierexperimente mit den Nukliden ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, ²²Na für den PVT-Detektor DT04 in Abb. 5-4.

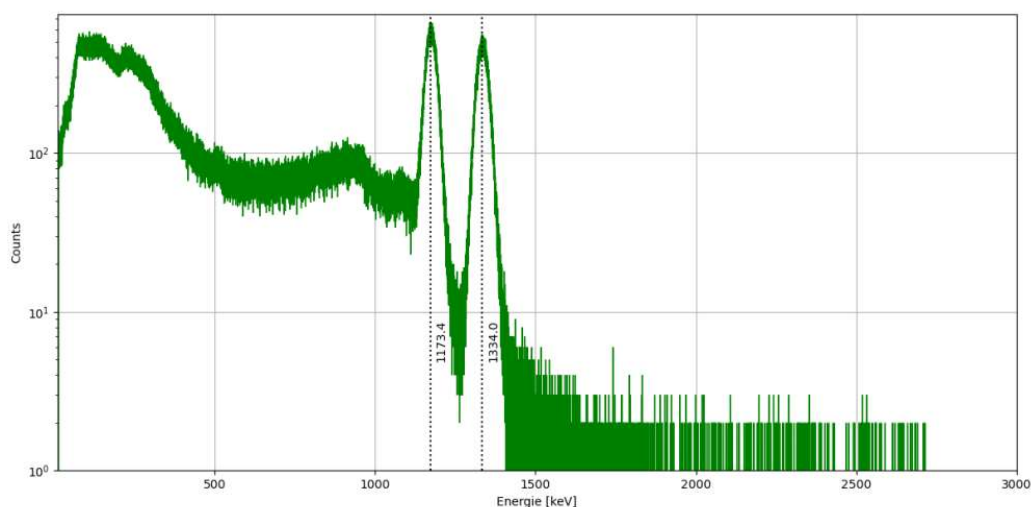


Abb. 5-3: Energiespektrum für eine ⁶⁰Co-Kalibriermessung anhand der zwei Photopeaks mit dem CeBr₃-Detektor DT00 des RSL7 bei 25 °C nach berücksichtigter Einschaltzeit [RIE23]

Für die Kalibrierung des CeBr₃-Detektors wurden die beiden Photopeaks herangezogen.

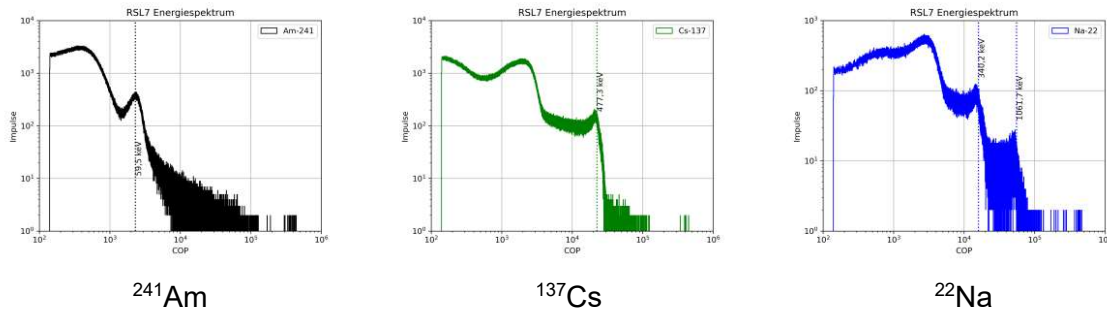


Abb. 5-4: Energiespektren für verschiedene Kalibriermessungen mit dem PVT-Detektor DT04 [RIE23]

Die charakteristischen Energielinien für die Kalibrierung des DT04-Detektors waren der Photopeak des ^{241}Am und die beiden Comptonkanten von ^{137}Cs und ^{22}Na (Abb. 5-4).

Nach Herstellerangaben der Photomultiplier in den Gammakameras (Scionix) können Temperaturschwankungen auch nach dem Einschaltverhalten Veränderungen der Peakposition in einem Spektrum verursachen [SCI25]. Wegen der zu erwartenden Einsatzbedingungen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen waren Experimente zur Temperaturstabilität der Prototypen in Form von Langzeittests im AP5 bei Hellma vorgesehen. In Absprache mit den Verbundpartnern wurden diese Untersuchungen zu temperaturabhängigen Energiekalibrierungen von Detektoren und Auswerteeinheit zusätzlich in die Experimente an der HSZG eingebunden. Die Untersuchungen wurden für alle 7 Detektoren des RSL7 durchgeführt. Für diese Experimente wurden Detektoren und Auswerteeinheit in einem Klimaschrank positioniert (Abb. 5-5).

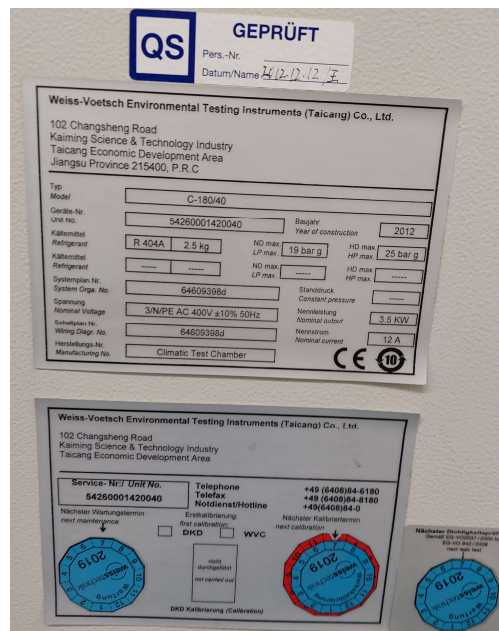


Abb. 5-5: Datenschild zum eingesetzten Klimaschrank für die Messungen zur Temperaturkalibrierung

Die Kalibriermessungen wurden im einsatzrelevanten Temperaturbereich zwischen 0 bis 30 °C (273 K bis 303 K) in 5 K-Schritten durchgeführt, wobei zunächst bei jeder Temperatur über eine Dauer von 4 Stunden die zeitliche Drift als prozentuale Änderung der Kanallage ermittelt wurde (ähnlich zu Abb. 5-2). Unter der Annahme, dass die Drift nach 4 Stunden Messdauer im weiteren Zeitverlauf zu vernachlässigen ist, wurde anschließend die eigentliche temperaturabhängige Kalibrierfunktion, d.h. die Zuordnung der Energie zu den gemessenen CoP über eine Zeitdauer von 600 s bei der eingestellten Temperatur ermittelt. Abb. 5-7 zeigt die Temperaturabhängigkeit der Photopeaklage für die verschiedenen Kalibriernuklide.

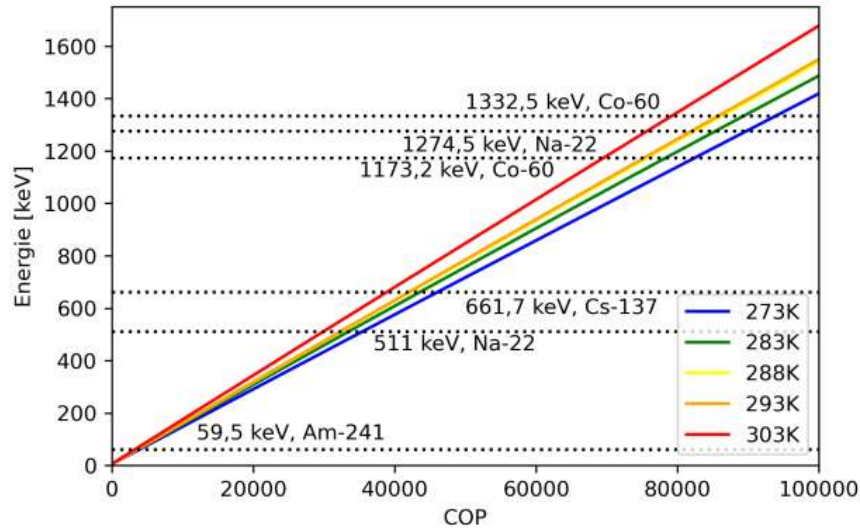


Abb. 5-6: Abhängigkeit der Lage der Peakenergien der Kalibriernuklide zu den temperaturabhängigen CoP des CeBr₃-Detektors des RSL7 [RIE23]

Die Analyse der Temperaturabhängigkeit der Fitparameter für (5.1) für den CeBr₃-Detektor des RSL7 zeigte vernachlässigbare, geringe Abhängigkeiten von A und C und eine deutlich quadratische Abhängigkeit des Parameters B von der Temperatur (Abb. 5-7, rechts). Für die temperaturabhängige Kalibrierfunktion wurden daher die Mittelwerte \bar{A} bzw. \bar{C} im betrachteten Temperaturbereich sowie die in Abb. 5-7, rechts dargestellte quadratische Funktion B(T) verwendet:

$$E(T)(\text{keV}) = \bar{A} * \text{CoP}^2 + B(T) * \text{CoP} + \bar{C} \quad (5.2)$$

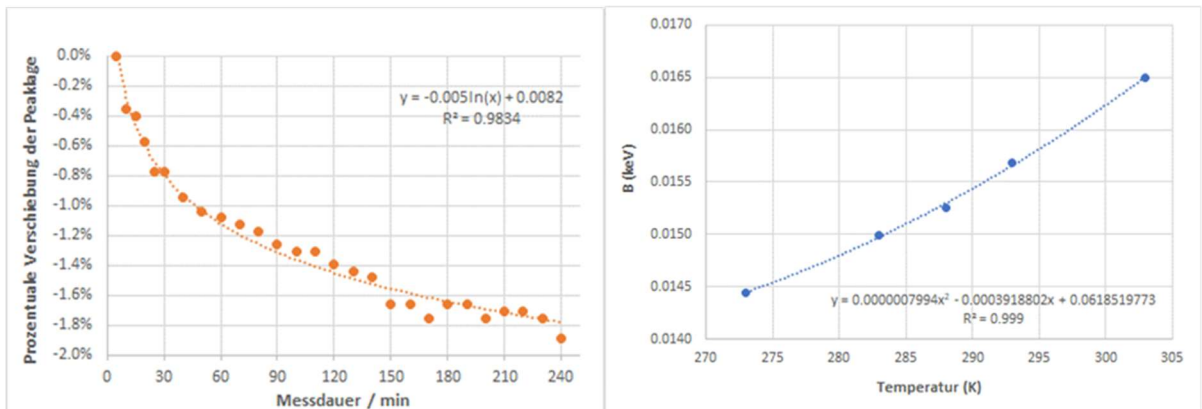


Abb. 5-7: Prozentuale Verschiebung der Peaklage (Drift) mit zunehmender Messdauer nach Einschalten (links) und ermittelte quadratische Abhängigkeit des Parameters B(T) für die verschiedenen Temperaturen der Kalibrierexperimente des CeBr₃-Detektors DT00 des RSL7 (rechts) [RIE23]

Mit Hilfe der temperaturabhängigen Kalibrierfunktion lassen sich Spektren bei beliebigen Temperaturen im Bereich von 0...30°C kalibrieren. Abb. 5-8 zeigt beispielhaft das gemessene Spektrum mit Zuordnung der charakteristischen Peaks bei den erwarteten Energien mit hoher Genauigkeit für die Messung mit einer ¹³⁷Cs-Quelle bei 30°C im Klimaschrank. Die Peaks für Ba und ⁴⁰K waren durch die örtlichen Bedingungen um den Klimaschrank bedingt.

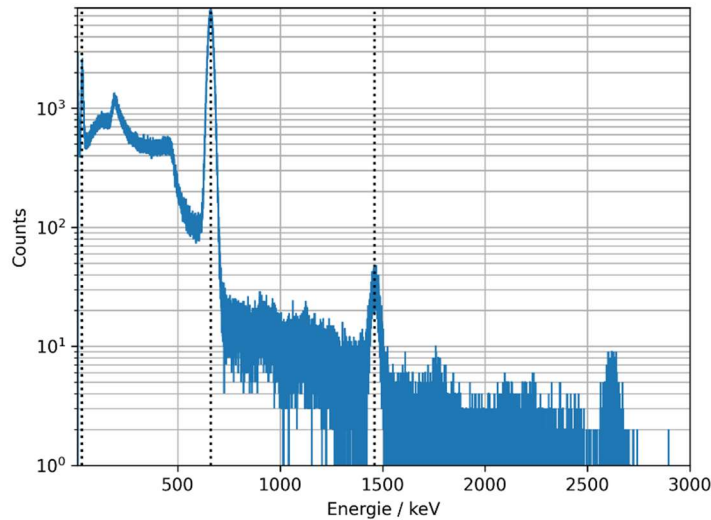


Abb. 5-8: Kalibriertes Spektrum einer Cs-137-Quelle, gemessen bei 30°C [RIE23]

Die gestrichelten Linien markieren die Peaks bei 32 keV (Ba, K- α Linie), 662 keV (Photopeak ^{137}Cs) und 1460 keV (Photopeak, ^{40}K).

Wie in [RIE23] diskutiert, war die temperaturabhängige Energiekalibrierung der PVT-Detektoren (DT01 bis DT06) aufgrund des nicht Vorhandensein von Photopeaks (beziehungsweise nur bei niedrigen Gammaenergien, wie beispielsweise mit ^{241}Am) komplizierter als die des CeBr_3 -Detektors, da für die Kalibrierung überwiegend nicht die Photopeaks, sondern die zugehörigen Compton-Kanten verwendet werden konnten (Tab. 5-2).

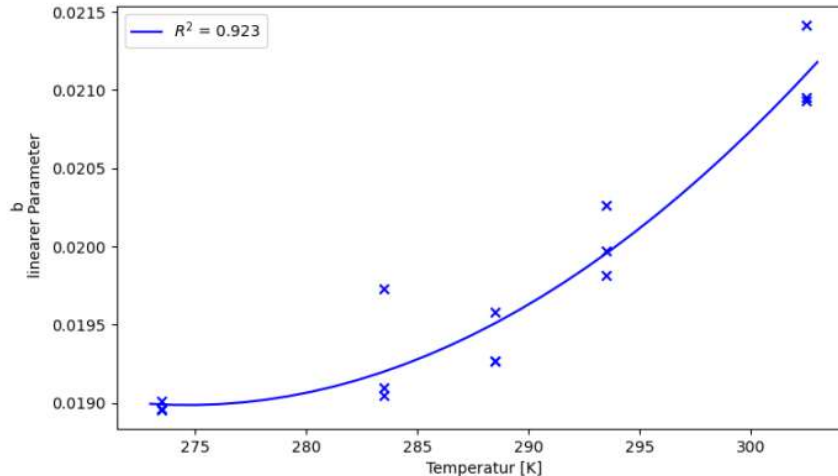


Abb. 5-9: Ermittelter quadratischer Verlauf der Fit-Funktion für den Parameter $B(T)$ in (5.2) für den PVT-Detektor DT04 [RIE23]

$$B(T) = 2,732E - 06 \cdot T^2 - 1,501E - 03 \cdot T + 2,251E - 01 \quad (5.3)$$

Beispielhaft ergaben sich für den PVT-Detektor DT04 die in Abb. 5-9 aufgeführten Messpunkte für die verschiedenen Temperaturen (3 Messungen je Temperatur) mit einer ermittelten quadratischen Fit-Funktion (5.3). Ähnliche Messungen und Auswertungen wurden für die DT01, DT02, DT03, DT05 und DT06 durchgeführt.

5.2 Vorbereitung der Experimente im AP4

Neben den vorhandenen Punktquellen im Strahlenlabor der HSZG wurden Flächen- (FQ) und Volumenquellen (VQ) beim Projektpartner VKTA gefertigt und für die Messungen im Strahlenlabor der HSZG zur Verfügung gestellt. Beispielhaft dafür sind zwei FQ für ^{152}Eu und ^{60}Co sowie eine VQ mit ^{133}Ba in Abb. 5-10 dargestellt.



Abb. 5-10: Lamierte Flächenquellen auf Flies ^{152}Eu (links), ^{60}Co (Mitte) und im Kunststoffrohr positionierte ^{133}Ba -Volumen-(Rollen-)Quelle (rechts) des Projektpartners VKTA

Zur Qualitätssicherung der vom VKTA übergebenen FQ erfolgten Vorabmessungen mit dem Oberflächendosisleistungsmessgerät RadEye B20-ER zur Bestimmung der Aktivitätsverteilung auf den vom VKTA gefertigten FQ aus laminiertem Fließ (Abmessungen: 150 mm × 250 mm).

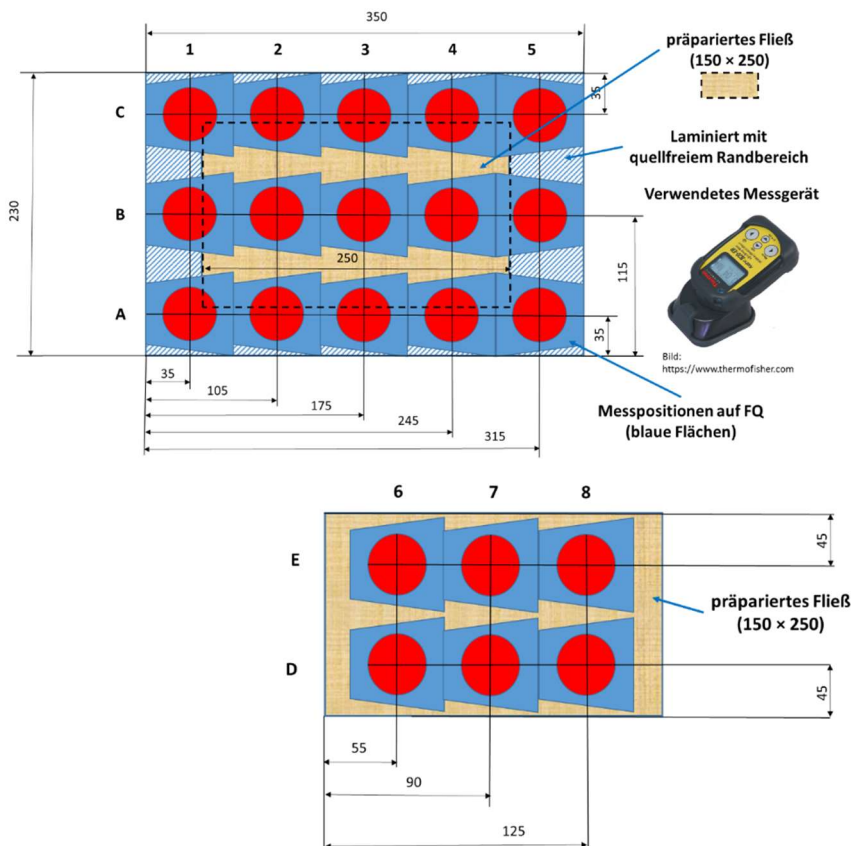


Abb. 5-11: Messpositionen mit Randmessungen (oben) und ohne Randmessungen (unten) bei Anwendung des Oberflächendosisleistungsmessgerätes RadEye B20-ER für die Bestimmung der Aktivitätsverteilung auf den vom VKTA gefertigten FQ aus laminiertem Fließ

Bei diesen Vorabmessungen wurde die Messfläche des RadEye B20-ER nach zwei verschiedenen Vorgehensweisen aufgelegt. Abb. 5-11 (oben) zeigt die 15 Messpositionen (A1 bis C5), die über die gesamte laminierte Folie (inklusive Randbereiche) gemessen wurden. Abb. 5-11 (unten) zeigt die sechs Messpositionen (D6 bis E8), die nur über dem präparierten Fließ gemessen wurden.

Die ermittelten Messergebnisse werden hier beispielhaft für drei FQ als prozentuale Aktivitätsverteilungen in Abb. 5-12 bis Abb. 5-14 gezeigt.

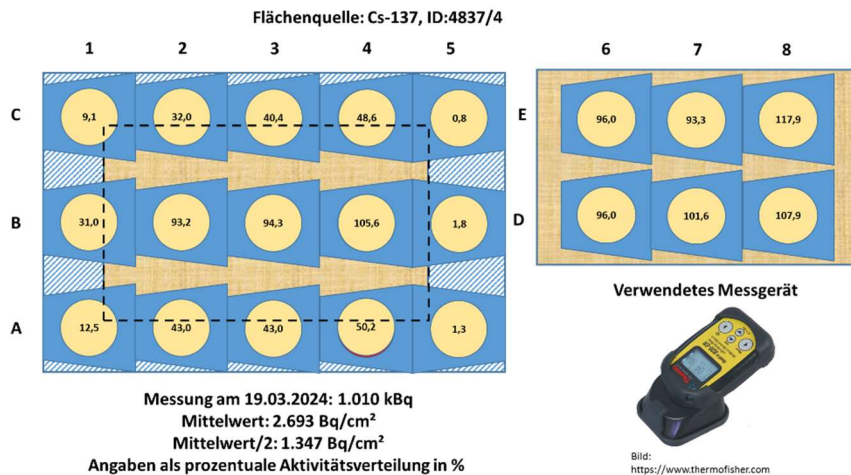


Abb. 5-12: Prozentuale Aktivitätsverteilung auf der ¹³⁷Cs-FQ mit ID 4837/4

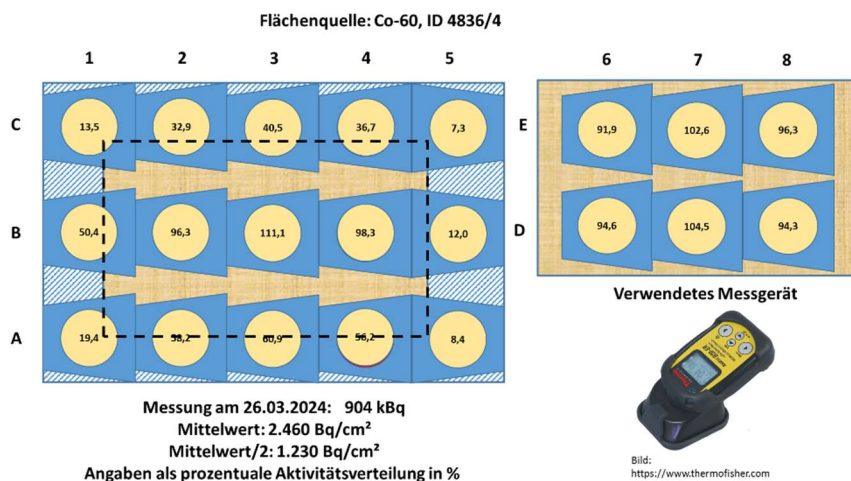


Abb. 5-13: Prozentuale Aktivitätsverteilung auf der ⁶⁰Co-FQ mit ID 4836/4

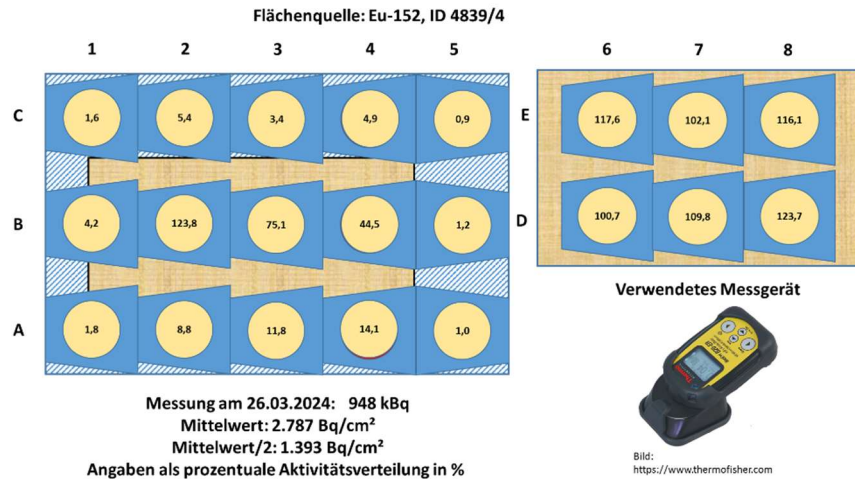


Abb. 5-14: Prozentuale Aktivitätsverteilung auf der ¹⁵²Eu-FQ mit ID 4839/4

Als Ergebnis der Messungen wurde eine relativ gleichmäßige Aktivitätsverteilung über die Fläche bei allen FQ festgestellt, zumal für jede Position nur Einmalmessungen (keine statistische Erhebung über Wiederholungsmessungen) erfolgten. In den Randbereichen der Folie (außerhalb des Fließ) wurden keine signifikanten Kontaminationen gemessen. Örtliche Abweichungen von der durchschnittlich eingebrachten Aktivität lagen in den meisten Fällen im einstelligen Prozentbereich.

5.3 Experimente mit FQ, VQ und Mehrfachquellen

5.3.1 Geometrische Bedingungen und Versuchsmatrix

Einen Überblick zu den geometrischen Bedingungen für die Experimente zu FQ, VQ und Mehrfachquellen mit RSL7 am VS „GARAY TF“ zeigt Abb. 5-15. Im Gegensatz zur Definition der Simulationskoordinaten in 0 (mit z als Abstand Quelle-Detektor) wurde für die Experimente eine y-z-Ebene an der Quellenwand mit x als Abstand definiert (Abb. 5-15).

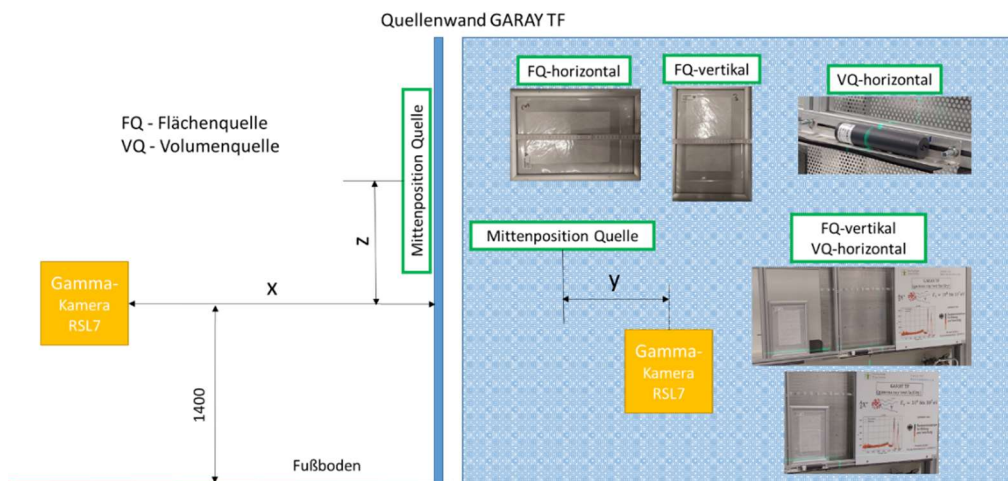


Abb. 5-15: Positionierungsmöglichkeiten der FQ, VQ und Kombinationsmöglichkeiten als Mehrfachquellen (unten rechts) am VS „GARAY TF“ (Vorderansicht-rechts, Seitenansicht-links)

Die detaillierten Anordnungen für diese Experimente sind beispielhaft in Abb. 5-16, Abb. 5-17, Abb. 5-18 und Abb. 5-19 dargestellt.

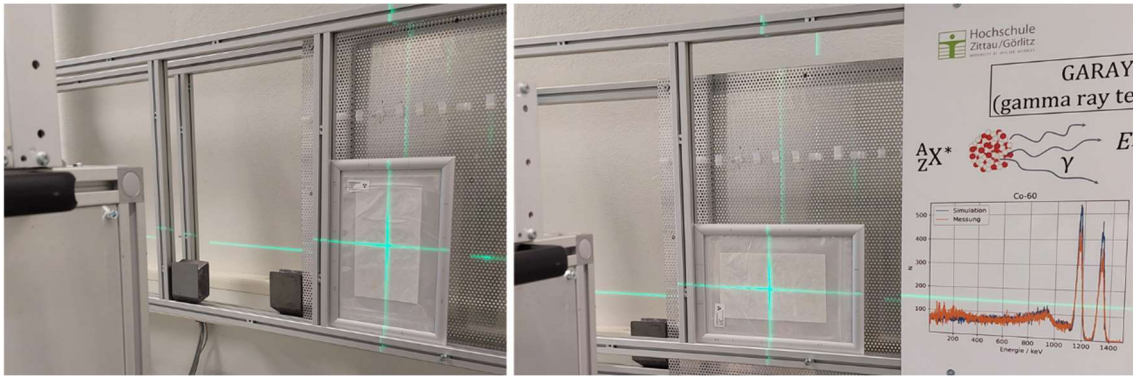


Abb. 5-16: Ausrichtung der vertikalen (links) und horizontalen (rechts) FQ-Positionen mittels Positionierlaser des RSL7 am VS „GARAY TF“



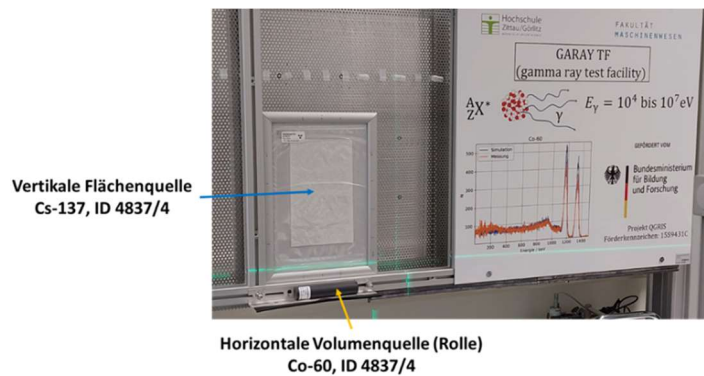
Abb. 5-17: Anordnung einer VQ-¹³³Ba am VS „GARAY TF“ vor dem RSL7



Vertikale Flächenquelle
 Cs-137, ID 4837/4

Horizontale Volumenquelle (Rolle)
 Co-60, ID 4837/4

Abb. 5-18: Positionierung von horizontal versetzten Mehrfachquellen (FQ-¹³⁷Cs und VQ-⁶⁰Co) am VS „GARAY TF“



Vertikale Flächenquelle
 Cs-137, ID 4837/4

Horizontale Volumenquelle (Rolle)
 Co-60, ID 4837/4

Abb. 5-19: Positionierung von vertikal übereinander liegenden Mehrfachquellen (FQ-¹³⁷Cs und VQ-⁶⁰Co) am VS „GARAY TF“

In Tab. 5-3 ist die Versuchsmatrix mit den experimentellen Randbedingungen für die RSL7-Messungen mit Einsatz von FQ, VQ und Mehrfachquellen am VS „GARAY TF“ aufgeführt.

Tab. 5-3: Übersicht der Experimente mit FQ, VQ und Mehrfachquellen

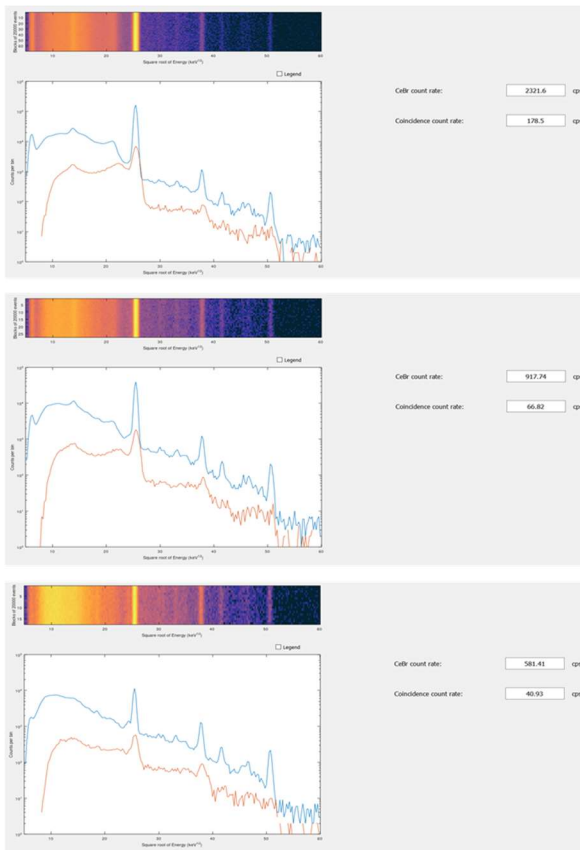
Versuchs- nummer	Datum Messung	Art der Quelle	Nuklid(e)	Quellen-Nr.	Mitten-Quellenposition			Messdauer (s)	Bemerkungen
					x [cm]	y [cm]	z [cm]		
00	11.06.2024	keine						1200	Nulleffektmessung nach 1h Anlaufbetrieb RSL7
01	11.06.2024	FQ-vertikal	Cs-137	ID 4837/4	300	0	0	600	Kalibrierung ok.
02	11.06.2024	FQ-horizontal	Cs-137	ID 4837/4	300	0	0	600	Kalibrierung ok.
03	11.06.2024	FQ-vertikal	Eu-152	ID 4839/4	300	0	0	600	Kalibrierung ok.
04	11.06.2024	FQ-horizontal	Eu-152	ID 4839/4	300	0	0	600	Kalibrierung ok.
05	11.06.2024	FQ-vertikal	Cs-137	ID 4837/4	200	0	0	600	Kalibrierung ok.
06	11.06.2024	FQ-horizontal	Cs-137	ID 4837/4	200	0	0	600	Kalibrierung ok.
07	11.06.2024	FQ-horizontal	Cs-137	ID 4837/4	100	0	0	600	Kalibrierung ok.
08	11.06.2024	FQ-vertikal	Cs-137	ID 4837/4	100	0	0	600	Kalibrierung ok.
09	11.06.2024	FQ-vertikal	Cs-137	ID 4837/4	50	0	0	600	Kalibrierung ok.
01	17.06.2024	keine						1200	Nulleffektmessung nach 1h Anlaufbetrieb RSL7
02	17.06.2024	keine						600	Testmessung
03	17.06.2024	FQ-vertikal	Co-60	ID 4836/4	100	0	0	600	Kalibrierung ok.
04	17.06.2024	FQ-horizontal	Co-60	ID 4836/4	100	0	0	600	Kalibrierung ok.
05	17.06.2024	FQ-horizontal	Eu-152	ID 4839/4	100	0	0	600	Kalibrierung ok.
06	17.06.2024	FQ-vertikal	Eu-152	ID 4839/4	100	0	0	600	Kalibrierung ok.
07	17.06.2024	FQ-vertikal	Eu-152	ID 4839/4	50	0	0	600	Kalibrierung ok.
08	17.06.2024	FQ-horizontal	Eu-152	ID 4839/4	50	18	0	600	Kalibrierung ok.
09	17.06.2024	FQ-horizontal	Co-60	ID 4836/4	50	18	0	600	Kalibrierung ok.
10	17.06.2024	FQ-vertikal	Co-60	ID 4836/4	50	0	0	600	Kalibrierung ok.
01	18.06.2024	FQ-vertikal	Ba-133	ID 4838/4	50	0	0	600	Kalibrierung ok.
02	18.06.2024	FQ-horizontal	Ba-133	ID 4838/4	50	8	0	600	Kalibrierung ok.
03	18.06.2024	FQ-horizontal	Ba-133	ID 4838/4	100	8	0	600	Kalibrierung ok.
04	18.06.2024	FQ-vertikal	Ba-133	ID 4838/4	100	0	0	600	Kalibrierung ok.
01	24.06.2024	keine						1200	Nulleffektmessung nach 1h Anlaufbetrieb RSL7
02	24.06.2024	VQ-horizontal	Cs-137	ID 4837/3	50	0	0	600	Kalibrierung ok.
03	24.06.2024	VQ-horizontal	Cs-137	ID 4837/3	50	0	50	600	Kalibrierung ok.
04	24.06.2024	VQ-horizontal	Co-60	ID 4836/3	50	0	50	600	Kalibrierung ok.
05	24.06.2024	VQ-horizontal	Co-60	ID 4836/3	50	0	0	600	Kalibrierung ok.
06	24.06.2024	VQ-horizontal	Ba-133	ID 4838/3	50	0	0	600	Kalibrierung ok.
07	24.06.2024	VQ-horizontal	Ba-133	ID 4838/3	50	0	50	600	Kalibrierung ok.
08	24.06.2024	VQ-horizontal	Eu-152	ID 4839/3	50	0	50	600	Kalibrierung ok.
09	24.06.2024	VQ-horizontal	Eu-152	ID 4839/3	50	0	0	600	Kalibrierung ok.
10	24.06.2024	VQ-horizontal	Eu-152	ID 4839/3	100	0	0	600	Kalibrierung ok.
11	24.06.2024	VQ-horizontal	Ba-133	ID 4838/3	100	0	0	600	Kalibrierung ok.
12	24.06.2024	VQ-horizontal	Co-60	ID 4836/3	100	0	0	600	Kalibrierung ok.
13	24.06.2024	VQ-horizontal	Cs-137	ID 4837/3	100	0	0	600	Kalibrierung ok.
01	29.08.2024	FQ	Cs-137	ID 4837/4	150	0	60	1200	Kalibrierung ok.
		VQ	Co-60	ID 4836/3	150	0	0	1200	Kalibrierung ok.
02	29.08.2024	FQ	Cs-137	ID 4837/4	150	20	0	1200	Kalibrierung ok.
		VQ	Co-60	ID 4836/3	150	0	0	1200	Kalibrierung ok.

5.3.2 Ergebnisse zur Ermittlung der Spektren und Einfluss von Abstandsvariationen

Bei den Messungen mit FQ, VQ und Mehrfachquellen kam in der Anwendersoftware des RSL7 der Rekonstruktionsalgorithmus GARISO-V7 (Stand Mai 2024) zum Einsatz. Die Nulleffektmessungen im Strahlenlabor zeigten den bekannten ⁴⁰Ka-Peak des natürlichen Strahlungsuntergrundes bei 1.462 keV. Damit konnte für weitere Experimente von einer guten bestehenden Energiekalibrierung ausgegangen werden.

Die Spektren der Nuklide wurden über den CeBr₃-Detektor des RSL7 jeweils sicher erkannt. Das trifft für alle gewählten Abstände x zwischen Quellenwand und RSL7 zu und ist für VQ in Abb. 5-20 beispielhaft gezeigt. Die Anzahl der detektierten Impulse im CeBr₃-Detektor nimmt dabei, wie nach Abstandsgesetz zu erwarten war, für das Gesamt- und Koinzidenzspektrum mit Erhöhung des Abstandes ab.

Abb. 5-21 zeigt Ergebnisse der Spektralmessungen mit RSL7 für die vier, mit unterschiedlichen Nukliden ausgestatteten VQ (VQ-¹³⁷Cs, VQ-⁶⁰Co, VQ-¹³³Ba und VQ-¹⁵²Eu). Auch hier konnte eine klare Nuklidzuordnung mit einem Abstand von 100 cm erfolgen.



Horizontale Volumenquelle Cs-137
 $x = 50 \text{ cm}, y = 0, z = 0$

Horizontale Volumenquelle Cs-137
 $x = 100 \text{ cm}, y = 0, z = 0$

Horizontale Volumenquelle Cs-137
 $x = 200 \text{ cm}, y = 0, z = 0$

Abb. 5-20: Abstandsabhängige Gesamt- und Koinzidenzzählraten des RSL7 für horizontale ^{137}Cs -VQ

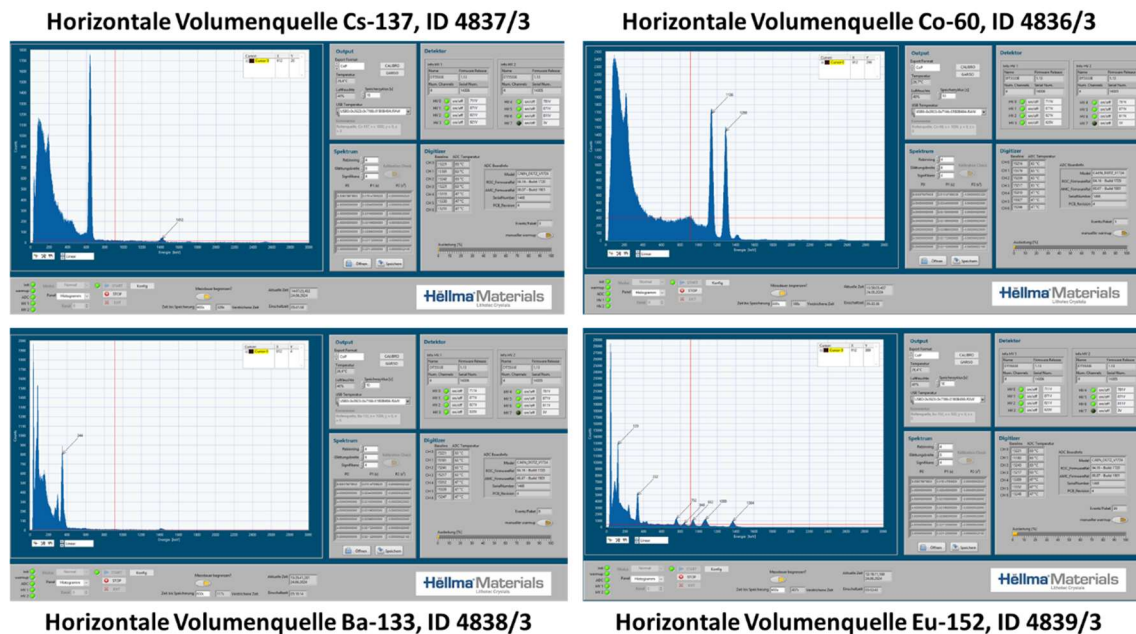


Abb. 5-21: Spektrale Ergebnisse der Messungen mit RSL7 bei horizontalen VQ (VQ- ^{137}Cs , VQ- ^{60}Co , VQ- ^{133}Ba und VQ- ^{152}Eu) am VS „GARAY TF“ und einem Abstand von 100 cm

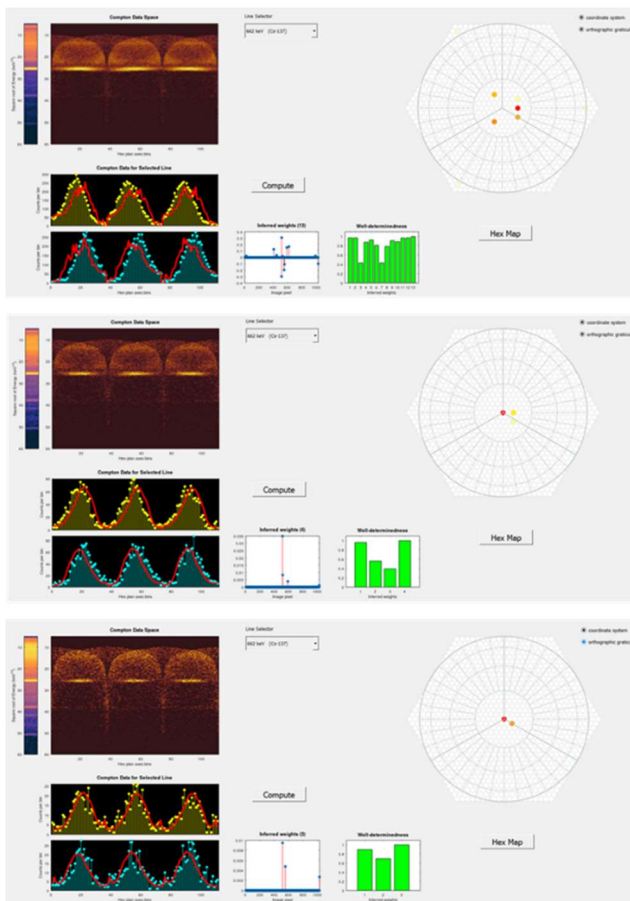
Bei der Auswertung mit GARISO-V7 war keine automatische Nukliderkennung implementiert. Für die weitere Auswertung zur Erkennung der Lageposition war das spezifische Nuklid über Auswahl-Botton (Line Selector, Abb. 5-22) in der Software auszuwählen.

5.3.3 Ergebnisse der Experimente mit FQ

Die Messungen zu einzelnen FQ erfolgten zunächst mit zentral ausgerichteter ($z = 0$ cm, $y = 0$ cm), vertikaler und horizontaler Anordnung der FQ in den Abständen von $x = 50$, 100, 200 und 300 cm (für ^{137}Cs und ^{152}Eu) zwischen Quelle und RSL7 (Abb. 5-14).

Die ersten Experimente mit $x = 200$ und 300 cm zeigten, dass die Rekonstruktion der Lageposition mit diesen gewählten Abständen in GARISO-V7 keine flächenhafte Ausdehnung der Quelle erkannte, sondern meist nur eine Punktposition in der Projektionsfläche (Hex Map) rekonstruierte.

Beispielhaft ist der Entfernungseinfluss der Messung auf die Darstellung in der orthographischen Projektion für vertikale FQ- ^{137}Cs -Anordnungen in Abb. 5-22 gezeigt. Gut zu sehen ist eine Einfachstruktur bei der ^{137}Cs -Linie im Compton-Datenraum (Compton Data Space, oben links). Die Ergebnisse des mit den Daten berechneten Regressionsmodells sind als rote Linie in den Daten-Histogrammen (unten links) und als Kamerabild in orthographischer Projektion (rechts) dargestellt. Bei den Abständen $x = 200$ und 100 cm wurde eine Kontamination erkannt, es lässt sich jedoch nur schwer eine vertikale FQ vermuten. Bei $x = 50$ cm Abstand ist eine vertikale Ausdehnung der FQ um den Nullpunkt besser zu erkennen.



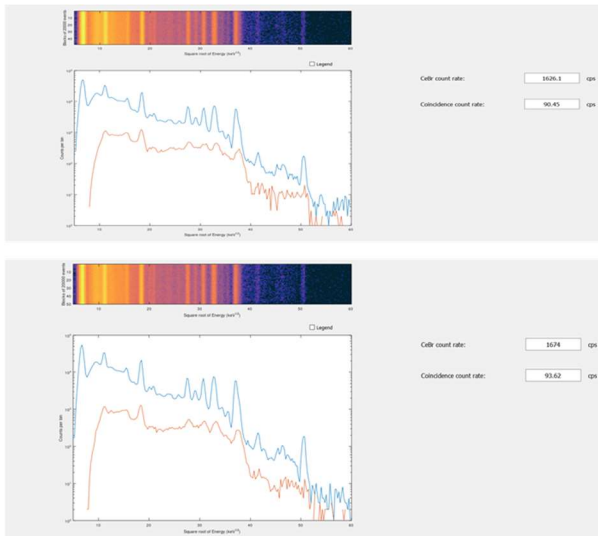
Vertikale Flächenquelle ^{137}Cs
 $x = 50$ cm, $y = 0$, $z = 0$

Vertikale Flächenquelle ^{137}Cs
 $x = 100$ cm, $y = 0$, $z = 0$

Vertikale Flächenquelle ^{137}Cs
 $x = 200$ cm, $y = 0$, $z = 0$

Abb. 5-22: Ergebnisse der Messungen mit vertikaler FQ- ^{137}Cs bei unterschiedlichen Abständen zwischen Quelle und RSL7 und Visualisierung mit GARISO-V7

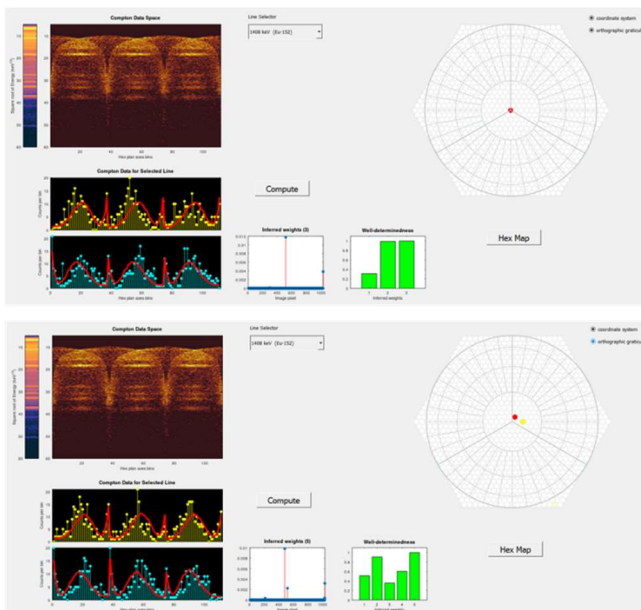
Ergebnisse der Variationsmessungen mit horizontal liegender oder vertikal stehender FQ ^{152}Eu und konstant 1 m Abstand zwischen Quellenwand und Detektor zeigten die klare Nuklididentifikation über das Gesamt- und Koinzidenzspektrum (Abb. 5-23).



Horizontale Flächenquelle ^{152}Eu
x = 100 cm, y = 0, z = 0

Vertikale Flächenquelle ^{152}Eu
x = 100 cm, y = 0, z = 0

Abb. 5-23: Gesamt- und Koinzidenzzählraten des RSL7 für vertikale und horizontale Anordnung der ^{152}Eu -FQ



Horizontale Flächenquelle ^{152}Eu
x = 100 cm, y = 0, z = 0

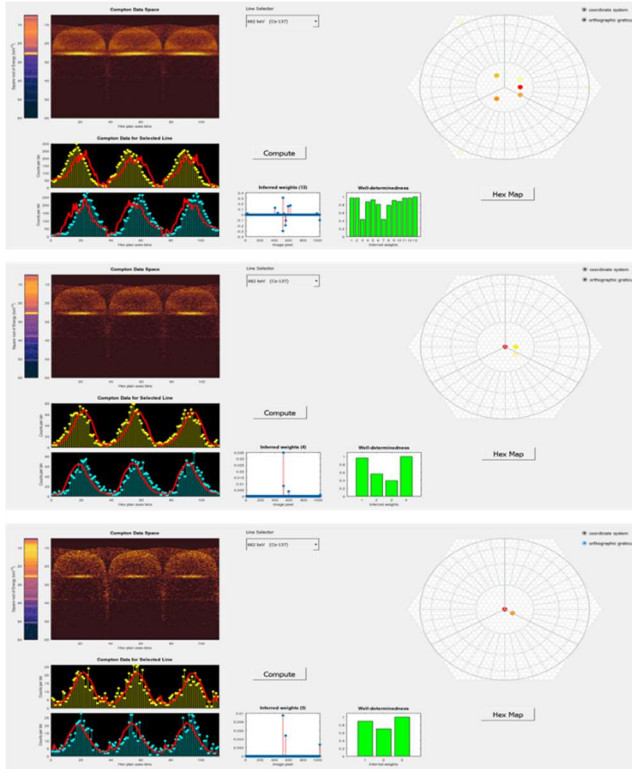
Vertikale Flächenquelle ^{152}Eu
x = 100 cm, y = 0, z = 0

Abb. 5-24: Ergebnisse der Messungen mit horizontaler und vertikaler FQ- ^{152}Eu bei einem Abstand von 100 cm zwischen Quelle und RSL7 sowie Visualisierung mit GARISO-V7

Die Darstellung im rechten Ausgabebild (Projektionsfläche) des Ausgabebildschirms von GARISO-V7 (Abb. 5-24) lässt keine signifikanten Rückschlüsse auf eine horizontale oder vertikale Anordnung der FQ an der Quellenwand zu.

5.3.4 Ergebnisse der Experimente mit VQ

Ähnliche Ergebnisse wie unter 5.3.3 treffen auch bei Variation des Abstandes für horizontale VQ zu (Abb. 5-25). Bei 50 cm Abstand kann auf eine horizontale Kontamination geschlossen werden. Die Rekonstruktion von GARISO-V7 mit 1 m oder 2 m Abstand orientiert eher zu einer Punktlage.



Horizontale Volumenquelle Cs-137
x = 50 cm, y = 0, z = 0

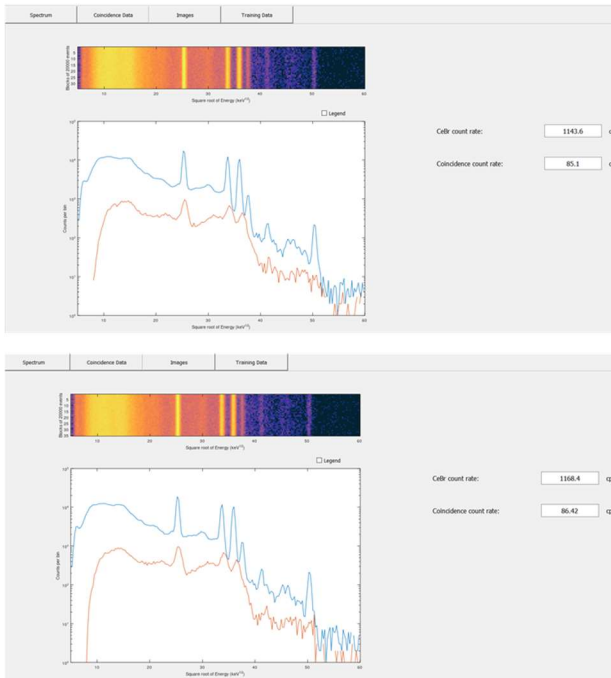
Horizontale Volumenquelle Cs-137
x = 100 cm, y = 0, z = 0

Horizontale Volumenquelle Cs-137
x = 200 cm, y = 0, z = 0

Abb. 5-25: Ergebnisse der Messungen mit horizontaler VQ-¹³⁷Cs bei unterschiedlichen Abständen zwischen Quelle und RSL7 und Visualisierung mit GARISO-V7

5.3.5 Ergebnisse der Experimente mit Mehrfachquellen

Abb. 5-26 zeigt die ermittelten Gamma- und Koinzidenzspektren bei einem Messabstand von 150 cm zwischen Quellenwand des VS „GARAY TF“ und dem RSL7 bei Verwendung von Mehrfachquellen (vertikale FQ ¹³⁷Cs, horizontal liegende VQ ⁶⁰Co). Gut zu erkennen sind jeweils ¹³⁷Cs-Peak, die beiden ⁶⁰Co-Peaks und der im Strahlenlabor mit entstehende ⁴⁰K-Peak (jeweils unten links) und in den darüber befindlichen Liniendarstellungen. Für beide Lagepositionen der FQ und VQ (Abb. 5-18, Abb. 5-19) sind die Spektren und Koinzidenzspektren für eine Messdauer von 600 s nahezu identisch.



Vertikale Flächenquelle Cs-137
 $x = 150 \text{ cm}, y = -60 \text{ cm}, z = 25 \text{ cm}$
Horizontale Volumenquelle Co-60
 $x = 150 \text{ cm}, y = 0, z = 0$

Vertikale Flächenquelle Cs-137
 $x = 150 \text{ cm}, y = 0, z = 25 \text{ cm}$
Horizontale Volumenquelle Co-60
 $x = 150 \text{ cm}, y = 0, z = 0$

Abb. 5-26: Ergebnisse der Messungen mit Mehrfachquellen (vertikale FQ-¹³⁷Cs, horizontale VQ-⁶⁰Co) bei einem Abstand von 150 cm zwischen Quellen und RSL7, Variation der Anordnungen (Abb. 5-18-oben, Abb. 5-19-unten) sowie Visualisierung mit GARISO-V7

Abb. 5-27 und Abb. 5-28 zeigen das Rekonstruktionsergebnis bei Nutzung der GARISO-V7-Software. Links dargestellt ist jeweils das Ergebnis bei Einstellung auf ¹³⁷Cs und rechts das Ergebnis für ⁶⁰Co Energieauswahl.

Vertikale Flächenquelle Cs-137: $x = 150 \text{ cm}, y = -60 \text{ cm}, z = 25 \text{ cm}$
Horizontale Volumenquelle Co-60: $x = 150 \text{ cm}, y = 0, z = 0$

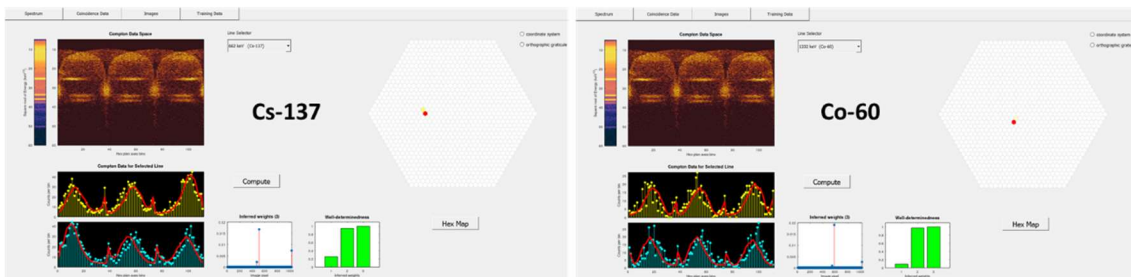


Abb. 5-27: Darstellung der Messergebnisse mit Mehrfachquellen (vertikale FQ-¹³⁷Cs, horizontale VQ-⁶⁰Co) bei einem Abstand von 150 cm zwischen Quellen und RSL7, Anordnung nach Abb. 5-18 sowie Visualisierung mit GARISO-V7

Bei diesem Messabstand von 150 cm zwischen Quelle und RSL7 ergibt die Rekonstruktion eher Punktquellen von FQ und VQ. Ein leichter horizontaler Versatz der Rekonstruktionsergebnisse zwischen ¹³⁷Cs und ⁶⁰Co ist in Abb. 5-27 erkennbar. Dies entspricht der gewählten Messanordnung mit $y = -60 \text{ cm}$ zwischen FQ und VQ, was der linken Quellenanordnung in Abb. 5-18 entspricht.

Bei vertikal übereinander angeordneten Quellen (FQ 25 cm über VQ) lässt sich bei dieser Entfernung von 150 cm ein marginaler Unterschied der allerdings punktförmig wiedergegebenen Höhenlage der angenommenen Kontaminationsbedingungen (kontaminierte Rohrleitung unter kontaminierter Wandfläche) erkennen (Abb. 5-28).

Vertikale Flächenquelle Cs-137: $x = 150 \text{ cm}$, $y = 0$, $z = 25 \text{ cm}$
Horizontale Volumenquelle Co-60: $x = 150 \text{ cm}$, $y = 0$, $z = 0$

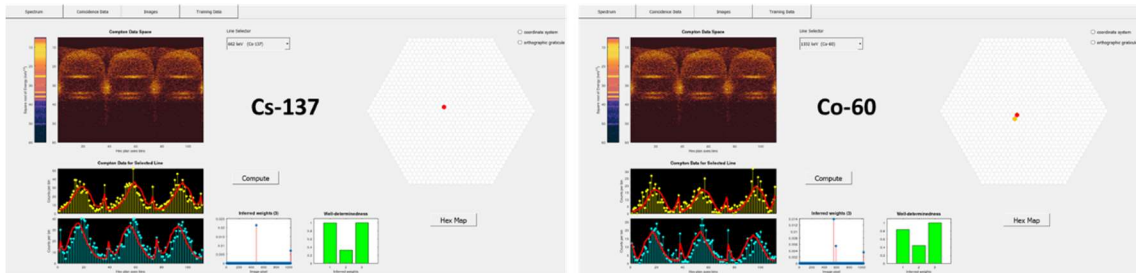


Abb. 5-28: Darstellung der Messergebnisse mit Mehrfachquellen (vertikale $FQ-^{137}\text{Cs}$, horizontale $VQ-^{60}\text{Co}$) bei einem Abstand von 150 cm zwischen Quellen und RSL7, Anordnung nach Abb. 5-19 sowie Visualisierung mit GARISO-V7

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei Mehrfachquellenmessungen mit ^{137}Cs und ^{60}Co beide Nuklide anhand des gemessenen Spektrums identifiziert werden. Die räumliche unterschiedliche Positionierung im Raum wird zwar erkannt, aber bei einem Abstand von 150 cm zum RSL7 mit GARISO-V7 nur als Punkt wiedergegeben.

5.4 Vorbereitungen zu den Validierungsarbeiten im AP5

Als Vorbereitung für die praktischen Validierungsmessungen im KKR wurde im Strahlenlabor der HSZG im Kontrollbereich (Raum c4.3, Abb. A-1) eine ^{137}Cs -Quelle in einer Ecke hinter einem Radon-Messschrank platziert. Der RSL7 wurde mit einer leicht versetzten Position in 2 m Entfernung installiert.

Nach der abzuwartenden Einschaltprozedur wurde die Messung mit 30 min Messdauer durchgeführt. Das ermittelte CeBr_3 -Gesamt- und das Koinzidenzspektrum ist in Abb. 5-29, links dargestellt.

Quellensuche im Strahlenlabor

Messsituation

- Punktquelle Cs-137, 603 kBq, 30 min Messdauer
- Compton-Kamera in 2 m Abstand zur Quelle

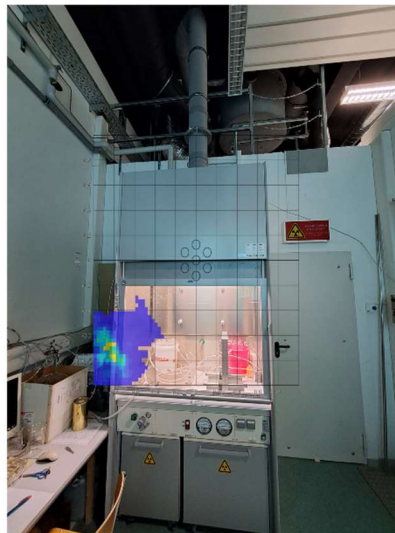
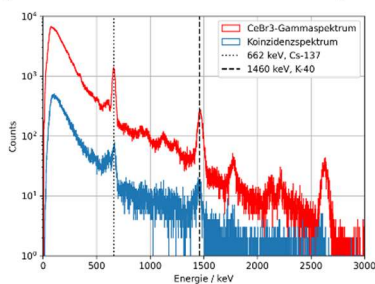


Abb. 5-29: Darstellung der Messergebnisse mit ^{137}Cs Punktquelle bei einem Abstand von ca. 200 cm zwischen Quelle und RSL7 mit Überlagerung von Foto- und Auswertebild der Rekonstruktion

Das Auswertefenster für die Rekonstruktion wurde mit einer $1 \times 1 \text{ m} = 1 \text{ m}^2$ -Bildfläche festgelegt und mit einem Digitalfoto überlagert (Abb. 5-29, rechts). Die Quelle wurde mit einer Abweichung von ca. 8° detektiert.

6 Beteiligung an der Durchführung und Auswertung der Validierungsmessungen mit dem VKTA (AP5)

Im Rahmen der Bearbeitung des AP5 erfolgten im KKW Rheinsberg (KKR) des EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH (EWN) Validierungsmessungen mit dem RSL7.

Statt der Investition in die aufwendigere und kostenintensivere 3D-Laserscantechnik, die bei Bearbeitung des AP1 zurückgestellt wurde, ist in Absprache mit dem Projektträger entschieden worden, in Vorbereitung dieser Aktivität ein Apple iPad Pro 11" 2022 Wi-Fi 512 GB von der HSZG im Rahmen des Projektes zu erwerben, das ein integriertes LiDAR-System enthält und für die Raumvermessungen im KKR vorgesehen war. Die LiDAR-Ergebnisse sollten mit den Bildern der Gammakamera RSL7 zur besseren Visualisierung der Messergebnisse überlagert werden.

Light Detection and Ranging (LiDAR) ist ein System zur Generierung von hochauflösenden geometrischen 3D-Informationen in Echtzeit. 3D-LiDAR-Sensoren liefern essentielle Informationen zur Objekterkennung, indem durch hunderttausende Abstandmessungen pro Sekunde mittels unsichtbarem und augensicherem Laserstrahl ein exaktes 3D-Bild der Raumumgebung erzeugt wird. Das optische LiDAR-Verfahren ermöglicht damit eine höhere Orts- und Tiefenauflösung im Vergleich zu Radar-Sensoren, ist schneller und weniger rechenintensiv als Kamertechnik und ergänzt damit die Vermessung von Räumen und Gebäuden.

Tests zur Vorbereitung des Einsatzes des LiDAR-Systems im KKR erfolgten im Strahlenlabor der HSZG.

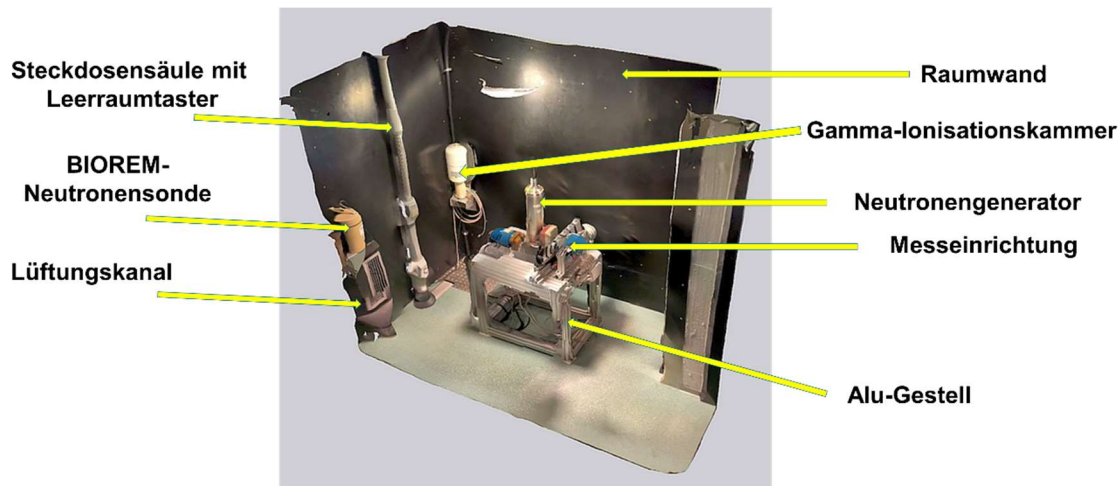


Abb. 6-1: Screenshot eines 3D-LiDAR-Raumvideos im Bereich c4.4 (Abb. A-1)

Abb. 6-1 zeigt ein Screenshot eines 3D-LiDAR-Raumvideos im Bereich c4.4 des Strahlenlabors der HSZG (Abb. A-1) mit Neutronengenerator und anderen Komponenten, welches mit dem LiDAR-System aufgenommen und mit der Software von 3dScannerApp.com visualisiert wurde. Gut zu erkennen sind die begrenzenden Wand- und Bodenstrukturen des Raumbereichs sowie die im 3D-Video-Modus erkannten Komponenten und Messgeräte, die innerhalb des Raumes positionsgetreu und maßstabsgerecht rekonstruiert wurden. Diese Testaufnahmen zeigten die prinzipielle Eignung des LiDAR-Systems für diese Aufgaben auch in Verbindung mit der Anwendung des RSL7.

Aus EWN-internen und genehmigungsrechtlichen Gründen konnte der Einsatz von betriebsfremden Geräten zu fremden Bildaufnahmen im Kontrollbereich des KKR nicht erlaubt werden. Das führte dazu, dass das LiDAR-System nicht in den Kontrollbereich eingeschleust werden konnte.

Die HSZG engagierte sich im Rahmen der Validierungsmessungen des AP5 mit logistischer Unterstützung während der Messkampagne. Der RSL7 wurde beim Projektpartner VKTA im Vorfeld des Messeinsatzes mit einem Kontaminationsschutz in Form einer Folieneinhausung versehen. Die HSZG beteiligte sich bei:

- Ein- und Ausschleusen aus dem Kontrollbereich im KKR
- Transport und Aufstellung in den Räumen innerhalb des Kontrollbereiches
- Unterstützung bei den durchgeführten Messungen des VKTA.

Insgesamt wurden mehr als 30 Messungen an unterschiedlichen Aufstellpositionen im Kontrollbereich des KKR in Rheinsberg mit dem RSL7 durchgeführt. Abb. 6-2 zeigt beispielhaft eine Validierungsmessung mit dem RSL7 im Kontrollbereich des KKR.



Abb. 6-2: Beispiel für eine Validierungsmessung mit dem eingehausten RSL7 im Kontrollbereich des KKR

Zusätzlich zu den RSL7-Messungen wurde die Dosisleistung an erkundeten Stellen mit einer Dosisleistungs-Teleskopsonde des Strahlenschutzes des KKR gemessen. Die nachgelagerte Auswertung der Messdaten erfolgte bei den Projektpartnern VKTA und Hellma.

7 Zusammenfassung, Wissenschaftliche Bewertung und Dokumentation der Messungen und Simulationen, einschließlich Positioniersystem, Abschlussbericht (AP6)

Die HSZG entwickelte in enger Abstimmung mit dem Verbundkoordinator Hellma und den anderen Projektpartnern zwei Positioniersysteme für Gammaquellen und Schwächungswände und führte an diesen Versuchsständen (VS) umfangreiche experimentelle Untersuchungen durch.

Der VS „CASTOR“ diente im QGRIS-Projekt hauptsächlich für Eignungstests der von Hellma bereitgestellten Prototypen RSL2 und RSL7 mit Einsatz einzelner Punktquellen bzw. quasi-Linienquellenanordnungen mit mehreren Punktquellen, von seitlichen Störstrahlern und zwischengelagerter Absorptionsmaterialien im AP1. Neben der Variation von Abstand und Winkel zwischen Quellen und Gammakamera wurden auch zwei verschiedene Lagepositionen des RSL2 (vertikal, horizontal) getestet. Als Hauptquellen wurden dabei ^{137}Cs -Strahler verwendet. Auf Basis der Messergebnisse der Experimente und der Simulationsergebnisse mit FLUKA zum RSL2 wurde im Verbund mit den Projektpartnern vereinbart, den Prototyp RSL2 nicht weiter zu untersuchen, sondern sich auf die Verwendung des RSL7 zu konzentrieren.

Im Rahmen der Tests und Messungen mit RSL7 im AP1 und AP4 zeigte sich, dass zusätzliche Untersuchungen zum Einschaltverhalten von Detektoren sowie Ansteuerungs- und Auswerteeinheit erforderlich waren. Durch das Einschaltverhalten des RSL7 bedingt, musste für die weiteren Experimente eine Wartezeit von mindestens 120 min vor dem eigentlichen Messeinsatz eingehalten werden. Sollte dieses Einschaltverhalten zukünftig im Messalgorithmus der RSL-Systeme berücksichtigt werden, kann das später zu einer Verkürzung der Einschaltzeiten führen.

Weiterhin wurden zusätzlich zum Projektantrag an der HSZG (statt wie ursprünglich bei Hellma vorgesehen) umfangreiche Messungen zur Temperaturkalibrierung aller 7 Einzeldetektoren des RSL7 in einem regelbaren Ofen für die zu berücksichtigenden Temperaturbedingungen von 0°C bis 30°C im späteren Praxiseinsatz durchgeführt. Es wurde eine Prozedur zur Energiekalibrierung entwickelt, welche die zeitliche Drift nach Einschalten des RSL7 sowie die Detektortemperatur während der Messung berücksichtigt.

Mit dem VS „GARAY TF“ wurde im AP3 ein manuell bedienbares Positioniersystem für Punkt-, Linien- und Flächenquellen mit einer vorgelagerten Wand für Absorber im Strahlenlabor der HSZG installiert. Dieser VS kam für umfangreiche Messreihen im AP4 zum Einsatz.

Am VS „GARAY TF“ wurden im AP4 RSL7-Messungen für Punkt-, Flächen- und Volumenquellen mit den Nukliden ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs und ^{152}Eu durchgeführt, ausgewertet und in diesem Abschlussbericht dokumentiert. Dabei wurden auch Kombinationen von jeweils zwei verschiedenen Nukliden und geometrischen Formen an der Messwand angebracht. Die Abstände zwischen Messwand und RSL7 betragen 50, 100 und 200 cm.

Die FQ und VQ wurden beim Projektpartner VKTA gefertigt und für die Messungen im Strahlenlabor der HSZG zur Verfügung gestellt. Es erfolgten Vorabmessungen für die Qualitätssicherung mit dem Oberflächendosisleistungsmessgerät RadEye B20-ER zur Bestimmung der Aktivitätsverteilung auf den vom VKTA gefertigten Flächenquellen aus laminiertem Flies (Abmessungen: 150×250 mm). Als Ergebnis wurde eine gleichmäßige Aktivitätsverteilung über die Fläche bei allen Flächenquellen festgestellt. Örtliche Abweichungen von der durchschnittlich eingebrachten Aktivität lagen im einstelligen Prozentbereich.

Die Auswertung mit GARISO zeigte eine gute spektrale Analyse zu dem jeweiligen Nuklid. Bei den Messungen mit Flächen- und Volumenquellen konnte bei 50 cm Abstand

eine örtliche Verteilung der Aktivität ermittelt werden. Bei Abständen von 100 und 200 cm neigt die Rekonstruktions-Auswertung von GARISO-V7 die Aktivitätsverteilung punktförmigen Orten im 2D-Koordinatensystem zuzuordnen.

An der HSZG wurden im AP2 mit dem am CERN entwickelten Simulationsprogramm FLUKA umfangreiche Simulationsrechnungen für den RSL2 durchgeführt und ausgewertet. Die Detektorereignisse als auch die koinzidenten Detektorereignisse wurden für die Nuklide ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs und ^{235}U bei einem Referenzabstand von 2 m zwischen Punktquelle und Detektor mit Berücksichtigung von Raumwinkeln von 0° , 14° , $20,6^\circ$, $26,6^\circ$ und $36,9^\circ$ bestimmt.

Neben Simulationen zu den vorhandenen Prototypen RSL2 und RSL7 wurden auch Simulationen für den bei Hellma geplanten RSL4 realisiert.

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden FLUKA-Simulationen für acht DG gerechnet. Es wurden jeweils drei Nuklide (^{60}Co , ^{137}Cs und ^{241}Am) als Punktquellen gewählt, die an sieben verschiedenen Positionen mit einem Abstand von 1 m zur jeweiligen DG angeordnet waren. Pro DG wurden somit 21 Simulationsrechnungen (3 Nuklide an 7 Positionen) mit FLUKA vorbereitet, ausgeführt und ausgewertet. Damit wurden 168 Ergebnisdatensätze erstellt. Zusätzlich wurde eine DG-9 entworfen, mit der an den sieben verschiedenen Positionen die Nuklide ^{60}Co und ^{137}Cs nachgebildet und simuliert wurden.

Die Ergebnisse der FLUKA-Simulationen wurden bei den regelmäßigen Projekttreffen den Projektpartnern in Form von Präsentationen vorgestellt und mit ihnen diskutiert, sind in [KAD22i], [KAD23] sowie in diesem Abschlussbericht dokumentiert.

Im Rahmen der Bearbeitung des AP5 erfolgten im KKW Rheinsberg (KKR) des EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH (EWN) Validierungsmessungen mit dem RSL7 durch die Projektpartner Hellma, VKTA und HSZG. Die HSZG unterstützte die Projektpartner durch die Mitwirkung bei Transport des RSL7 durch die engen Raumbereiche, Installationen des RSL7 im Kontrollbereich sowie durch Unterstützungen bei der Durchführung der Validierungsmessungen und beim Ein- und Ausschleusen des Gerätes.

Für die Bestimmung der Ortsposition der Compton-Gammakamera wurden Alternativen zu den kostenintensiven 3D-Laserscanner-Systemen geprüft, die im Projektantrag benannt waren. Durch den Projektpartner Hellma wurde die Integration von CMOS-Kameras mit Fisheye-Objektiven in die Messsoftware der Compton-Kamera vorangetrieben, um damit eine bildliche Zuordnung der Quelle im Raum herzustellen. Im Vorfeld der Validierungsmessungen wurden an der HSZG Tests zum geplanten Einsatz eines 3D-LiDAR-Systems im KKR im Strahlenlabor realisiert. Diese Tests zeigten die prinzipielle Verwendungsmöglichkeit dieses Systems auch in engen Räumen. Aus EWN-internen und genehmigungsrechtlichen Gründen konnte der Einsatz von betriebsfremden Geräten zu fremden Bildaufnahmen im Kontrollbereich des KKR nicht erlaubt werden. Das führte dazu, dass das LiDAR-System nicht mit in den Kontrollbereich eingeschleust und verwendet werden konnte.

8 Literaturverzeichnis

- [BMBF17] Bundesministerin für Bildung und Forschung, Förderrichtlinie zum Förderkonzept FORKA – Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen, Bundesanzeiger vom 31.08.2017
- [BU18] Bu, M., Murray, AS., Kook, M., Helsted, LM., Buylaert, J-P., Thomsen, KJ., Characterisation of scintillator-based gamma spectrometers for determination of sample dose rate in OSL dating applications, Radiation Measurements 120: 253–259, DOI 10.1016/j.radmeas.2018.07.003.
- [FER15] G. Battistoni, T. Boehlen, F. Cerutti, P.W. Chin, L.S. Esposito, A. Fassò, A. Ferrari, A. Lechner, A. Empl, A. Mairani, A. Mereghetti, P. Garcia Ortega, J. Ranft, S. Roesler, P.R. Sala, V. Vlachoudis, G. Smirnov,
"Overview of the FLUKA code",
Annals of Nuclear Energy 82, 10-18 (2015).
- [FLR24] A. Donadon, G. Hugo, C. Theis, V. Vlachoudis,
"FLAIR3 – recasting simulation experiences with the Advanced Interface for FLUKA and other Monte Carlo codes",
EPJ Web Conf. Volume 302, 2024 (SNA + MC 2024).
- [FLU24] <http://www.fluka.org/fluka.php?id=manuals&mm2=3>, Stand 30. November 2024
- [REI20] Reinicke, S., et al., Grundlegende F&E-Arbeiten zu Methoden der Zustandsüberwachung von Transport- und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente und wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle bei verlängerter Zwischenlagerung, Abschlussbericht, BMWi, 1501518A, 1501518B, Zittau, 2020
- [SCI25] <https://scionix.nl/scintillation-detectors/#tab-id-3>, Datum: 05.05.2025

9 Eigene Publikationen und Beteiligungen als Co-Autoren sowie interne Dokumentationen [...] im Rahmen des Projektes QGRIS

2021

- [ALT21i] Alt, S., Schönmuth, T., Ergänzungen zum Bericht [JAN21i], Technischer Bericht, Zittau, Oktober 2021
- [JAN21i] Jansen, S., Lösch, H., Mögliche Nuklide und Messgeometrien für die Spezifizierung der Parameter der Compton-Kamera, VKTA, Dresden-Rossendorf, September 2021

2022

- [KAD22i] Kaden, T., Detektorgruppen QGRIS, Vergleich Detektorgruppen 6 und 8, HSZG, Zittau, April 2022
- [PET22i] Petrak, S., Definition der Detektorgruppen, Hellma Materials GmbH, Jena, April 2022
- [PET22] Petrak, S., et al., Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie (QGRIS), FORKA Statusseminar, Berlin, 25. Mai 2022

2023

- [BUR23] Burger, M., Jansen, S., Hölzer, K., Kaden, T., Kuger, L., Lösch, H., Petrak, S., Rieger, T., Schönmuth, T., Multiple scatter correction for single plane Compton camera imaging in nuclear decommissioning, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 2023, e202300281, <https://doi.org/10.1002/pamm.202300281>
- [JAN23] Jansen, S., Lösch, H., Kaden, T., Schönmuth, T., Petrak, S., Burger, M., Kuger, L., Radiologische Charakterisierung von kontaminierten Objekten mit mehreren Prototypen einer Single Plane Compton Kamera, KONTEC 2023 – 16. Internationales Symposium „Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle, Poster, Dresden, 30. August bis 01. September 2023
- [KAD23] Kaden, T., Rieger, T., Alt, S., Schönmuth, T., Lösch, H., Großmann, K., Jansen, S., Burger, M., Kuger, L., Petrak, S., Hölzer, K., Kombinierte In-situ-Gammaspektrometrie und Gammakamera für den kerntechnischen Rückbau, Vortrag 10. Radiochemischer Workshop, Dresden-Rossendorf, 12. bis 14. Juni 2023
- [RIE23] Rieger, T., Untersuchung ausgewählter Messanordnungen mit einer Einebenen-Compton-Kamera, Masterarbeit, Hochschule Zittau/Görlitz, Oktober 2023

2024

- [PET24] Petrak, S., et al., Statusvorstellung QGRIS – Gammaspektroskopie und Imaging, FORKA Statusseminar, Berlin, 10. bis 11. April 2024

A Anhang: Versuchseinrichtungen der HSZG und Prototypen von HELMA

A.1 Überblick zum Strahlenlabor

Das Strahlenlabor der HSZG enthält im Bürobereich c4.1 den Zugang zum Überwachungsbereich c4.2, in dem die Quellen in Quellschränken aufbewahrt werden und in den die VS „CASTOR“ bzw. „GARAY TF“ integriert wurden. In Abb. A-1 sind durch rote Linien Bereiche verdeutlicht, in denen die Gamma-Kamera positioniert werden kann. Die maximalen horizontalen Verschiebewege betragen in x-Richtung ca. 8,5 m und in y-Richtung ca. 4,5 m.

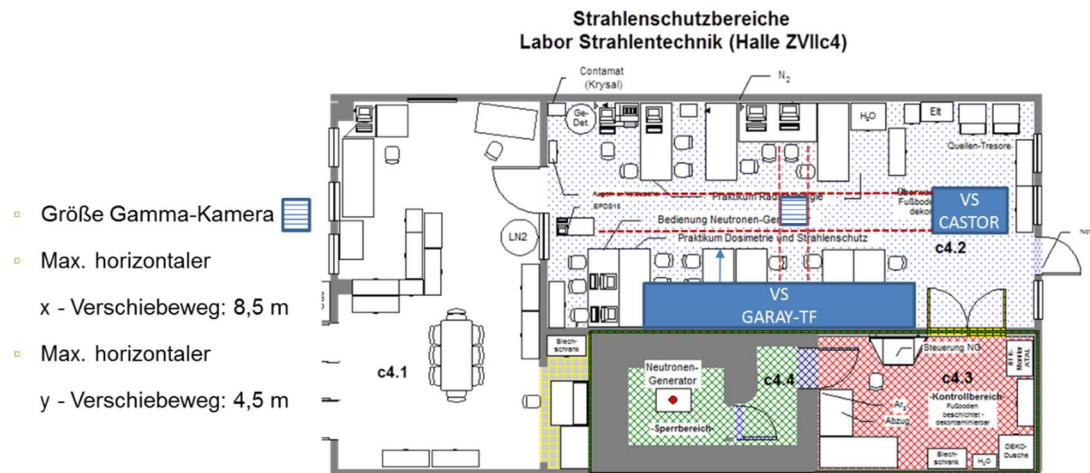


Abb. A-1 Grundriss des Strahlenlabors der HSZG und freie Verschiebewege für Gamma-Kamera

Im Rahmen des QGRIS-Projektes fanden Zutritte zum Kontrollbereich c4.3 und zum Sperrbereich c4.4 nur im Rahmen der Tests zum Einsatz des LiDAR-Systems statt.

A.2 Beschreibung VS „CASTOR“

Die Abb. A-2 zeigt Komponenten und den Gesamtaufbau des VS „CASTOR“. Der VS wurde ursprünglich im Projekt BMWi 1501518B [REI20] entwickelt und aufgebaut. Die Charakteristika dieses VS sind:

- 8 höhenverfahrbare Quellaufnahmen (Komponenten 2)
- Kleinstmögliche Höhe unterste Quelle: 85 mm
- Kleinstmöglicher Abstand untereinander: 15 mm
- Größtmögliche Höhe oberste Quelle: 1040 mm
- Verfahrbare Versuchsstandperipherie (Komponente 6).

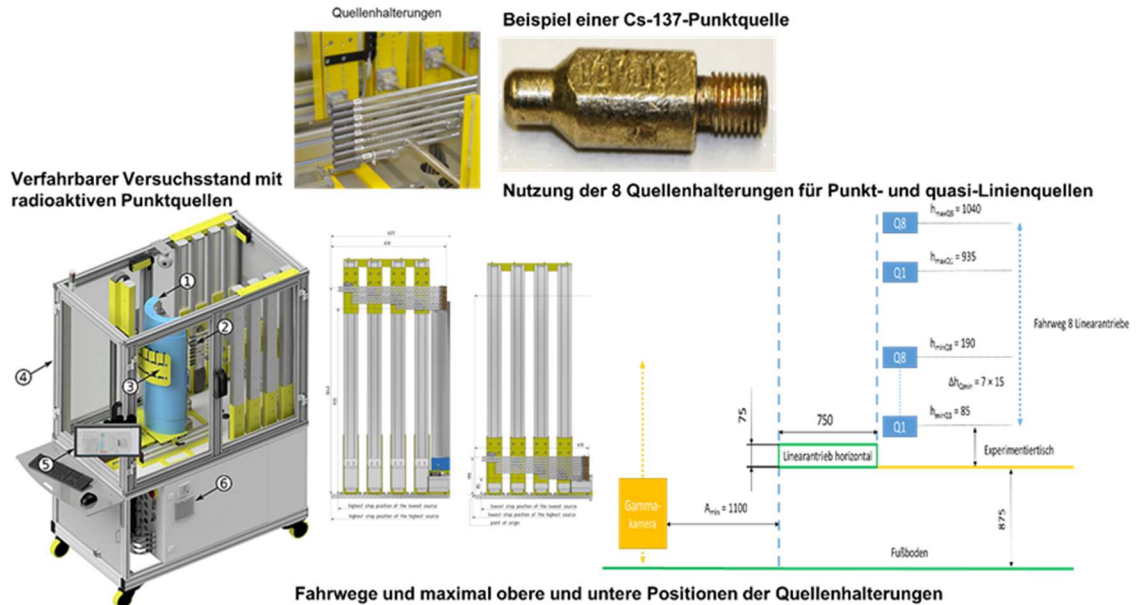


Abb. A-2 Aufbau des VS „CASTOR“ [REI20]

Im Projekt QGRIS wurden die Komponenten 1 (CASTOR-Modellwand) und 3 (Detektoraufnahmen) entfernt. Der Alu-Rahmen (Komponente 4) und der Monitor für die Anzeige der Quellenpositionen (Komponente 5) wurden weiterverwendet.

A.3 Beschreibung VS „GARAY TF“

Die Abb. A-3 zeigt Komponenten und den Gesamtaufbau des VS „GARAY TF“. Die Charakteristika dieses VS sind:

- 2 vertikale, manuell verschiebbare Verschiebeeinheiten (links und rechts, Höhe: 2800 mm) mit jeweils 2 hintereinander angeordneten Verschiebeschienen
- 2 hintereinanderliegende Alu-Rahmen genietet: Breite 2500 mm × Höhe 750 mm mit innenliegenden Nutensteinen
- Verschiebbare Alu-Lochbleche mit Lochdurchmesser \varnothing 5 mm und versetzten Lochabständen von 8 mm
- Quellenaufnahmeröhrchen (am Lochblech).



Abb. A-3 Aufbau des VS „GARAY-TF“

Der hintere Alu-Rahmen dient zur Aufnahme der radioaktiven Quellen. An den verschiebbaren Lochblechen können Quellenaufnahmeröhrchen für Punktquellen installiert werden. An den Alu-Rahmen können weiterhin verschiedene konstruktive Komponenten zur Aufnahme von Linien-, Flächen- und Volumenquellen installiert werden.

Der vorderen Alu-Rahmen dient zum Anbringen von vor den Quellen liegenden Abschirmungsmaterialien.

A.4 Aufbau Prototyp RSL2

Die Abb. A-4 zeigt den Aufbau des von Hellma bereit gestellten Prototypen RSL2 mit zwei 3"-CeBr₃-Detektoren in horizontaler und vertikaler Aufbauvariante sowie rechts liegenden Ansteuerungs- und Messeinheiten.

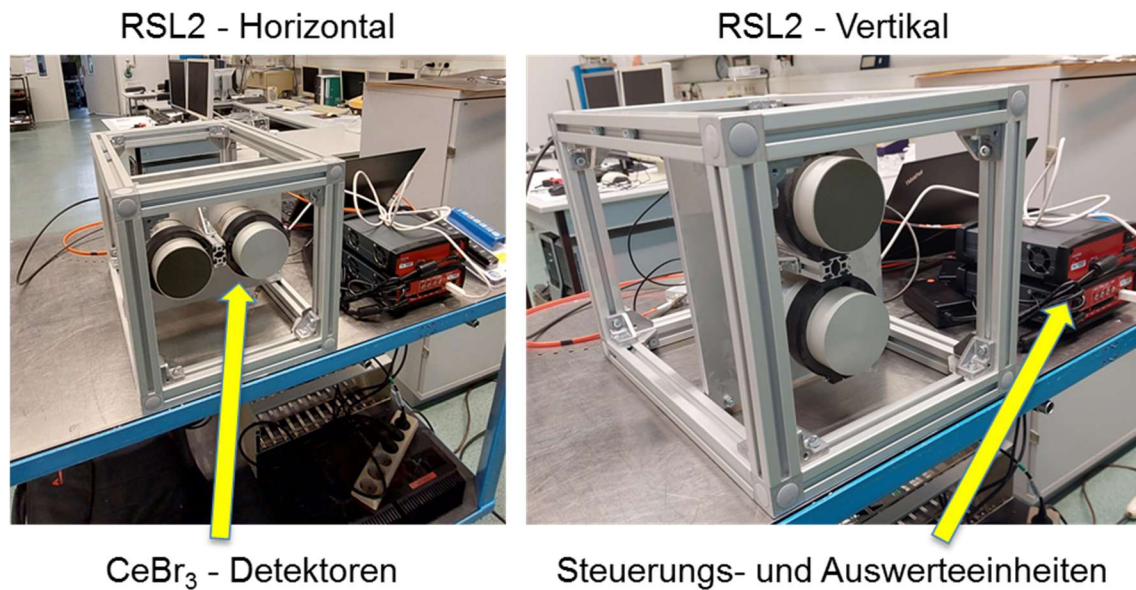


Abb. A-4 Aufbau des Prototypen RSL2 mit 2 CeBr₃-Detektoren

Die Hochspannungsansteuerung der Detektoren und die Auswertung der Messsignale erfolgte PC-gestützt mit LabVIEW von National Instruments™ und je einer aktuellen Anwendungssoftware vom Projektpartner Hellma.

A.5 Aufbau Prototyp RSL7

Die Abb. A-5 zeigt die Abmessungen und den Aufbau des von Hellma bereit gestellten Prototypen RSL7 mit einem zentralen 3"-CeBr₃-Detektor, sechs peripheren, kreisförmig in 60°-Konfiguration angeordneten PVT-Plastikdetektoren und oben liegenden Ansteuerungs- und Messeinheiten.

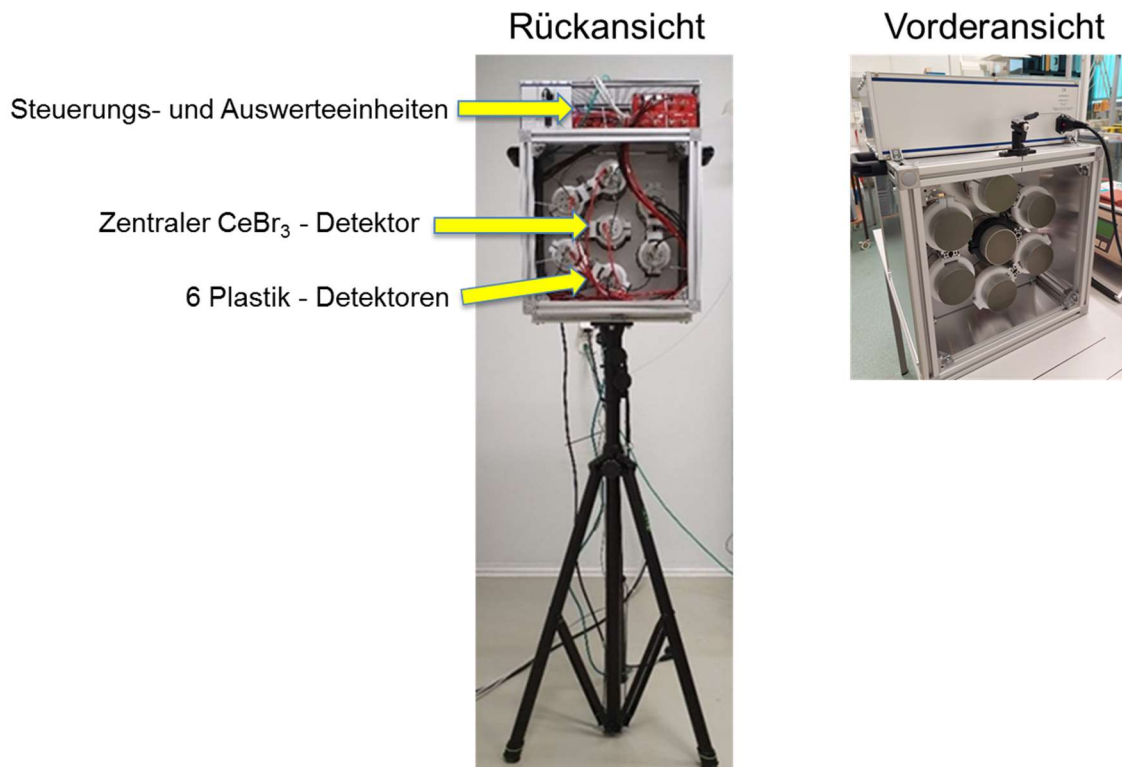
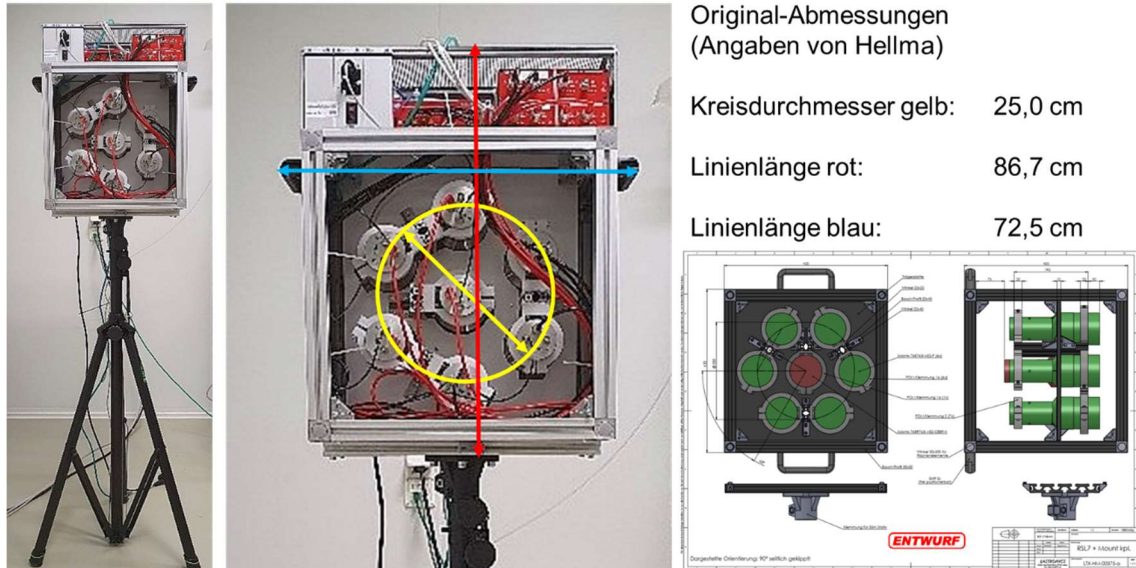


Abb. A-5 Abmessungen und Aufbau des Prototypen RSL7 mit zentralem CeBr₃-Detektor und 6 ringförmig angeordneten PVT-Plastik-Detektoren

Die Hochspannungsansteuerung der Detektoren und die Auswertung der Messsignale erfolgte PC-gestützt mit LabVIEW von National Instruments™ und je einer aktuellen Anwendungssoftware vom Projektpartner Hellma (z.B. GARISO).

A.6 Übersicht zu radioaktiven Quellen im Strahlenlabor der HSZG

Tab. A 1 enthält eine Übersicht zu radioaktiven Quellen, welche im Strahlenlabor der HSZG verfügbar sind. Die Aktivitätsangaben beziehen sich dabei auf den Status am 22.11.2024.

Im Rahmen des QGRIS-Projektes wurden die 8 Co-60 Punktquellen BE-1376 bis BE-1383 für die HSZG von der Firma Eckert&Ziegler, Nuclitec GmbH erworben.

Die Ampullen, Volumen- und Flächenquellen (ID 4836/2 bis ID 4839/4) wurden im VKTA im Rahmen des Projektes präpariert und standen im Strahlenlabor der HSZG als Leihgabe des VKTA zur Verfügung.

Die mit Bezeichnung HD 330 bezeichneten Quellen sind nuklidspezifische Kalibrierquellen. Diese und die anderen aufgeführten Quellen sind Bestandsquellen der HSZG.

Tab. A-1: Übersicht zu radioaktiven Quellen der HSZG und des VKTA

Nuklid	Quellen-Nr.	Aktivität /Bq	Herstellungsdatum	Aktivität (22.11.2024)/Bq	Bemerkung	
Co-60	BE-1376	18,50E+6	23.01.2023	14,54E+6		
Co-60	BE-1377	18,50E+6	23.01.2023	14,54E+6		
Co-60	BE-1378	18,50E+6	23.01.2023	14,54E+6		
Co-60	BE-1379	18,50E+6	23.01.2023	14,54E+6		
Co-60	BE-1380	18,50E+6	23.01.2023	14,54E+6		
Co-60	BE-1381	18,50E+6	23.01.2023	14,54E+6		
Co-60	BE-1382	18,50E+6	23.01.2023	14,54E+6		
Co-60	BE-1383	18,50E+6	23.01.2023	14,54E+6		
Co-60	LAA 10479	977,00E+6	26.09.1985	5,65E+6		
Co-60	LEA 687	278,00E+6	03.10.1985	1,61E+6		
Co-60	LEA 688	260,00E+6	03.10.1985	1,51E+6		
Cs-137	LEA 690	198,00E+6	03.10.1985	80,52E+6		
Cs-137	LEA 689	190,00E+6	03.10.1985	77,26E+6		
Cs-137	LEB 1817	207,60E+6	17.03.1972	61,83E+6		
Cs-137	LD 303	35,00E+6	01.01.1993	16,81E+6	von Bundeswehr	
Cs-137	LD 306	35,00E+6	01.01.1993	16,81E+6	von Bundeswehr	
Cs-137	LD 309	35,00E+6	01.01.1993	16,81E+6	von Bundeswehr	
Cs-137	LD 314	35,00E+6	01.01.1993	16,81E+6	von Bundeswehr	
Cs-137	LD 315	35,00E+6	01.01.1993	16,81E+6	von Bundeswehr	
Cs-137	LD 319	35,00E+6	01.01.1993	16,81E+6	von Bundeswehr	
Cs-137	LD 321	35,00E+6	01.01.1993	16,81E+6	von Bundeswehr	
Cs-137	LD 323	35,00E+6	01.01.1993	16,81E+6	von Bundeswehr	
Cs-137	698332/90	333,00E+3	01.01.1990	149,30E+3	zu EPDS 15	
Pu-239	Na 0137	1,85E+3	19.07.1973	1,85E+3		
Pu-239	NC 011	1,85E+3	19.07.1973	1,85E+3		
Pu-239	NC 009	1,85E+3	19.07.1973	1,85E+3		
Co-60	UC 3578	370,00E+3	30.12.1977	772,81E+0	Quellensatz	
Cs-137		185,00E+3	30.12.1977	62,94E+3		
Kr-85		185,00E+3	30.12.1977	8,90E+3		
Na-22		37,00E+3	30.12.1977	137,70E-3		
U-238	16 x U-Glas	37,00E+3	01.01.1971	37,00E+3	Plaste-Punktquelle	
U-238	1 x U-Glas	160,00E+0	01.01.1991	160,00E+0	Plaste-Punktquelle	
Pu-239	150	73,00E+0	01.02.1963	72,87E+0	Flächenquelle 40 cm ²	
Pu-239	298	733,00E+0	01.02.1963	731,70E+0		
Pu-239	468	7,33E+3	01.02.1963	7,32E+3		
Am-241	AY 649	41,30E+3	01.02.1992	39,18E+3	Quellensatz	
Ba-133	AY 650	40,60E+3	01.02.1992	4,65E+3		
Cs-137	AY 651	36,80E+3	01.02.1992	17,31E+3		
Co-57	AY 652	41,20E+3	01.02.1992	1,98E-9		
Co-60	AY 653	43,20E+3	01.02.1992	576,15E+0		
Mn-54	AY 654	44,60E+3	01.02.1992	129,83E-9		
Hg-203	AY 655	90,10E+3	01.02.1992	555,79E-75		
Na-22	AY 656	35,30E+3	01.02.1992	5,62E+0		
Y-88	AY 657	39,40E+3	01.02.1992	5,62E-30		
Am-241	AD-2927	37,50E+3	01.01.2014	36,85E+3		Quellensatz
Ba-133	AD-2928	37,70E+3	01.01.2014	18,36E+3		
Cs-137	AD-2929	42,60E+3	01.01.2014	33,16E+3		
Co-60	AD-2930	42,80E+3	01.01.2014	10,21E+3		
Eu-152	AD-2931	38,30E+3	01.01.2014	21,61E+3		
Na-22	AD-2932	42,60E+3	01.01.2014	2,34E+3		
Pb-210	AD-2933	225,00E+3	01.01.2014	160,25E+3		
Ra-226	AD-2934	33,90E+3	01.01.2014	33,74E+3		
Nat-U	Gestein	1,60E+06	21.01.2000	1,60E+6	aus Aufbereitung	
Nat-U	Rn-Quelle	3,00E+06	21.01.2000	3,00E+6	aus Aufbereitung	
Am-241	HD 330	3,11E+3	01.05.2000	2,99E+3	Kalibrierung	
Cd-109	HD 330	16,40E+3	01.05.2000	23,83E-3		
Co-57	HD 330	626,00E+0	01.05.2000	66,87E-9		
Ce-139	HD 330	586,00E+0	01.05.2000	13,72E-18		
Hg-203	HD 330	671,00E+0	01.05.2000	105,70E-57		
Sn-113	HD 330	2,01E+3	01.05.2000	6,93E-21		
Sr-85	HD 330	1,64E+3	01.05.2000	4,02E-39		
Cs-137	HD 330	3,12E+3	01.05.2000	1,77E+3		
Y-88	HD 330	4,04E+3	01.05.2000	185,45E-24		
Co-60	HD 330	3,48E+3	01.05.2000	137,38E+0		
Co-60	ID 4836/2	1,03E+6	04.04.2023	827,14E+3		Ampulle
Co-60	ID 4836/3	962,00E+3	04.04.2023	775,55E+3		Volumenquelle
Co-60	ID 4836/4	1,03E+6	04.04.2023	828,75E+3		Flächenquelle
Cs-137	ID 4837/2	1,04E+6	04.04.2023	1,00E+6	Ampulle	
Cs-137	ID 4837/3	977,00E+3	04.04.2023	940,91E+3	Volumenquelle	
Cs-137	ID 4837/4	1,03E+6	04.04.2023	992,91E+3	Flächenquelle	
Ba-133	ID 4838/2	1,07E+6	04.04.2023	957,62E+3	Ampulle	
Ba-133	ID 4838/3	973,00E+3	04.04.2023	873,26E+3	Volumenquelle	
Ba-133	ID 4838/4	1,06E+6	04.04.2023	954,93E+3	Flächenquelle	
Eu-152	ID 4839/2	1,01E+6	04.04.2023	926,74E+3	Ampulle	
Eu-152	ID 4839/3	966,00E+3	04.04.2023	886,37E+3	Volumenquelle	
Eu-152	ID 4839/4	998,00E+3	04.04.2023	915,73E+3	Flächenquelle	