

In-situ-Gammaspektrometrie zur nuklidspezifischen Umweltkontaminationsmessung

DIN
25462

ICS 17.240

In-situ-gamma-ray spectrometry for nuclide specific environmental measurements

Spectrométrie Gamma in situ avec identification des radioisotopes dans l'environnement

Inhalt

	Seite		Seite
Vorwort	2	6 Kalibrierung	14
1 Anwendungsbereich	2	6.1 Allgemeines	14
2 Normative Verweisungen	3	6.2 Detektorausbeute	15
3 Begriffe und Formelzeichen	3	6.3 Ausbeutekorrekturfaktoren	16
3.1 Begriffe	4	7 Auswertung	16
3.2 Formelzeichen	5	7.1 Allgemeines	16
4 Messverfahren	8	7.2 Geometriefaktor	17
4.1 Allgemeines	8	7.3 Winkelkorrekturfaktor	17
4.2 Kurzbeschreibung des Messverfahrens	8	7.4 Natürliche Radionuklide	17
5 Komponenten eines In-situ-Gammaspektrometers	9	7.5 Künstliche Radionuklide	19
5.1 Grundlagen	9	7.6 Berechnung der nuklidspezifischen Ortsdosisleistung	19
5.2 Germanium-Detektorsystem	9	7.7 Anforderungen an die Auswertprogramme	20
5.2.1 Allgemeines	9	8 Anforderungen an den Messort und weitere Einflussgrößen auf das Messergebnis	21
5.2.2 Germanium-Kristall	9	8.1 Anforderungen an den Messort	21
5.2.3 Detektorkapselung	10	8.2 Weitere Einflussgrößen auf das Messergebnis	21
5.2.4 Kryostat und Dewar-Gefäß	11	8.2.1 Allgemeines	21
5.2.5 Besondere Anforderungen	11	8.2.2 Ausdehnung der Messfläche	21
5.3 Elektronik zur Impulsverarbeitung	11	8.2.3 Neigung der Messfläche	21
5.3.1 Allgemeines	11	8.2.4 Rauheit der Bodenoberfläche	21
5.3.2 Detektor-Hochspannungsversorgung	12	8.2.5 Bewuchs des Bodens	21
5.3.3 Spektroskopieverstärker	12	8.2.6 Störungen des Sichtbereiches	22
5.3.4 Analog-Digital-Wandler	13	8.2.7 Inhomogenitäten der Bodenkontamination	22
5.3.5 Vielkanalanalysator	13	8.2.8 Verteilung der Radionuklide im Boden	22
5.3.6 Elektrische Verbindungen	13	8.2.9 Zusammensetzung des Bodens	22
5.4 Systeme zur Datenerfassung und -auswertung	14	8.2.10 Fremdbeiträge	22
5.5 Haltevorrichtung für das Germanium-Detektorsystem	14	8.2.11 Höhe des Detektors über dem Boden	22
		8.2.12 Kalibrierung	22

Fortsetzung Seite 2 bis 48

Normenausschuss Materialprüfung (NMP) – FB Kerntechnik – im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN

	Seite		Seite
9 Grenzen der Anwendung	22	Anhang A (informativ)	
9.1 Allgemeines	22	Photonentransmission für verschiedene	
9.2 Obere Nenngebrauchsbereiche	22	Detektortypen, Fenster- und Endkappen-	
9.3 Inhomogenitäten der Radionuklidverteilung		materialien als Funktion der Photonenenergie .	29
im oder auf dem Boden	23	Anhang B (informativ)	
9.4 Fremdbeiträge zum Nettoeffekt	23	Grundlagen zur Berechnung von Geometrie-	
10 Messunsicherheiten	23	und Winkelkorrekturfaktoren	30
11 Nachweis- und Erkennungsgrenze	24	Anhang C (informativ)	
12 Qualitätssichernde Maßnahmen	25	Faktor f zur Umrechnung der flächen- bzw.	
12.1 Qualitätssicherungsplan	25	massenbezogenen Aktivität in Luftkerma-	
12.2 Regelmäßige Prüfung der		leistung bei verschiedenen Verteilungen von	
messtechnischen Qualität	25	Radionukliden im Boden mit einem Beispiel	
12.2.1 Allgemeines	25	für die Berechnung der Ortsdosisleistung aus	
12.2.2 Konstanzprüfung	25	gemessenen Einzelnuklid-Aktivitäten	38
12.2.3 Teilnahme an Ringversuchen und		Anhang D (informativ)	
Vergleichsmessungen	25	Sichtbereiche eines In-situ-Gammaspektro-	
12.3 Identifikation der Messsysteme	25	meters als Funktion der Photonenenergie bei	
12.4 Qualifikation des Personals	26	verschiedenen Radionuklidverteilungen	
12.5 Aufzeichnungen über Qualitätskontrollen ...	26	im Boden	42
13 In-situ-Gammaspektrometer mit		Anhang E (informativ)	
Kollimator	26	Einfluss von Radionukliden in Luft auf das	
13.1 Allgemeines	26	Ergebnis bei der Bestimmung der flächen- bzw.	
13.2 Einsatzgebiet	26	massenbezogenen Aktivität mit einem	
13.3 Aufbau und Auslegung	26	In-situ-Gammaspektrometer	43
13.3.1 Allgemeines	26	Anhang F (informativ)	
13.3.2 Öffnungswinkel	27	Massenschwächungskoeffizienten von Boden	
13.3.3 Massenbelegung	27	und Schwächungskoeffizienten von Luft als	
13.3.4 Werkstoffe	27	Funktion der Photonenenergie	44
13.3.5 Dekontaminierbarkeit	28	Anhang G (informativ)	
13.3.6 Anforderungen an das Germanium-		Beispiele zur Berechnung von Erkennungs-	
Detektorsystem	28	grenze, Nachweisgrenze und Vertrauensbereich	45
13.4 Kalibrierung	28	Anhang H (informativ)	
13.5 Auswertung	28	Literaturhinweise	48

Vorwort

Diese Norm wurde vom Fachbereich Kerntechnik, NMP 725 „Spektrometrische Oberflächenkontaminationsmessung“, im DIN erstellt.

Die In-situ-Gammaspektrometrie – auch Feldspektrometrie genannt – ist ein aussagekräftiges und wirkungsvolles Hilfsmittel, die Bodenkontamination durch gammastrahlende Radionuklide und die resultierende Ortsdosisleistung der Einzelnuklide vor Ort schnell zu ermitteln, insbesondere bei frischen trockenen oder nassen Ablagerungen von Radionukliden (en: fallout/washout), wenn die Radionuklidverteilung im Boden, die Bodenzusammensetzung und der Wassergehalt eine untergeordnete Rolle spielen.

1 Anwendungsbereich

Die Norm gilt für transportable In-situ-Gammaspektrometer-Systeme mit Germanium-Detektoren zur schnellen Aktivitätsbestimmung künstlicher und natürlicher Radionuklide im und auf dem Boden. Sie kann auch zur Aktivitätsbestimmung bei Freigabemessungen bei kerntechnischen Anlagen, z. B. an Gebäudestrukturen und Bodenflächen, angewendet werden.

2 Normative Verweisungen

Diese Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation.

DIN 1319-4

Grundlagen der Messtechnik – Teil 4: Auswertung von Messungen; Messunsicherheit

E DIN 6814-3 : 1999-04

Begriffe und Benennungen in der radiologischen Technik – Teil 3: Dosisgrößen und Dosiseinheiten

DIN 25415-1: 1988-08

Dekontamination von radioaktiv kontaminierten Oberflächen – Teil 1: Verfahren zur Prüfung und Bewertung der Dekontaminierbarkeit

DIN 25457-6 : 2000-10

Aktivitätsmessverfahren für die Freigabe von radioaktiven Reststoffen und kerntechnischen Anlagenteilen – Teil 6: Bauschutt und Gebäude

E DIN 25457-7 : 1999-10

Aktivitätsmessverfahren für die Freigabe von radioaktiven Reststoffen und kerntechnischen Anlagenteilen – Teil 7: Bodenflächen

DIN 25482-5 : 1993-06

Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen – Teil 5: Zählende hochauflösende gammaspektrometrische Messungen ohne Berücksichtigung des Probenbehandlungseinflusses

DIN IEC 973 : 1993-04

Prüfverfahren für Germanium-Gammastrahlungsdetektoren

DIN IEC 1342 : 1996-09

Nukleare Messgeräte – Vielkanal-Impulsamplitudenanalysatoren – Kennwerte, technische Anforderungen und Prüfverfahren

[1] PTB-Ra-16/5

U. Schötzg und H. Schrader: Halbwertszeiten und Photonen-Emissionswahrscheinlichkeiten von häufig verwendeten Radionukliden, 5. erweiterte Auflage, 1998

[2] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 13. Oktober 1976 in der Fassung der Bekanntmachung vom 30.06.1989 (BGBl. I, S. 1321) und Berichtigung vom 16.10.1989 (BGBl. I, S. 1926); zuletzt geändert durch Verordnung vom 18.08.1997 (BGBl. I, S. 2113)

[3] Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI), Gemeinsames Ministerialblatt Bd. 44 (1993) S. 502-528 und Bd. 47 (1996) S. 195-246

[4] J.H. Hubbell: Photon Mass Attenuation and Energy-Absorption Coefficient from 1 keV to 20 MeV; Int. J. Appl. Radiat. Isot. 33, 1269-1290 (1982)

[5] S.M. Selzer: Calculation of Photon Mass Energy-Transfer and Mass Energy-Absorption Coefficients; Radiation Research 136, 147-170 (1993)

[6] M.J. Berger, J.H. Hubbell: Photon Cross Section on a Personal Computer; Publication NBSIR 87 – 3597, National Institute of Standard, Gaithersburg, MD (1987)

[7] ICRU-Report 53

Gamma-Ray Spectrometry in the Environment, International Commission on Radiation Units and Measurements, 1994

[8] Beck, H.L.; DeCampo, J. and Gogolak, C.: In Situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-Ray Spectrometry, Report HASL-258 (U.S. Department of Energy, Environmental Measurements Laboratory, New York) (1972)

3 Definitionen und Formelzeichen

3.1 Definitionen

Für die Anwendung dieser Norm gelten die folgenden Begriffe:

3.1.1 Ausbeutekorrekturfaktor (In-situ-Gammaspektrometrie): Verhältnis von Nettozählrate bei Photoneneinfall aus einem beliebigen Raumwinkel zur Nettozählrate bei parallel zur Kristall-Symmetrieachse einfallenden Photonen. Der Ausbeutekorrekturfaktor ist abhängig von der Photonenenergie E , dem Azimutwinkel φ und dem Polarwinkel ϑ .

3.1.2 Ausbeutekorrekturfunktion (In-situ-Gammaspektrometrie): Formel zur Berechnung von Ausbeutekorrekturfaktoren in Abhängigkeit von der Photonenenergie E , dem Azimutwinkel φ und dem Polarwinkel ϑ .

3.1.3 Detektorausbeute (In-situ-Gammaspektrometrie): Verhältnis von Nettozählrate einer GesamtabSORPTIONSLINIE zur Flussdichte ungestreuter Photonen am Ort des Detektors. Die Detektorausbeute ist abhängig von der Photonenenergie E , dem Polarwinkel ϑ und dem Azimutwinkel φ .

3.1.4 Detektorausbeutefunktion (In-situ-Gammaspektrometrie): Formel zur Berechnung von Detektorausbeuten in Richtung der Kristall-Symmetrieachse in Abhängigkeit von der Photonenenergie E .

3.1.5 Detektorhöhe (In-situ-Gammaspektrometrie): Abstand des geometrischen Kristallmittelpunktes zur Bodenoberfläche.

3.1.6 differentielle Nichtlinearität: Die größte Abweichung einer Einzelkanalbreite vom Mittelwert aller Kanalbreiten im Messbereich, angegeben als Prozentsatz dieses Mittelwertes [DIN IEC 1342: 1996-09].

3.1.7 Flächen- bzw. massenbezogene Nachweiswahrscheinlichkeit (In-situ-Gammaspektrometrie): Verhältnis von Nettozählrate einer GesamtabSORPTIONSLINIE bei der Energie E zur Photonenquellstärke der betrachteten Flächen- bzw. Masseneinheit.

3.1.8 Geometriefaktor (In-situ-Gammaspektrometrie): Verhältnis von Flussdichte ungestreuter Photonen am Ort des Detektors zur Photonenquellstärke der betrachteten Flächen- bzw. Masseneinheit. Der Geometriefaktor ist abhängig von der Photonenenergie E und der Radionuklidverteilung V .

3.1.9 Geometriefunktion (In-situ-Gammaspektrometrie): Formel zur Berechnung von Geometriefaktoren in Abhängigkeit von der Photonenenergie E und der Radionuklidverteilung V .

3.1.10 Halbwertsbreite (HWB): Die volle Breite einer Verteilung bei der Hälfte der Ordinate des Scheitelwerts dieser Verteilung. Bei einer Normalverteilung ist sie gleich dem $2\sqrt{2\ln 2}$ -fachen der Standardabweichung [DIN IEC 973: 1993-04].

3.1.11 integrale Nichtlinearität: Die größte Abweichung der gemessenen Impuls-Amplitudenkennlinie innerhalb des Messbereichs von der idealen Impuls-Amplitudenkennlinie, angegeben als Prozentsatz vom festgelegten Wert der größten messbaren Signalamplitude [DIN IEC 1342: 1996-09].

3.1.12 Öffnungswinkel (In-situ-Gammaspektrometrie): Kenngröße zur Spezifizierung eines In-situ-Gammaspektrometers mit Kollimator.

3.1.13 Relaxationsmassenflächendichte (In-situ-Gammaspektrometrie): Parameter zur mathematischen Beschreibung der Verteilung eines Radionuklids als Funktion der Bodentiefe; er gibt die Bodenmasse je Flächeneinheit an, innerhalb derer die Aktivität auf $1/e$ (37 %) abnimmt.

3.1.14 Sichtbereich des Detektors (In-situ-Gammaspektrometrie): Bereich im oder auf dem Boden, aus dem 90 % der vom Detektor registrierten ungestreuten Photonen stammen (effektive Probengröße). Der Sichtbereich bezieht sich grundsätzlich nur auf unendlich ausgedehnte Verteilungsmodelle.

3.1.15 Verteilungsmodell (In-situ-Gammaspektrometrie): Modell zur mathematischen Beschreibung der Verteilung der Radionuklide im und auf dem Boden.

3.1.16 Winkelkorrekturfaktor (In-situ-Gammaspektrometrie): Faktor zur Berücksichtigung der Richtungsabhängigkeit der Detektorausbeute. Der Winkelkorrekturfaktor ist abhängig von der Photonenenergie E , der Radionuklidverteilung V und dem verwendeten Detektor.

3.1.17 Messfläche (In-situ-Gammaspektrometrie): Der Bereich im bzw. auf dem Boden, für den eine homogene flächen- bzw. massenbezogene Aktivität vorausgesetzt wird. Die nach dieser Norm berechnete flächen- bzw. massenbezogene Aktivität ist der Mittelwert für diese Messfläche.

3.1.18 Massenbelegung (In-situ-Gammaspektrometrie): Produkt aus Dichte und Wandstärke eines Kollimators für einen Polarwinkel von 90 Grad.

3.2 Formelzeichen

Die verwendeten Formelzeichen sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Formelzeichen

Formelzeichen	Benennung	Einheit
A	Aktivität des betrachteten Radionuklids a) flächenbezogen b) massenbezogen	$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$
A^*	Erwartungswert der Aktivität des betrachteten Radionuklids a) flächenbezogen b) massenbezogen	$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$
A_K	Aktivität des Kalibrierstrahlers	Bq
A_o	flächenbezogene Aktivität auf der Bodenoberfläche	$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$
$A(X)$	flächenbezogene Aktivität als Funktion der Massenflächendichte	$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$
c	Konversionsfaktor zur Umrechnung der Luftkermaleistung in Photonen-Äquivalentdosisleistung	$\text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$
D	Abstand des geometrischen Kristallmittelpunktes zur Bodenoberfläche	m
d	Abstand des Kalibrierstrahlers zum geometrischen Kristallmittelpunkt	m
E	Photonenenergie	keV
E_1	Exponentialintegralfunktion 1. Ordnung	–
E_2	Exponentialintegralfunktion 2. Ordnung	–
e	Index für die Kennzeichnung der Eingangsgrößen	–
f	Faktor zur Umrechnung der flächen- bzw. massenbezogenen Aktivität eines Radionuklids in Luftkermaleistung a) flächenbezogen b) massenbezogen	$\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kBq}^{-1}$ $\mu\text{Gy} \cdot \text{kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kBq}^{-1}$
G_A^*	Erkennungsgrenze für die Aktivität A a) flächenbezogen b) massenbezogen	$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$
(fortgesetzt)		

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Formelzeichen	Benennung	Einheit
$G(E)_V$	Geometriefunktion bei der Verteilung V a) flächenbezogen b) massenbezogen	– $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
$G_{E,V}$	Geometriefaktor bei der Photonenenergie E und der Verteilung V a) flächenbezogen b) massenbezogen	– $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
g_A^*	Nachweisgrenze für die Aktivität A a) flächenbezogen b) massenbezogen	$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$
$\dot{H}$	Ortsdosisleistung, bestimmt als Photonen-Äquivalentdosisleistung	$\text{nSv} \cdot \text{h}^{-1}$
$k(E, \vartheta, \varphi)$	Ausbeutekorrekturfunktion als Funktion der Photonenenergie E , des Polarwinkels ϑ und des Azimutwinkels φ	–
$k(E, \vartheta)$	Ausbeutekorrekturfunktion als Funktion der Photonenenergie E und des Polarwinkels ϑ	–
$k_{E, \vartheta, \varphi}$	Ausbeutekorrekturfaktor für Photonen der Energie E bei Photoneinfall unter dem Polarwinkel ϑ und dem Azimutwinkel φ	–
$k_{E, \vartheta}$	Ausbeutekorrekturfaktor für Photonen der Energie E bei Photoneinfall unter dem Polarwinkel ϑ	
$(k_{E, \vartheta})_m$	Ausbeutekorrekturfaktor für das m -te Polarwinkelsegment und die Photonenenergie E	
k_i	Quantile der standardisierten Normalverteilung mit $i = 1-\alpha, 1-\beta, 1-\gamma/2$	–
m	Index für die Kennzeichnung der Polarwinkelintervalle	–
N_0	Anzahl der Untergrundimpulse, die im Bereich einer Gesamtabsorptionslinie gezählt werden	–
n	Anzahl der Polarwinkelintervalle	–
p_E	Photonen-Emissionswahrscheinlichkeit je Zerfall	–
q	detektorabhängige Größe, die empirisch ermittelt wird	–
r	detektorabhängige Größe, die empirisch ermittelt wird	–
R	Radius des Verteilungsmodells	m
R_0	Untergrundzählrate im Bereich einer Gesamtabsorptionslinie	s^{-1}
R_s	Radius des Sichtbereiches	m
$R_{n,E}$	Nettozählrate der Gesamtabsorptionslinie bei der Photonenenergie E	s^{-1}
$R_{n,E}^*$	Erkennungsgrenze für die Nettozählrate $R_{n,E}$	s^{-1}

(fortgesetzt)

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Formelzeichen	Benennung	Einheit
$s(A)$	Standardmessunsicherheit der Aktivität des betrachteten Radionuklids a) flächenbezogen b) massenbezogen	$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$
$s^2(A)$	Varianz der Aktivität des betrachteten Radionuklids a) flächenbezogen b) massenbezogen	$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-4}$ $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-2}$
$s(x_e)$	Standardmessunsicherheit der Eingangsgröße x_e	die Einheit ergibt sich aus der Ausgangsgröße
$s^2(R_0)$	Varianz der Untergrundzählrate	s^{-2}
T	Dauer zwischen Messzeitpunkt und Bezugszeitpunkt der Messung	d
$T_{1/2}$	Halbwertszeit des Radionuklids	d
t	Messdauer	s
V	Verteilungsmodell	–
$s^2(\text{Ges})$	Varianz des Untergrundes im Bereich einer Gesamtab-sorptionslinie eines Radionuklids	die Einheit ergibt sich aus der Ausgangsgröße
$s^2(P)$	Varianz der Zählstatistik (Poisson)	die Einheit ergibt sich aus der Ausgangsgröße
$s^2(Y)$	Varianz aus zusätzlichen Einflussgrößen	die Einheit ergibt sich aus der Ausgangsgröße
$w_{E,V}$	Winkelkorrekturfaktor für die Photonenenergie E bei der Verteilung V	–
X	Massenflächendichte	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
x_e	Eingangsgröße e	die Einheit ergibt sich aus der Ausgangsgröße
z	Bodentiefe	m
α	Wahrscheinlichkeit für den Fehler 1. Art	–
β	Wahrscheinlichkeit für den Fehler 2. Art	–
$1 - \gamma$	Vertrauensniveau	–
$\Delta\vartheta$	Größe des Polarwinkelintervalls	Grad
$\epsilon_{E,V}$	Nachweiswahrscheinlichkeit a) flächenbezogen b) massenbezogen	m^2 kg
$\eta_0(E)$	Detektorausbeute als Funktion der Photonenenergie E in Richtung der Kristall-Symmetrieachse	m^2
$\eta_{E,\vartheta}$	Detektorausbeute für Photonen der Energie E bei Photoneinfall unter dem Polarwinkel ϑ	m^2

(fortgesetzt)

Tabelle 1 (abgeschlossen)

Formelzeichen	Benennung	Einheit
$\eta_{E,\vartheta,\varphi}$	Detektorausbeute für Photonen der Energie E bei Photoneinfall unter dem Polarwinkel ϑ und dem Azimutwinkel φ	m^2
$\eta_{0,E}$	Detektorausbeute für Photonen der Energie E bei Photoneinfall aus der Richtung der Kristall-Symmetrieachse	m^2
ϑ	Polarwinkel	Grad
ϑ_A	äußerer Polarwinkel des betrachteten Winkelintervalls	Grad
ϑ_G	Grenzwinkel des Verteilungsmodells	Grad
ϑ_I	innerer Polarwinkel des betrachteten Winkelintervalls	Grad
ϑ_K	Öffnungswinkel des Kollimators	Grad
μ_L	Schwächungskoeffizient von Luft	m^{-1}
$\frac{\mu_B}{\rho_B}$	Massenschwächungskoeffizient von Boden	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$
$\rho_B(z)$	Dichte des Bodens als Funktion der Bodentiefe z	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_{n,E}^*$	Nachweisgrenze für die Nettozählrate $R_{n,E}$	s^{-1}
$\Phi(E)_V$	Flussdichte ungestreuter Photonen als Funktion der Energie E bei der Verteilung V	$\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
$\Phi_{E,V}$	Flussdichte ungestreuter Photonen der Energie E bei der Verteilung V am Ort des Detektors	$\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
$\left(\frac{\Delta \Phi_m}{\Phi} \right)_{E,V}$	Flussdichteanteil ungestreuter Photonen der Energie E aus dem Polarwinkelintervall m bei der Verteilung V am Ort des Detektors	–
φ	Azimutwinkel	Grad
ξ	Relaxationsmassenflächendichte	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$

4 Messverfahren

4.1 Allgemeines

Die In-situ-Gammaspektrometrie ist eine physikalische Messmethode zur Aktivitätsbestimmung von Radionukliden im und auf dem Boden. Sie weist gegenüber der Entnahme von Bodenproben mit anschließender Auswertung im Labor gewichtige Vorteile auf:

- Kürzere Messzeit,
- keine zeitaufwendige Probeentnahme, eine Probenvorbereitung und Analyse im Labor entfallen,
- sofortige Verfügbarkeit der Messergebnisse,
- Mittelung der Aktivität über eine große Fläche oder eine große Probenmenge; dies dient z. B. dem Ausgleich von Inhomogenitäten.

4.2 Kurzbeschreibung des Messverfahrens

Bei der In-situ-Gammaspektrometrie wird mit einem Germanium-Detektor ein der Photonenflußdichte entsprechendes Impulshöhenspektrum gemessen, um die in der Umgebung vorhandenen Radionuklide zu identifizieren sowie bei Kenntnis der Radionuklidverteilung im Boden und bestimmter physikalischer Eigenschaften von Boden und Luft die flächen- oder massenbezogene Aktivität zu bestimmen. Die Radionuklidverteilung im Boden ist in Allgemeinen nicht bekannt. Daher sind in diesen Fällen entsprechende Messungen durchzuführen oder Annahmen über die Verteilung zu treffen, die mit Hilfe mathematischer Modelle beschrieben wird.

Besondere Bedeutung haben folgende Fälle:

- Homogene Verteilung von Radionukliden im Boden; dies betrifft in Wesentlichen die natürlichen Radionuklide,
- homogene Verteilung von Radionukliden auf der Bodenoberfläche, z. B. frische, trockene Ablagerungen von Radionukliden (en: fallout),
- mit zunehmender Tiefe im Boden abnehmende Aktivität, z. B. für oberflächlich abgelagerte Radionuklide, die in den Boden eingedrungen sind.

ANMERKUNG: Meist werden zur Beschreibung der Aktivitätsverteilung im Boden einfache Exponentialmodelle zugrunde gelegt.

5 Komponenten eines In-situ-Gammaspektrometers

5.1 Grundlagen

Photonen erzeugen durch Wechselwirkung mit dem Germanium-Kristall (Compton-, Photo- und Paarbildungs-Prozesse) Ladungsträger, die durch ein elektrisches Feld gesammelt werden und an den Detektorkontakten Ladungsimpulse erzeugen. Diese werden durch den Vorverstärker und den nachgeschalteten Spektroskopieverstärker weiterverarbeitet, im Analog-Digital-Wandler (ADW, en: analog digital converter – ADC) digitalisiert und im Vielkanalanalysator (VKA, en: multi channel analyzer – MCA) als Impulshöhenspektrum registriert. Die Daten werden vorzugsweise in Rechnern, auf Festplatten oder Disketten gespeichert oder mit Magnetbandsystemen aufgezeichnet. Da bei Messungen vor Ort in Allgemeinen keine Netzspannung zur Verfügung steht, ist es zweckmäßig, die Messapparatur auch für netzunabhängigen Betrieb auszuliegen.

ANMERKUNG: Grundsätzlich kann auch eine Fernübertragung der Messdaten, z. B. über Kabel, Funk oder Satellit, erfolgen.

Ein In-situ-Gammaspektrometer umfasst folgende vier Hauptkomponenten:

- Das Germanium-Detektorsystem,
- die Elektronik zur Impulsverarbeitung,
- das System zur Datenerfassung und Datenauswertung,
- die Haltevorrichtung für das Germanium-Detektorsystem.

5.2 Germanium-Detektorsystem

5.2.1 Allgemeines

Das Germanium-Detektorsystem umfasst den im Vakuum in einer Endkappe montierten Germanium-Kristall, welcher einschließlich der ersten Stufe des Vorverstärkers (zur Ladungsauskopplung) im Kryostaten mit flüssigem Stickstoff aus dem Dewar-Gefäß gekühlt wird. Der integrierte Vorverstärker, einschließlich der elektrischen Ein- und Ausgänge für die Elektronik zur Impulsverarbeitung und der Hochspannungszuführung, ist mechanisch an den Kryostaten gekoppelt.

5.2.2 Germanium-Kristall

Je nach Messaufgabe stehen zwei Germanium-Kristalltypen (n-Typ- und p-Typ-Kristalle) in unterschiedlichen Ausführungen zur Verfügung (Kristallform und Halterung, Kryostatenform, Endkappen- und Fenstermaterialien). Eine Übersicht über Kenndaten einiger Germanium-Detektoren für die In-situ-Gammaspektrometrie vermittelt Tabelle 2. Die Art der Ausführung bestimmt auch die untere Grenze der erfaßbaren Photonenenergie.

Tabelle 2: Kenndaten von Germanium-Detektoren für die In-situ-Gammaspektrometrie

Kristall-Typ	Endkappen-Material	Fenster-Material	Energiebereich	relative Nachweiswahrscheinlichkeit bzw. Abmessungen des Kristalls
p-Typ, koaxial ¹⁾	Al: 0,7 mm bis 1,5 mm Cu: ≈ 1 mm Mg: ≈ 1,5 mm Edelstahl: 0,3 mm bis 0,5 mm		60 keV bis 10 MeV	10 % bis 175 % 10 mm Ø bis 90 mm Ø 30 mm bis 80 mm dick
p-Typ, koaxial	Al: 0,7 mm bis 1,5 mm	Be Kohlefaser	3 keV bis 10 MeV	10 % bis 150 % 75 mm Ø bis 100 mm Ø 110 mm bis 150 mm dick
n-Typ, koaxial ¹⁾	Al: 0,7 bis 1,5 mm Mg: ≈ 1,5 mm Edelstahl: 0,3 mm bis 0,5 mm		20 keV bis 3 MeV	10 % bis 100 % 10 mm Ø bis 80 mm Ø 30 mm bis 70 mm dick
	Mg: ≈ 1,5 mm Al: 0,7 mm bis 1,5 mm	Be Kohlefaser	3 keV bis 3 MeV	10 % bis 100 % 10 mm Ø bis 80 mm Ø 30 mm bis 70 mm dick
n-Typ, semi-koaxial	Mg: ≈ 1,5 mm Al: 0,7 mm bis 1,5 mm	Be Kohlefaser	3 keV bis 1 MeV	36 mm Ø bis 80 mm Ø 10 mm bis 30 mm dick
p-Typ, planar	Mg: ≈ 1,5 mm Al: 0,7 mm bis 1,5 mm	Be Kohlefaser	3 keV bis 300 keV	6 mm Ø bis 36 mm Ø 7 mm bis 13 mm dick
			3 keV bis 3 MeV	36 mm Ø bis 80 mm Ø 20 mm bis 40 mm dick
¹⁾ Geschlossene Endkappe, kein gesondertes Fenster				

ANMERKUNG: Koaxiale p-Typ-Kristalle haben eine lithium-gedriftete Kontaktschicht von 500 µm bis 800 µm Dicke an der Fenster-Eintrittsseite. Sie werden daher für Messungen von Photonenenergien über 50 keV verwendet, während koaxiale n-Typ-Kristalle eine bor-implantierte Kontaktschicht von etwa 0,3 µm Dicke an der Fenster-Eintrittsseite aufweisen. Sie können daher für Messungen von Photonenenergien ab etwa 3 keV verwendet werden.

Für Allgemeine Anwendungen, z. B. die Bestimmung der massenbezogenen Aktivität natürlicher Radionuklide im Boden und der Bodenkontamination durch künstliche Radionuklide, ist es zweckmäßig, Germanium-Detektoren mit einer relativen Nachweiswahrscheinlichkeit von 20 % bis 50 % zu verwenden.

Nach Möglichkeit sind Germanium-Detektoren zu verwenden, die keine oder nur eine geringfügige Richtungsabhängigkeit der Detektorausbeute aufweisen. Dies ist annähernd dann gegeben, wenn das Verhältnis des Durchmessers zur Länge eines Germanium-Kristalls etwa 1 beträgt.

5.2.3 Detektorkapselung

Vorzugsweise ist die Detektorkapsel aus Materialien mit kleiner Kernladungszahl, z. B. Aluminium, zu fertigen. Eine geschlossene Endkappe mit einer Dicke von etwa 1 mm Aluminium ist ein guter Kompromiss zwischen den Forderungen nach ausreichender mechanischer Stabilität bei Feldanwendungen und möglichst geringer Absorption der Photonenstrahlung. Der Transmissionsfaktor für 1 mm Aluminium beträgt bei der 46-keV-Gammastrahlung von ²¹⁰Pb etwa 96 %. Das Eintrittsfenster der Endkappe kann grundsätzlich sehr dünn auslegt werden (z. B. Eintrittsfenster aus Beryllium mit 0,5 mm Dicke), ist dann aber mechanisch sehr empfindlich. Anhang A zeigt beispielhaft die Photonentransmission für verschiedene Detektortypen, Fenster- und Endkappenmaterialien im Energiebereich zwischen 2 keV und 500 keV.

5.2.4 Kryostat und Dewar-Gefäß

Im Allgemeinen werden bei In-situ-Gammaspektrometer-Systemen tragbare Kryostaten und Dewar-Gefäße verwendet. Das Volumen des Dewar-Gefäßes, d. h. die Stickstoff-Haltezeit, bestimmt die maximale Messdauer. Aus Gründen der Handhabbarkeit sollten im Allgemeinen Dewar-Gefäße mit einem Volumen unter 10 l verwendet werden.

ANMERKUNG: Bei Dewar-Gefäßen mit Doppelkammer kann das Detektorsystem in jeder beliebigen Raumrichtung positioniert werden.

5.2.5 Besondere Anforderungen

Das Detektorsystem muss folgenden besonderen Anforderungen genügen:

- a) Es muss feuchtigkeits- und spritzwassergeschützt ausgeführt sein. Dies gilt auch für die mechanischen und elektrischen Verbindungen zwischen Vorverstärker und der Elektronik zur Impulsverarbeitung,
- b) der Kristall ist so zu montieren, dass während des Transportes auftretende mechanische Belastungen keine Beschädigung des Detektors zur Folge haben. Dies setzt voraus, dass für den Detektor transportsichere Verpackungen zur Verfügung stehen,
- c) die Detektorkapselung muss so ausgeführt sein, dass auch im Feldeinsatz das Vakuum in ihrem Inneren sichergestellt ist,
- d) der Arbeitsbereich des Detektorsystems muss für einen Temperaturbereich von -20 °C bis $+50\text{ °C}$ ausgelegt sein. Eine höhere Umgebungstemperatur an der Detektorkapsel kann zu einer Verschlechterung des Vakuums zwischen Endkappe und Kristall führen,
- e) bei Kühlungsausfall, d. h. Stickstoff im Dewar-Gefäß verbraucht, darf dieses über mindestens 12 h nicht mehr nachgefüllt werden,
- f) das Volumen des Dewar-Gefäßes sollte für eine Standzeit (Stickstoff-Haltezeit im Ruhezustand) von mindestens 48 h ausgelegt sein.

ANMERKUNG: Beim Transport des Detektorsystems ist mit einem erhöhten Stickstoffverbrauch zu rechnen.

Für die üblichen Anwendungsbereiche von In-situ-Gammaspektrometern ist die Verwendung hochreiner Materialien für die Kristallhalterung, die Endkappe und das Eintrittsfenster (en: low background mounting) im Allgemeinen nicht erforderlich.

Für Messaufgaben mit höchsten Anforderungen an die Energieauflösung im Energiebereich unter 150 keV können semi-planare, semi-koaxiale oder planare Germanium-Detektoren eingesetzt werden (siehe dazu Tabelle 2).

5.3 Elektronik zur Impulsverarbeitung

5.3.1 Allgemeines

Die Elektronik zur Impulsverarbeitung besteht aus folgenden Komponenten:

- Detektor-Hochspannungsversorgung,
- Spektroskopieverstärker,
- Analog-Digital-Wandler,
- Vielkanalanalysator.

Die Anforderungen an diese Komponenten werden in diesem Abschnitt einzeln behandelt. Teilweise werden Baugruppen angeboten, in denen mehrere Komponenten mit unterschiedlichem Integrationsgrad zusammengefasst sind.

Im Allgemeinen werden folgende Systeme unterschieden:

a) Rechnerunabhängige Systeme:

Robuste, nicht vernetzte Systeme mit Bildschirm, nutzbar ohne Rechner im Feldeinsatz, d. h. einschließlich Daten- und Programmspeicher sowie der Standardschnittstellen. Die Daten können für eine weitergehende Analyse in einen entsprechenden Rechner übertragen werden.

b) Rechnergesteuerte Systeme:

- 1) Kompakte Komponenten, welche in Verbindung mit dem Rechner zum vollständigen Messsystem werden,
- 2) hochintegrierte Steckkarten, welche in Verbindung mit dem Rechner ein vollständiges Messsystem bilden,
- 3) modular aufgebaute Systeme einschließlich Rechner, welche aber im Allgemeinen eine 230-V-Stromversorgung benötigen.

Rechnerunabhängige und rechnergesteuerte Systeme sind als Tischgeräte und als tragbare Systeme verfügbar. Obwohl rechnerunabhängige Systeme noch in verschiedenen Anwendungen vielfach vorzufinden sind, werden heutzutage überwiegend rechnergesteuerte, tragbare Systeme eingesetzt. Kennzeichnend ist, dass sie im Allgemeinen sowohl mit Batterie als auch mit Netzspannung betrieben werden können. Teilweise werden modulare Laborsysteme mit einer Netzspannungsversorgung eingesetzt.

Die Elektronik zur Impulsverarbeitung muss für einen Feldeinsatz folgende besonderen Anforderungen erfüllen:

- a) Die einzelnen Komponenten müssen temperaturstabilisiert sein; alternativ sollte ein – vorzugsweiser digitaler – Spektrums-Stabilisator vorgesehen sein. Zweckmäßig ist eine Verstärkungs- und gegebenenfalls eine Nullpunkts-Stabilisierung,

ANMERKUNG: Im Feldeinsatz kann eine Verstärkungs-Stabilisierung anhand einer ungestörten Gesamtabsorptionslinie, z. B. von ^{40}K bei 1461 keV, erfolgen.

- b) die Elektronik zur Impulsverarbeitung sollte sowohl netzunabhängig mit Batterien für eine Dauer von mindestens 4 h betrieben werden können, als auch über Anschlüsse verfügen, die einen Betrieb mit externen Batterien bzw. aus einer 230-V-Netzspannungsversorgung ermöglichen. Ein Umschalten (z. B. automatisch) zwischen Batterie- und Netzbetrieb sollte möglich sein. Eine batteriebetriebene Elektronik zur Impulsverarbeitung ist vorzuziehen.

5.3.2 Detektor-Hochspannungsversorgung

Zum Betrieb von Germanium-Detektoren sind Hochspannungen bis 5 kV – bei Strömen im μA -Bereich – erforderlich. Folgende Anforderungen sind an Detektor-Hochspannungsversorgungen zu stellen:

- a) Je nach Detektortyp (p-Typ- oder n-Typ-Kristall) ist eine positive oder negative Hochspannung erforderlich. Ein wirksamer Schutz gegen versehentliche Polaritätsänderung ist vorzusehen,

ANMERKUNG 1: Bei falscher Polarität wird die Eingangsstufe des Vorverstärkers zerstört, der Vorverstärker und die Kristalloberfläche können beschädigt werden.

- b) im Nennbereich von 500 V bis 5 kV muss eine Spannungsstabilität von $\pm 1\%$ sichergestellt sein. Im Frequenzbereich zwischen 5 Hz und 50 MHz dürfen Rauschen und Welligkeit einen Wert von 10 mV nicht übersteigen,

ANMERKUNG 2: Größere Werte von Rauschen und Welligkeit führen zu einer Verschlechterung der Energieauflösung.

- c) um den Kristall bei ungenügender Kühlung (Kühlungsausfall, Vakuump Probleme) vor Zerstörung zu schützen, ist eine automatische Hochspannungsabschaltung (en: bias shutdown) vorzusehen.

ANMERKUNG 3: Zum Teil sind die Hochspannungsabschaltungen so ausgelegt, dass Hochspannungsversorgungen und Detektoren von verschiedenen Herstellern kombiniert werden können.

5.3.3 Spektroskopieverstärker

Aufgabe des Spektroskopieverstärkers ist neben der Signalverstärkung die Verbesserung des Signal/Rauschverhältnisses und die Impulsformung für die anschließende Analog-Digital-Wandlung. Folgende Anforderungen sind an den Spektroskopieverstärker für Germanium-Detektoren zu stellen:

- a) Bei modularen Systemen sind die Ausgangssignale des Spektroskopieverstärkers dem Eingangsparameter des Analog-Digital-Wandlers anzupassen (im Allgemeinen Amplitudenbereich zwischen 0 V bis 10 V),

b) die Zeitkonstante zur Impulsformung (en: shaping time) sollte im Bereich zwischen 2 μ s und 8 μ s in mehreren Stufen wählbar eingestellt werden können,

ANMERKUNG: Die Wahl der Zeitkonstanten ist erforderlich, um eine optimale Energieauflösung bei kleinen und mittleren Zählraten sicherzustellen.

c) der Verstärkungsfaktor sollte im Bereich von 1 bis 1 000 einstellbar sein,

d) bei einem Verstärkungsfaktor größer 100 sollte der Effektivwert des Rauschens 5 μ V nicht übersteigen (gemessen bei einer Zeitkonstanten zur Impulsformung von 2 μ s),

e) der Spektroskopieverstärker muss zur Ankopplung an den Vorverstärker eine Pol-Nullstellenkompensation der Eingangsstufe (en: pole zero cancellation) besitzen. Im Feldeinsatz ist eine automatische oder halbautomatische Pol-Nullstellenkompensation der Eingangsstufe zweckmäßig,

f) der Spektroskopieverstärker muss in der Ausgangsstufe eine Nulllinien-Restoration (en: base line restorer) besitzen.

5.3.4 Analog-Digital-Wandler

In vielen Fällen bilden der Analog-Digital-Wandler und der Vielkanalanalysator eine mechanische Einheit. Sie müssen folgende Anforderungen erfüllen:

a) Es sind Analog-Digital-Wandler mit mindestens 4 096 Kanälen (12 Bit) zu verwenden,

ANMERKUNG 1: Im Energiebereich bis 2 MeV ergeben sich bei einer Energieauflösung des Detektors von 2,0 keV im Spektrum etwa sieben Kanäle für Photonen mit einer Energie von etwa 2 MeV, wenn ein Analog-Digital-Wandler mit 4 096 Kanälen verwendet wird, während bei einer Energieauflösung von 1,0 keV für Photonen mit einer Energie von 100 keV nur dreieinhalb Kanäle zur Verfügung stehen; dabei wurde die Peakbreite zu $1,7 \cdot$ Halbwertsbreite (HWB) berechnet. Für einen höheren Energiebereich bis 3 MeV, z. B. bei der Bestimmung natürlicher Radionuklide – ^{208}Tl emittiert Gammastrahlung mit einer Energie von 2,6 MeV –, sind also 8 192 Kanäle erforderlich, um das Energieauflösungsvermögen des Detektors optimal nutzen zu können.

b) es sind Analog-Digital-Wandler mit einer Taktfrequenz von mindestens 100 MHz einzusetzen; das ergibt eine Konversionszeit je Ereignis von weniger als 15 μ s für den gesamten Dynamikbereich von 4 096 oder 8 192 Kanälen,

ANMERKUNG 2: Prinzipiell ist es sogar zweckmäßig, Systeme mit einer Konversionszeit von kleiner 10 μ s einzusetzen. Für kommerzielle Anwendungen werden Analog-Digital-Wandler bis etwa 1 μ s Konversionszeit angeboten, wobei oft die Methode der Zwischenspeicherung von Folgeereignissen, die während der Bearbeitungszeit des ersten Ereignisses folgen, angewandt wird.

c) es ist eine integrale bzw. differentielle Nichtlinearität von kleiner 0,025 % bzw. kleiner 1 % über 99 % des gesamten Dynamikbereichs einzuhalten.

5.3.5 Vielkanalanalysator

Ein Vielkanalanalysator hat die Aufgabe der Erfassung, Speicherung und Verarbeitung von Amplitudenhäufigkeiten. Er kann direkt mit einem tragbaren Datenverarbeitungssystem verbunden werden. Ein Vielkanalanalysator enthält üblicherweise eine Datenerfassungseinheit, verschiedene Daten- und Programmspeicher sowie Standardschnittstellen. Bei rechnerunabhängigen Spektrometersystemen enthält der Vielkanalanalysator darüber hinaus verschiedene Ein- und Ausgabeeinheiten (z. B. Monitor, Tastatur). Bei rechnergesteuerten Spektrometersystemen erfolgt die Bedienung des Vielkanalanalysators z. B. durch einen tragbaren Rechner und das für die Datenaufnahme und Analyse entsprechende Programm.

5.3.6 Elektrische Verbindungen

Die Hochspannung wird dem Detektor im Allgemeinen über abgeschirmte 93-Ohm-Koaxialkabel, die über spezielle Hochspannungssteckverbindungen verfügen (en: signal high voltage connectors; SHV connectors), zugeführt. Für die Signalleitung werden ebenfalls abgeschirmte Koaxialkabel benutzt.

Für Feldanwendungen müssen feuchtigkeitsgeschützte, gesicherte Steckverbindungen verwendet werden.

Zweckmäßig sind Mehrfachsteckverbindungen, bei denen zusätzlich zur Detektorhochspannung auch die Leitungen für die Vorverstärker-Versorgungsspannung und die Signalübertragung mitgeführt werden.

Es ist sicherzustellen, dass bei eingeschalteter Hochspannung das Hochspannungskabel nicht aus der Steckverbindung gelöst oder entfernt werden kann.

Bei modernen Hochspannungsversorgungen und Vorverstärkern ist eine vorgeschriebene Reihenfolge bei der Trennung der Kabelverbindungen zu beachten.

ANMERKUNG: Eine Unterbrechung der Hochspannung kann den Feldeffekttransistor zerstören (Leckstrom zu groß). Sofern eine interne automatische Regelung der Hochspannung auf den Sollwert und umgekehrt vorhanden ist (in etwa 10 s), kann die Hochspannung direkt ein- und ausgeschaltet werden.

5.4 Systeme zur Datenerfassung und -auswertung

Grundsätzlich können Messungen in der Umwelt mit rechnerunabhängigen oder rechnergesteuerten In-situ-Gammaspektrometern durchgeführt werden. Entscheidend ist, ob z. B. im Rahmen von Beweissicherungsmaßnahmen vor Ort eine Reihe von Messungen durchgeführt wird und zur Erfüllung der Aufgabe eine spätere Auswertung im Laboratorium ausreicht, oder ob unmittelbar im Anschluss oder sogar noch während der Messungen eine vollständige Auswertung der Messdaten erforderlich ist.

Bei rechnerunabhängigen Systemen beinhaltet bereits der Vielkanalanalysator eine eigene Datenaufnahme einschließlich einer Spektrendarstellung mit einer kleinen Bildröhre oder einer anderweitigen Anzeige. Vollständige Analysen können später, nach der Datenübertragung auf einen Labor- oder einen tragbaren Rechner, durchgeführt werden. Vorteilhaft ist, wenn der Rechner während einer Messung abgeschaltet oder das In-situ-Gammaspektrometer mit Ersatzbatterien bestückt werden kann, ohne die laufende Messung zu beeinträchtigen.

Bei der Auswahl der Bildschirme ist darauf zu achten, dass der Kontrast der Anzeige auch bei Tageslicht (d. h. im Freien ohne jegliche Abdeckung oder seitlichen Sonnenschutz) ausreichend ist, um eine fehlerfreie Bedienung sicherzustellen.

5.5 Haltevorrichtung für das Germanium-Detektorsystem

Die Haltevorrichtung muss die Positionierung des Germanium-Detektorsystems in verschiedenen Höhen erlauben. Die Haltevorrichtung ist vorzugsweise aus Materialien mit kleiner Kernladungszahl und geringer Dichte (wie z. B. Aluminium, Kunststoff oder Holz) zu fertigen, wobei auf geringe spezifische Eigenaktivität des Materials zu achten ist. Im Allgemeinen wird der Detektor in einer Höhe von 1 m positioniert.

6 Kalibrierung

6.1 Allgemeines

Großflächige Kalibrierquellen für die bei der In-situ-Gammaspektrometrie vorkommenden Geometrien sind in der Praxis nicht oder nur unter Schwierigkeiten zu realisieren. Die Kalibrierung eines In-situ-Gammaspektrometers erfolgt daher durch mehrere einzelne Messungen mit radioaktiven Punktquellen. Dabei ist die Detektorausbeute zu bestimmen. Bei Detektoren mit einer Richtungsabhängigkeit der Detektorausbeute sind zusätzlich Ausbeutekorrekturfaktoren zu bestimmen.

ANMERKUNG: Neben den Ergebnissen der Kalibrierung des Detektors gehen in die quantitative Analyse Berechnungen von Flussdichten ungestreuter Photonen am Ort des Detektors ein. Diese Berechnungen basieren auf Annahmen über die Verteilung der auszuwertenden Radionuklide im bzw. auf dem Boden. Bild 1 vermittelt eine schematische Übersicht über empirische Größen und Modellgrößen und ihre Verknüpfung zur Kalibrierung eines In-situ-Gammaspektrometers und zur Auswertung der gemessenen Spektren.

Numerische Verfahren (z. B. Monte-Carlo-Verfahren) dürfen zur Kalibrierung herangezogen werden. Die Ergebnisse sollten experimentell überprüft werden.

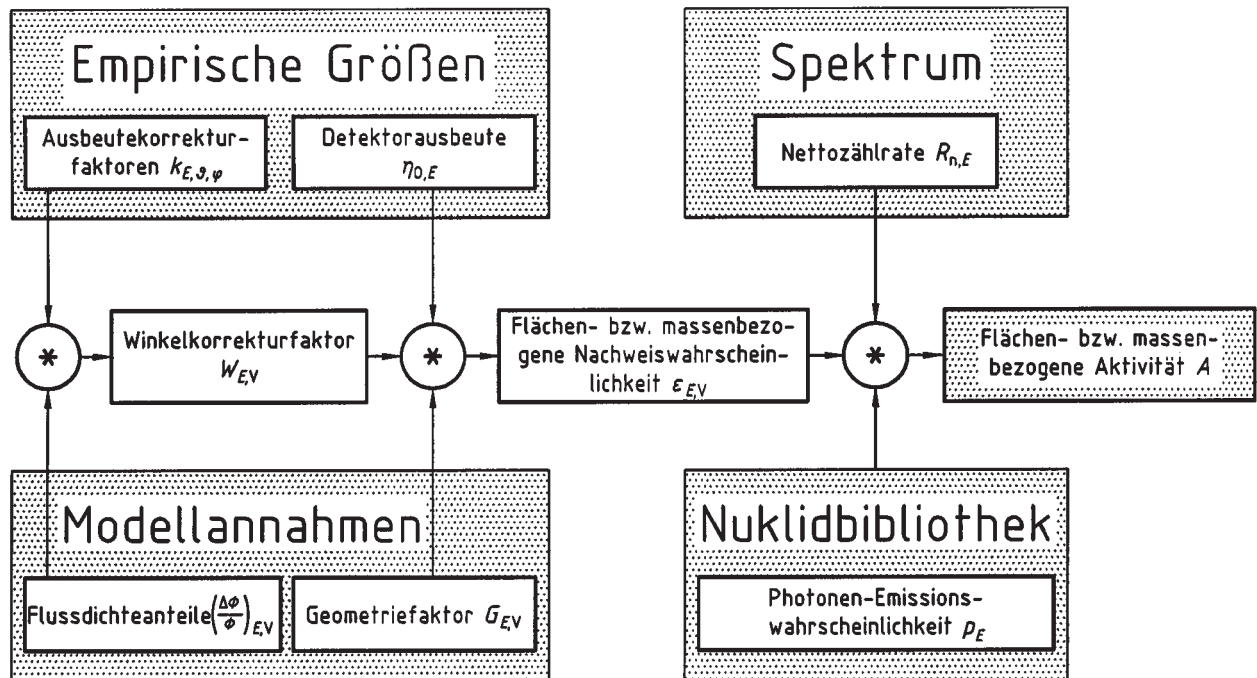


Bild 1: Schematische Übersicht über empirische Größen und Modellgrößen und ihre Verknüpfung zur Kalibrierung eines In-situ-Gammaspektrometers und zur Auswertung der gemessenen Spektren

6.2 Detektorausbeute

Die Detektorausbeute stellt den Zusammenhang zwischen der Nettozählrate $R_{n,E}$ der Gesamtabsorptionslinie bei der Photonenenergie E im Impulshöhenspektrum und der Flussdichte ungestreuter Photonen $\Phi_{E,V}$ der Energie E am Ort des Detektors dar. Sie hängt von der Photonenenergie E , dem Polarwinkel ϑ und dem Azimutwinkel φ ab. Besondere Bedeutung hat die Detektorausbeute $\eta_{0,E}$ in Richtung der Kristall-Symmetrieachse. Sie ist eine Kenngröße des Detektors.

Zur Kalibrierung werden punktförmige Kalibrierstrahler verwendet. Sie sind hierzu im Abstand von mindestens 1 m zum geometrischen Kristallmittelpunkt auf der Kristall-Symmetrieachse zu positionieren. Es werden die Nettozählraten der Gesamtabsorptionslinien bestimmt.

Die Detektorausbeute $\eta_{0,E}$ für die betrachtete Photonenenergie E ergibt sich zu:

$$\eta_{0,E} = \frac{R_{n,E}}{\Phi_{E,V}} = 4\pi d^2 \cdot \frac{R_{n,E}}{A_K \cdot p_E} \quad (1)$$

Die Photonenenergien der verwendeten Kalibrierstrahler sollten in einem Bereich von 80 keV bis 2 MeV liegen. Vorzugsweise werden als Kalibrierstrahler Viellinienpräparate, wie z. B. ^{133}Ba in Kombination mit ^{152}Eu oder Mischpräparate, verwendet.

Üblicherweise wird mit Hilfe der ermittelten Detektorausbeute $\eta_{0,E}$ eine Detektorausbeutefunktion $\eta_0(E)$ erstellt. Sie ermöglicht für die Richtung der Kristall-Symmetrieachse die Berechnung der Detektorausbeute für beliebige Photonenenergien.

ANMERKUNG 1: Die Parametrisierung dieser Detektorausbeutefunktion kann mit Hilfe eines Programmmoduls zur Ausbeute-Kalibrierung vorgenommen werden, über das nahezu alle Gammaspektrometrie-Auswerteprogramme in ihrer Grundausstattung verfügen.

ANMERKUNG 2: In Allgemeinen lässt sich die Detektorausbeutefunktion für Photonen im Energiebereich von etwa 200 keV bis 3 MeV durch folgende Beziehung beschreiben:

$$\ln(\eta_0(E)) = q - r \ln E \quad (2)$$

Die Abweichung vom tatsächlichen Verlauf der Detektorausbeutefunktion liegt dabei in Allgemeinen unter 5 %.