

DIN EN ISO 19017

ICS 17.240; 27.120.30

Einsprüche bis 2017-05-03

Entwurf

**Leitfaden für gammaspektrometrische Messungen von radioaktivem Abfall
(ISO 19017:2015);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 19017:2017**

Guidance for gamma spectrometry measurement of radioactive waste (ISO 19017:2015);
German and English version prEN ISO 19017:2017

Lignes directrices pour le mesurage de déchets radioactifs par spectrométrie gamma
(ISO 19017:2015);
Version allemande et anglaise prEN ISO 19017:2017

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-03-03 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs
besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 112 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Die Internationale Norm ISO 19017:2015 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 85 „Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection“ der International Organization for Standardization (ISO) erarbeitet und vom Technischen Komitee CEN/TC 430 „Kernenergie, Kerntechnik und Strahlenschutz“, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird, übernommen.

Das zuständige deutsche Gremium ist der Arbeitsausschuss NA 062-07 FBR „Fachbereichsbeirat Kerntechnik und Strahlenschutz“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung der prEN ISO 19017 beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten Internationalen Normen wird im Folgenden auf die entsprechenden Deutschen Normen hingewiesen:

ISO 11929:2010	siehe DIN ISO 11929:2011-01
ISO/IEC 61508	siehe DIN EN 61508(VDE 0803)
ISO/IEC 17025	siehe DIN EN ISO/IEC 17025

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 61508(VDE 0803), *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme*

DIN EN ISO/IEC 17025, *Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien*

DIN ISO 11929:2011-01, *Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung — Grundlagen und Anwendungen (ISO 11929:2010)*

Leitfaden für gammaspektrometrische Messungen von radioaktivem Abfall (ISO 19017:2015)

Lignes directrices pour le mesurage de déchets radioactifs par spectrométrie gamma (ISO 19017:2015)

Guidance for gamma spectrometry measurement of radioactive waste (ISO 19017:2015)

ICS:

Deskriptoren

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	3
Vorwort	4
1 Anwendungsbereich	6
2 Begriffe	6
3 Anwendung	13
3.1 Allgemeines	13
3.2 Typische Anwendungen	13
4 Messgeräte	14
4.1 Allgemeines	14
4.2 Offene Detektorgeometrie	15
4.3 Kollimierte Detektorgeometrie	16
4.4 Bestandteile von Gammamesssystemen	20
4.4.1 Mechanische Geräte	20
4.4.2 Strahlungsmessgerät	21
4.4.3 Datenerfassungs- und Analyseeinheit	21
4.4.4 Elektrische Steuerung	21
4.4.5 Zusätzliche Anlageteile	21
5 Kalibrierung	22
5.1 Allgemeines	22
5.2 Kalibrierung von Peakenergie und Peakform des gammaspektrometrischen Systems	22
5.3 Effizienzkalibrierung des gammaspektrometrischen Systems	22
5.4 Techniken zur Schwächungskorrektur	25
6 Auswertung	26
6.1 Auswertungsschritte	26
6.2 Berechnung der Netto-Peakzählraten	26
6.3 Berechnung des Gammaaktivitätsinventars des Abfallgebundes	28
6.4 Berechnung der Messunsicherheit	28
6.5 Berechnung der Nachweisgrenze	30
7 Qualitätssicherung	31
7.1 Allgemeines	31
7.2 Aufzeichnung von Kalibrierungs-, Validierungs- und Abfallmessungen	32
7.3 Dokumentation und Verfahrensanweisungen	33
7.4 Qualitätssicherung	33
7.5 Fachkunde	34
Anhang A (informativ) Anwendungsbeispiele für die in dieser Internationalen Norm behandelten Techniken und Verfahren	35
Literaturhinweise	56

Europäisches Vorwort

Der Text von ISO 19017:2015 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 85 „Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und als prEN ISO 19017:2017 durch das Technische Komitee CEN/TC 430 „Kernenergie, Kerntechnik und Strahlenschutz“ übernommen, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 19017:2015 wurde vom CEN als prEN ISO 19017:2017 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung von Nationalen Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird normalerweise von ISO Technischen Komitees durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale Organisationen, staatlich und nicht-staatlich, in Liaison mit ISO, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) bei allen elektrotechnischen Themen zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Im Besonderen sollten die für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten notwendigen Annahmekriterien beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der empfangenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname wird als Information zum Nutzen der Anwender angegeben und stellt keine Anerkennung dar.

Eine Erläuterung der Bedeutung ISO-spezifischer Benennungen und Ausdrücke, die sich auf Konformitätsbewertung beziehen, sowie Informationen über die Beachtung der Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) zu technischen Handelshemmnissen (TBT, en: Technical Barriers to Trade) durch ISO enthält der folgende Link: Foreword - Supplementary information.

Das für dieses Dokument verantwortliche Komitee ist ISO/TC 85, „Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection“, Unterkomitee SC 5, „Nuclear fuel cycle“.

Die erste Ausgabe von ISO 19017 ersetzt ISO 14850-1:2006, in welcher insbesondere Segmentmessungen mit Kollimatoren, der mögliche Einsatz von numerischer Simulation für Kalibrierung und Unsicherheitsbewertung sowie Gammastrahlungsdetektoren mit anderen Halbleitern als hochreinem Germanium nicht berücksichtigt wurden.

Einleitung

In der kerntechnischen Industrie kommt routinemäßig eine Vielzahl von Techniken für die zerstörungsfreie Analyse zum Einsatz, mit denen das Radionuklidinventar in Gebinden mit radioaktivem Material gemessen oder Informationen zu dessen anderweitiger Quantifizierung gewonnen werden. Diese Internationale Norm behandelt speziell gammaspektrometrische Messungen an radioaktiven Abfallgebinden.

Die in dieser Internationalen Norm behandelten Verfahren und Techniken kommen bei der routinemäßigen Analyse verschiedener Arten von radioaktivem Abfall zum Einsatz, welcher auf unterschiedliche Weise und unter Verwendung unterschiedlicher Behältergrößen und -typen verpackt ist. Behandelt werden grundlegende, seit vielen Jahren eingesetzte Techniken ebenso wie neue Techniken, die wegen der zunehmenden Anzahl an zu prüfenden Produkten und Formen entwickelt wurden, und um den immer anspruchsvolleren Anforderungskriterien gerecht zu werden.

Wo ein Leitfaden gegeben wird, wird dieser als beste gegenwärtige Praxis angesehen und beruht auf Erfahrung mit dem Einsatz von Messsystemen für die quantitative Gammaspektrometrie für eine große Bandbreite von Anwendungen mit dem Zweck, Radionuklide zu bestimmen und Informationen zu deren Aktivität bereitzustellen.

Es ist das Ziel dieser Internationalen Norm, eine einheitliche Vorgehensweise für gammaspektrometrische Messungen an radioaktiven Abfallgebinden zu etablieren.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm ist für Gammastrahlungsmessungen an radioaktivem Abfall anwendbar.

Radioaktive Abfallprodukte können in unterschiedlicher Form vorliegen und eine große Bandbreite an Merkmalen aufweisen. Dazu zählen:

- Rohabfälle oder nicht konditionierte Abfälle, darunter Abfälle bei der Produktion (Filter, Harze, Steuerstäbe, Altstoffe usw.) sowie Abfälle, die im Zuge von Stilllegung und Rückbau anfallen;
- konditionierte Abfälle in unterschiedlichen Formen und Matrizen (Bitumen, Zement, hydraulisches Bindemittel usw.);
- sehr schwachradioaktive Abfälle (en: very low-level waste, VLLW), schwachradioaktive Abfälle (en: low-level waste, LLW), mittelfachradioaktive Abfälle (en: intermediate-level waste, ILW) und hochradioaktive Abfälle (en: high-level radioactive waste, HLW);
- unterschiedliche Gebindeformen: zylindrisch, würfelförmig, quaderförmig usw.

Es wird ein Leitfaden hinsichtlich Umsetzung, Kalibrierung und Qualitätssicherung gegeben. Aufgrund der Vielfalt an Anwendungen und Systemausführungen (von Forschungs- bis Industriesystemen, von sehr schwachradioaktiven bis hochradioaktiven Abfällen, von Klein- bis Großgebinden mit unterschiedlichen Formen, Anforderungen an die Durchführung und zulässigen Messzeiten) ist es unmöglich, für jeden Anwendungsfall einen spezifischen Leitfaden zu geben; das Ziel dieser Internationalen Norm ist deshalb die Festlegung einer Reihe grundlegender Leitprinzipien. Die Umsetzung dieser Leitprinzipien hat durch entsprechend geschultes und erfahrenes Personal zu erfolgen, und es muss ihr ein umfassendes Verständnis zu den Einflussgrößen, Einflussvariablen und Anforderungen an die Durchführung der jeweiligen Messanwendung zugrunde liegen.

Diese Internationale Norm setzt voraus, dass der Bedarf für die Einführung eines solchen Systems hinreichend abgewogen wurde und dass die Anforderungen an die Anwendung und die Durchführung im Rahmen eines strukturierten Prozesses zur Anforderungserfassung, z. B. durch die Bestimmung von Datenqualitätszielen (DQO), adäquat definiert wurden.

Obwohl nicht in den Anwendungsbereich dieser Internationalen Norm fallend, sei angemerkt, dass viele der hier behandelten Prinzipien, Messverfahren und empfohlenen Praktiken gleichermaßen für Gammastrahlungsmessungen an Gegenständen anwendbar sind, die keinen radioaktiven Abfall darstellen (z. B. lose Nahrungsmittel, Wasser, freistehende Stapel von Materialien), oder für Messungen an radioaktiven Substanzen in nicht-konventionellen Gebinden (z. B. in Transportbehältern).

2 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ANMERKUNG Die hier enthaltenen Definitionen beschränken sich in der Mehrzahl auf Begriffe, die nicht in den einschlägigen Glossaren zu nuklearem Material enthalten sind oder die in diesem Dokument eine spezifische Verwendung finden. Zur Verbesserung der Anwenderfreundlichkeit werden Schlüsselbegriffe hier wiederholt.

2.1 Analyse
Verfahren zur quantitativen Ermittlung der Menge eines oder mehrerer der zu betrachtenden Radionuklide in einem Gebinde

2.2

Schwächung

physikalischer Vorgang beruhend auf der Interaktion einer Strahlungsquelle mit einer sich im Strahlengang befindlichen Materie, in deren Folge sich die Strahlungsintensität verringert

Anmerkung 1 zum Begriff: Die durch *zerstörungsfreie Analyse* (NDA) (2.27) ermittelte radioaktive Schwächung in Abfallgebinden beinhaltet sowohl die *Selbstschwächung* (2.37) durch das radioaktive Material selbst als auch Schwächungseffekte in der *Abfallmatrix* (2.23) sowie durch innere Barrieren und äußere Behälter.

2.3

Korrekturfaktor für die Schwächung

Faktor zur Korrektur (zum Ausgleich) des Schwächungseffektes bei einer NDA-Messung, der dem Verhältnis zwischen dem nicht geschwächten und dem geschwächten Strahlungsfluss entspricht

Anmerkung 1 zum Begriff: Nach erfolgter Korrektur der Schwächung gilt die gemessene Größe als repräsentativ für die nicht geschwächte Aktivität der analysierten radioaktiven Substanz.

2.4

Bias

Schätzwert eines systematischen Messfehlers

2.5

Kalibrierstandard

Primärstandard

Standard, der die höchsten metrologischen Forderungen erfüllt oder weitgehend als solches anerkannt ist und dessen Wert ohne Bezugnahme auf andere Standards der gleichen Messgröße anerkannt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Kalibrierstandard sollte physikalisch, radiologisch und chemisch den zu prüfenden Gegenständen ähnlich sein, für die die Aktivität aller zu betrachtenden Radionuklide sowie alle relevanten Eigenschaften, die das Messverfahren beeinflussen, mit ausreichender Genauigkeit bekannt sind.

[QUELLE: www.french-metrology.com]

2.6

Kalibrierung

BedingungenArbeitsgänge, durch die unter bestimmten Bedingungen die Beziehung zwischen den durch ein Messgerät oder ein Messsystem angezeigten oder den sich aus einer Materialmessung oder Referenzmaterial ergebenden Werten und den entsprechenden bekannten Werten eines Referenzstandards bestimmt wirdAnmerkung 1 zum Begriff: Das Ergebnis einer Kalibrierung erlaubt entweder die Zuordnung der Werte der Messgröße zur Anzeige oder die Ermittlung von Korrekturen für die Anzeige.

Anmerkung 2 zum Begriff: Durch eine Kalibrierung können auch andere metrologische Merkmale wie die Wirkung von Einflussgrößen ermittelt werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Das Ergebnis einer Kalibrierung kann in einem Dokument festgehalten werden, das auch Kalibrierschein oder Kalibrierbericht genannt wird.

[QUELLE: www.french-metrology.com]

2.7

Kollimierung

Verfahren zur Begrenzung des Sichtfeldes eines Detektors auf bestimmte Bereiche eines zu messenden Gegenstandes

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Abschirmung entlang der Kanten des Detektors, welche weiterhin die Sicht auf den gesamten Gegenstand zulässt, ist aus technischer Sicht kein Kollimator.. Eine derartige Abschirmung hat keinen Einfluss auf die Nachweiswahrscheinlichkeit des Detektors.

2.8

Kollimator

Vorrichtung zur Kollimierung des Strahlenbündels, die in der Regel aus einem oder mehreren hochabschwächenden Werkstoffen, wie z. B. Wolfram oder Blei, besteht. Kollimatoren können parallele oder divergente Strahlenbündel erzeugen

2.9

kollimierte (Detektor-)Geometrie

Messanordnung, bei der nur ein Teil des Abfallgebundes ein Ansprechen des Detektionssystems auslösen kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Gesamtaktivität wird durch Abrastern des ganzen Gebundes ermittelt, oder durch die Annahme, dass der Teil des Gebundes, der sich während mindestens einer Messung im Sichtfeld des Detektors befindet, repräsentativ für das ganze Gebinde ist.

2.10

Compton-Kontinuum

kontinuierliches Impulshöhenspektrum aufgrund von Compton-Elektronen, die in einem Detektor freigesetzt wurden

Anmerkung 1 zum Begriff: Photopeaks (oder Full-Energy-Peaks) werden auf das Kontinuum aufgesetzt und ihre „Nettoflächen“ werden durch Subtraktion des mittleren Compton-Kontinuum-Werts, von dem angenommen wird, dass er unter jedem einzelnen Peak liegt, z. B. nach ISO 11929 bestimmt.

[QUELLE: IEC 60050-395:2014]

2.11

Behälter

Gefäß, in dem das *Abfallprodukt* (2.41) zum Zwecke der Handhabung, des Transports, der Lagerung und/oder der Entsorgung verpackt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Er ist auch die äußere Barriere, die den Abfall vor Eindringungen von Außen schützt.

[QUELLE: IAEA Radioactive Waste Management Glossary, Ausgabe 2003]

2.12

Abdeckungsfaktor

abdeckender Faktor

obwohl bei vielen Messergebnissen die kombinierte Standardabweichung zum Ausdrücken der Messunsicherheit verwendet wird, wird bei einigen gewerblichen, industriellen und rechtlichen Anwendungen (z. B. insoweit Arbeits- und Gesundheitsschutz betroffen sind) häufig ein Maß für die Messunsicherheit gefordert, das ein Vertrauensintervall um ein Messergebnis herum definiert, innerhalb dessen der Wert der Messgröße sicher als richtig angesehen werden kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Maß der Messunsicherheit, das diesen Anforderungen gerecht wird, wird erweiterte Messunsicherheit genannt und durch Multiplikation der Standardabweichung mit dem Abdeckungsfaktor, vorgeschlagenes Symbol k , berechnet. Im Allgemeinen wird der Abdeckungsfaktor k entsprechend dem gewünschten Vertrauensintervall gewählt, in dem der wahre Wert liegen soll.

[QUELLE: <http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/coverage.html>]

2.13

Verfahren zur Bestimmung der Datenqualitätsziele

DQO-Verfahren

(en: data quality objectives process)

siebenstufiger Anforderungserfassungsprozess zur Bestimmung von Typ, Menge und Qualität der Daten, die als Entscheidungsgrundlage benötigt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Zweck dieses Verfahrens, das von der US-Umweltschutzbehörde Environmental Protection Agency veröffentlicht wurde, besteht darin, Organisationen allgemeine Leitlinien für die Ausarbeitung von Qualitätskriterien für Daten sowie Leistungsspezifikationen als Entscheidungsgrundlage an die Hand zu geben.

2.14

Totzeit

nichtaktive Zeitspanne eines Detektionssystems während der Messzeit

Anmerkung 1 zum Begriff: Zeitspanne unmittelbar nach einem Detektionsereignis verbunden mit der Verarbeitung des Signals, während der das System keine anderen Gammaereignisse verarbeiten kann. Es handelt sich um einen Leistungsparameter des Systems, der in der Regel als Prozentwert der Messzeit angegeben wird. Aufgrund der Totzeit ist die Anzahl der gemessenen Impulse geringer als die der tatsächlich aufgetretenen Impulse, weshalb die Zahl korrigiert werden muss.

2.15

Erkennungsgrenze

DT

(en: decision threshold)

Wert des Schätzers einer Messgröße, dessen Überschreiten durch ein ermitteltes Messergebnis für diese Messgröße, die einen physikalischen Effekt quantifiziert, anzeigt, dass der physikalische Effekt vorliegt

Anmerkung 1 zum Begriff: Für den Fall, dass das Messergebnis y größer ist als die Erkennungsgrenze y^* , ist die Erkennungsgrenze so festgelegt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass der wahre Wert der Messgröße Null ist, kleiner oder gleich einem vorgegebenen Wert α ist.

Anmerkung 2 zum Begriff: Wenn das Messergebnis y kleiner als die Erkennungsgrenze y^* ist, kann das Ergebnis nicht dem physikalischen Effekt zugeordnet werden. Trotzdem kann daraus nicht geschlossen werden, dass der physikalische Effekt nicht vorliegt.

[QUELLE: ISO 11929:2010, 3.6]

2.16

Detektorgeometrie

Beschreibung aus der sich der Grad der Detektorkollimierung in Bezug auf den zu messenden Gegenstand ergibt

Anmerkung 1 zum Begriff: In diesem Leitfaden wird zwischen zwei prinzipiellen Messanordnungen unterschieden: kollimierte Geometrie und offene Geometrie.

2.17

Nachweisgrenze

DL

(en: detection limit)

kleinster wahrer Wert der Messgröße, der mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit durch das Messverfahren erkannt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Mit der obigen Definition der Erkennungsgrenze ist die Nachweisgrenze der kleinste wahre Wert der Messgröße, für den die Wahrscheinlichkeit für die falsche Entscheidung, dass der wahre Wert der Messgröße Null ist, gleich einem vorgegebenen Wert β ist, wenn der wahre Wert in Wirklichkeit nicht Null ist.

[QUELLE: ISO 11929:2010, 3.7]

2.18

Emissions-Computertomographie

ECT

(en: emission computed tomography)

zerstörungsfreies Analyseverfahren, das die Bestimmung der Verteilung der Nuklidaktivität in Teilbereichen des Abfallgebundes ermöglicht

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Technik basiert auf Messspektren von Segmenten der Abfallmatrix, die von einem Detektor durch einen Kollimator erfasst wurden. Um genaue Ergebnisse zu erzielen, wird Kenntnis der Matrixdichteverteilung innerhalb des Teilbereichs (oder in 3D) benötigt, in der Regel erzielt durch eine *Transmissions-Computertomographie* (TCT) (2.38).

Anmerkung 2 zum Begriff: ECT wird auch als *tomographisches Gamma-Scanning* (TGS) bezeichnet (2.39).

2.19

Full-Energy-Peak

Peak des Gammaspektrums, der der Deponierung der gesamten Energie eines Photons entspricht, das von einem Radionuklid emittiert wurde

Anmerkung 1 zum Begriff: Es kommt nicht zu Energieverlusten durch die Interaktion von Photonen im Abfallgebinde oder durch die Freisetzung von sekundären Photonen vom Detektor infolge der Interaktion(en) mit dem primären Photon, die zu seinem Nachweis führt/führen.

2.20

Halbwertsbreite

FWHM

(en: full width at half maximum)

Breite eines Gammastrahlenpeaks bei halber Höhe des Scheitelwerts der Peakverteilung

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser Parameter dient der Beschreibung der energetischen Auflösung. Die Halbwertsbreite wird oft herangezogen, um die Leistung eines Detektors zu bestimmen (z. B. Halbwertsbreite für eine bestimmte Energie, z. B. 662 keV). Die Halbwertsbreite kann in Energieeinheiten (z. B. keV) oder, wenn auf die Energie der Gammastrahlen normiert, in % angegeben werden.

2.21

intrinsische Detektoreffizienz

intrinsische Nachweiswahrscheinlichkeit

Anzahl an Zählungen im *Full-Energy-Peak* (2.19) bei einer bestimmten Energie E (Nettofläche nach Subtraktion des Compton-Kontinuums und anderer Untergrundstrahler im Gammaspektrum) dividiert durch die Anzahl an Photonen, die bei dieser Energie in den Detektor eintreten

2.22

Live time

Differenz zwischen Messzeit und Totzeit

2.23

Matrix

Abfallmatrix

Bestandteil an nichtradioaktivem Material im *Abfallgebinde* (2.29), in dem die radioaktiven Substanzen verteilt sind

2.24

Messgröße

zu messende physikalische Größe

[QUELLE: ISO 11929:2010, 3.2]

2.25

Messgenauigkeit

Übereinstimmungsgenauigkeit zwischen einem gemessenen Messwert und einem wahren Messwert der Messgröße

2.26

Messzeit

Zeitspanne, während der eine Messung erfolgt

2.27

zerstörungsfreie Analyse

NDA

(en: non-destructive assay)

Verfahren, das auf der Beobachtung von spontan auftretender oder stimulierter radioaktiver Strahlung basiert, für die ohne Einflussnahme auf die physikalische oder chemische Form des Materials der Anteil von einem oder mehreren in dem zu prüfenden Gegenstand enthaltenen Radionukliden bestimmt wird

2.28

offene (Detektor-)Geometrie

Messanordnung, bei der alle Teile eines *Abfallgebindes* (2.29) ein Ansprechen des Detektionssystems auslösen können

2.29

Gebinde

Abfallgebinde

Produkt der Konditionierung bestehend aus dem *Abfallprodukt* (2.41), Behälter/n und inneren Barrieren

[QUELLE: ISO 12749-3:2015, 3.5.2]

2.30

Präzision

statistische Präzision

Oberbegriff, der die Verteilung von Messwerten bei Messungen unter reproduzierbaren Messbedingungen beschreibt

2.31

radioaktiver Abfall

Stoffe, für die keine weitere Verwendung vorgesehen ist und die Radionuklide beinhalten oder damit kontaminiert sind

[QUELLE: ISO 12749-3:2015, 3.7.1]

2.32

Radioaktivität

spontaner, zufälliger Zerfall von Atomen, der in der Regel mit der Freisetzung von Strahlung einhergeht

[QUELLE: IAEA Radioactive Waste Management Glossary, Ausgabe 2003]

2.33

Radionuklid

Kern (eines Atoms) mit der Eigenschaft des Spontanzerfalls (*Radioaktivität* [2.32])

Anmerkung 1 zum Begriff: Nuklide unterscheiden sich nach ihrer Masse und Kernladungszahl.

[QUELLE: IAEA Radioactive Waste Management Glossary, Ausgabe 2003]

2.34

Rasterungsprofil

Abtastprofil

Verteilung von aufgezeichneten Messsignalen des Systems in Abhängigkeit von aufeinanderfolgenden Rasterpositionen

2.35

(Gamma-)Teilspektrum

Gamma-Emissionsspektrum, das von nur einem Teil des *Abfallgebindes* (2.29) stammt

2.36 segmentiertes Gamma-Scanning SGS (en: segmented gamma scanning)

Verfahren zur Messung von mindesten einem *Teilspektrum* (2.35) eines Abfallgebindes

Anmerkung 1 zum Begriff: Für das segmentierte Gamma-Scanning wird eine *kollimierte Detektorgeometrie* (2.9) benötigt. Es gibt verschiedene, derzeit gängige SGS-Messanordnungen. In dieser Internationalen Norm wird unterschieden zwischen vertikalem, horizontalem und Winkelscanning, siehe Bild 3. Jede dieser Varianten kann kombiniert oder separat angewendet werden (in der Praxis erfolgt SGS in der Regel als Kombination aus vertikalem Scanning und kontinuierlicher Rotation).

- **Vertikales Scanning** [siehe Bild 3 a)] ist die Erfassung vertikal segmentierter Gammasppektren, die repräsentativ für gestapelte Scheiben des Gebindes sind. Die mechanische Bewegung kann sowohl schrittweise mit einer Erfassung pro Scheibe erfolgen als auch kontinuierlich mit zeitsegmentierter Erfassung (die Mechanik ist einfacher und die Messzeiten sind kürzer, die Auswertung der Daten jedoch komplexer). Vertikales Scanning wird in der Regel in Verbindung mit kontinuierlicher Rotation angewendet.
- **Horizontales Scanning** [siehe Bild 3 b)] wird in der Regel in Verbindung mit Winkel- und vertikalem Scanning bei TGS eingesetzt sowie, in Verbindung mit vertikalem Scanning, an Prüfobjekten ohne Drehsymmetrie.
- **Winkelscanning** [siehe Bild 3 c)] wird in der Regel nicht alleine, sondern als Teil von TGS-Systemen eingesetzt. Die technische Umsetzung kann mit einem Detektor oder, zur Verkürzung der Erfassungszeiten, mit mehreren Detektoren (wie dargestellt) sowie mit schrittweiser Rotation oder kontinuierlicher Rotation mit zeitsegmentierter Erfassung erfolgen.

2.37 Selbstschwächung Selbstabsorption

Schwächung der Gammastrahlung im radioaktiven Material selbst (wie bei Pu oder U)

Anmerkung 1 zum Begriff: Es wird hier eine Abgrenzung vorgenommen zwischen diesem Effekt und der Schwächung der Gammastrahlung in nicht radioaktivem Material, wie z. B. der Abfallmatrix, inneren Abschirmungen, Behältern, äußeren Abschirmungen, Kollimatoren usw.

2.38 Transmissions-Computertomographie TCT

(en: transmission computed tomography)

Transmissionstechnik für Gamma- oder Röntgenstrahlen zur Bestimmung der Matrixdichteverteilung in Teilen des Abfallgebindes mithilfe von Winkel- oder horizontalem Scanning bei ECT und als 3D mit ergänzendem vertikalem Scanning

Anmerkung 1 zum Begriff: 3D-Densitometrie ermöglicht eine genauere Korrektur der Schwächung von Gammastrahlung in nichthomogenen Matrizen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Sowohl bei ECT als auch TCT können 2D-Teile des Gebindes mithilfe von Winkel- und horizontalem Scanning rekonstruiert werden. Vollständige 3D-Daten können durch vertikale Überlagerung der Scheiben oder durch kontinuierliches Schrägspurscanning erzielt werden.

2.39 tomographisches Gamma-Scanning TGS

(en: tomographic gamma scanning)

üblicherweise eine Kombination von Emissions-Computertomographie (ECT) und Transmissions-Computertomographie (TCT)

2.40

Gesamtdetektoreffizienz

Gesamtnachweiswahrscheinlichkeit

Anzahl der Zählungen im Full-Energy-Peak (Nettofläche) pro emittiertem Photon der Energie E aus dem Abfallgebinde

2.41

Abfallform

physikalische und chemische Form nach Behandlung oder Konditionierung vor dem Verpacken und Bestandteil des *Abfallgebundes* (2.29)

[QUELLE: ISO 12749-3:2015, 3.7.6]

3 Anwendung

3.1 Allgemeines

Die Messung von Gammastrahlung ist ein zerstörungsfreies Verfahren zur Ermittlung des Inventars an gammastrahlenden Radionukliden in einem Abfallgebinde.

Gammastrahlungsmessungen können mit relativ einfachen Techniken (wie die offene Detektorgeometrie, siehe 4.2) und Messverfahren erfolgen, wenn Abfälle und Abfallmatrix gut bekannt sind oder davon ausgegangen werden kann, dass Strahlungsquellen und Matrix gleichmäßig durchmischt sind (sodass mit einer einfachen Messung ein repräsentatives Ergebnis erzielt werden kann).

Es können aber auch wenig bis keine Informationen über Strahlungsquellen, Verteilung der Aktivität, Zusammensetzung oder Homogenität der Matrix vorliegen; in diesen Fällen ist oft der Einsatz komplexerer Techniken (wie z. B. Messungen mit kollimierter Geometrie, siehe 4.3) erforderlich.

Je nach Intensität der Gammastrahlung können Abschirmungen und/oder kollimierte Geometrien auch deshalb notwendig sein, um sicherzustellen, dass die Zählraten von Detektor und Erfassungssystem innerhalb zulässiger Betriebsgrenzen verbleiben.

3.2 Typische Anwendungen

Das derzeitige Anwendungsspektrum für Systeme zur Gammastrahlungsmessung an radioaktiven Abfallgebünden ist breit gefächert und umfasst die folgenden Bereiche:

- Bestimmung des Inventars im Vorfeld der Behandlung, Lagerung oder des Transports von Abfällen;
- Verifizierung des Inventars im Vorfeld der Behandlung, Lagerung oder des Transports von Abfällen;
- Abfallprüfung während der Zwischen- oder Endlagerung;
- Qualitätsprüfung von Verfahren zur Abfallkonditionierung;
- Freigabemessungen.

ANMERKUNG Die Gammaspektroskopie findet vielfach Anwendung in Bereichen, die nicht im Anwendungsbereich dieser Internationalen Norm liegen, darunter verfahrenstechnische Überwachung, Bewertung von Radioaktivität in Umweltmedien (Boden, Vegetation, Wasser usw.), Charakterisierung von Schutt bei Aufräumarbeiten nach Störfällen, Messungen an Schüttgut usw. Die hier genannten Leitprinzipien und “good practices” können vielfach auch auf diese Bereiche übertragen werden.

Damit Radionuklide mit diesem Verfahren nachgewiesen werden können, muss die Intensität der von ihnen emittierten Gammastrahlung und deren Energie so hoch sein, dass sie die umgebenden Materialien und die Umhausung durchdringen.

Der geeignete Energiebereich hängt von einer Reihe von Faktoren ab, darunter die Zusammensetzung und Verteilung der Matrix; die Position der Strahler und/oder die Verteilung der Strahlungsquellen im Gebinde sowie Art und Abmessungen des Behälters. Für die meisten Anwendungen liegt der für die Analyse von Abfallgebinden zu betrachtende Energiebereich der Gammastrahlung zwischen einigen zehn keV und 3 MeV. Der Bereich der Gammastrahlungsenergie, die in anderen Anwendungen und unter anderen Bedingungen erfolgreich nachgewiesen werden kann, kann kleiner sein.

4 Messgeräte

4.1 Allgemeines

Derzeit werden eine Reihe unterschiedlicher Systeme zur Messung von Gammastrahlung an Gebinden mit radioaktivem Abfall eingesetzt. Diese Internationale Norm verfolgt nicht das Ziel, den Aufbau der einzelnen Systeme im Detail zu behandeln. Vielmehr geht es um die Behandlung allgemeiner Gesichtspunkte, die für die Umsetzung in spezifischen Messanordnungen sowie für die Leistungsbeurteilung relevant sind. Einige Beispiele für derzeit in Assay-Anwendungen eingesetzte Messsysteme werden in Anhang A genannt. Die Angaben in Anhang A dienen lediglich zu Informationszwecken und sollten weder als verbindlich noch als vollständig betrachtet werden.

Wo Messungen an Gebinden mit radioaktivem Abfall erfolgen, besteht das Ziel der Messung im Allgemeinen darin, die Aktivität der zu betrachtenden, im Gebinde enthaltenen Radionuklide im Kontext der Anwendung zu bestimmen. Die benötigten Informationen können von Anwendung zu Anwendung variieren. So z. B. kann die Information, die für die Überwachung der Kritikalitätssicherheit ausschließlich am Standort der Herkunft benötigt wird, eine Untermenge des Gesamtradionuklidinventars im Gebinde sein, welche nur thermisch spaltbare Isotope umfasst (z. B. ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu); ein vollständigeres Radionuklidinventar kann für den Transport im öffentlichen Raum erforderlich sein (z. B. eine Anzahl an Beta- und Alpha-Aktivitäten), wohingegen für die Endlagerung wiederum andere Informationen benötigt werden können (Gesamtinventar einschließlich z. B. der langlebigen Isotope). Ebenso können die Leistungsanforderungen des Systems von Anwendung zu Anwendung variieren. In jedem Fall müssen jedoch die Funktions- und Leistungsanforderungen an das System vor der Entwicklung des Systems festgelegt werden.

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Merkmale der Systeme beschrieben, die derzeit für die Messung von Gammastrahlung an Gebinden mit radioaktivem Abfall eingesetzt werden. Die derzeit gebräuchlichen Systeme reichen von einfachen Vorrichtungen (mit nur einem, unkollimierten, Detektor) bis hin zu hochkomplexen Messanordnungen (mit mehreren Detektoren, hochentwickelten Scanning-Techniken und modernen Zählanlagen).

Die meisten Systeme zur Messung von Gammastrahlung an Abfallgebinden mit Drehsymmetrie verfügen über einen Drehteller, auf dem das Gebinde während der Messung rotiert. An kastenförmigen Gebinden werden üblicherweise mehrere Messungen von unterschiedlichen Positionen und an verschiedenen Seiten vorgenommen. Diese Mehrfachmessungen und die Rotation dienen in erster Linie dazu, Schwankungen im Ansprechverhalten des Messsystems bei nichthomogenen Abfällen zu mitteln.

Die Messsysteme können grob nach der Detektorgeometrie und dem Messverfahren unterteilen werden in

- Anordnungen mit offener Detektorgeometrie und
- Anordnungen mit kollimierter Geometrie.

Gammaspektrometrische Systeme können mit nur einem Detektor, aber auch mit mehreren Detektoren betrieben werden, um die Durchsatzleistung des Systems zu erhöhen. Diese Internationale Norm bezieht

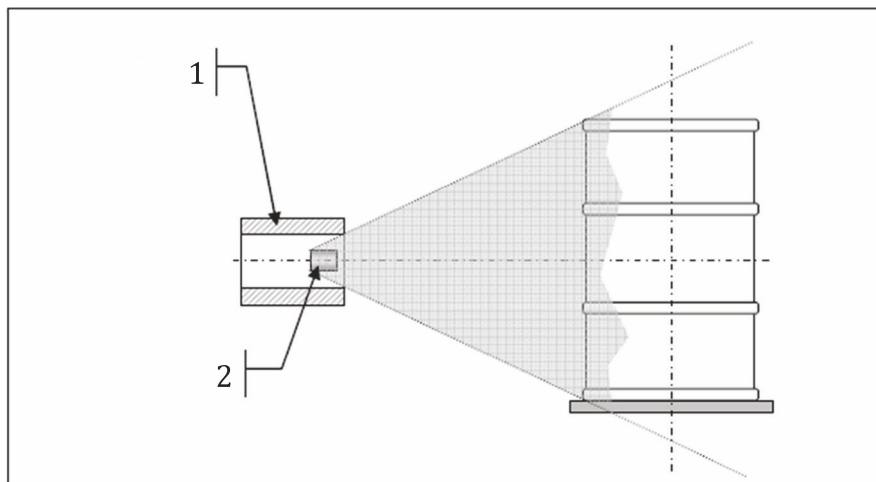
sich nur auf Systeme mit einem Detektor, da sich die Leistungsmerkmale der beiden Messanordnungen, abgesehen von den Effizienzvorteilen der mit mehreren Detektoren ausgestatteten Systeme, nicht prinzipiell unterscheiden.

4.2 Offene Detektorgeometrie

Die Grundanordnung für diese Art der Messung besteht aus einem oder mehreren Detektoren, der/die stationär relativ zum Abfallgebinde montiert ist/sind. Die Messanordnung mit offener Geometrie ist so eingerichtet, dass alle Teile des Gebindes ein Ansprechen des Detektors auslösen können (siehe Bild 1). Um die Messunsicherheit bei Gebinden mit ungleichmäßiger Radioaktivitätsverteilung zu reduzieren, können Gebinde während der Messung gedreht oder mehrere Messungen aus unterschiedlichen Richtungen durchgeführt und anschließend gemittelt werden. Die Entscheidung für eine Rotation des Gebindes oder eine Erfassung aus mehreren Perspektiven hängt von der Heterogenität des Abfalls (Substanzen und Aktivität) und deren Einfluss auf die Messunsicherheit ab. Welches Verfahren letztendlich gewählt wird, kann das Ergebnis von Abwägungen zwischen Messunsicherheitszielen und praktischen Einschränkungen sein (so z. B. sind Rotationsmessungen für zylindrische Gebinde üblich, während bei würfel- oder quaderförmigen Gebinden im Allgemeinen jede Fläche gemessen wird).

Systeme mit dieser Art der Messanordnung haben den Vorteil einer einfacheren Hardware und einer allgemein höheren Detektoreffizienz im Vergleich zu Systemen mit kollimierter Geometrie und einem Abtastsystem. Die Praxiserfahrung hat gezeigt, dass die Nachweisgrenzen bei Messsystemen mit offener Geometrie in der Regel bedeutend niedriger liegen; andererseits sind hier die Ergebnisse im Allgemeinen empfindlicher gegenüber der Aktivitätsverteilung sowie Dichteschwankungen der Abfallmatrix.

Ist bekannt, dass Abfallstoff und Aktivitätsverteilungen recht homogen sind, kann zur Korrektur der Matrixschwächung (Einflüsse der Dichte und der Messgut-Zusammensetzung) eine Gammatransmissions-technik eingesetzt werden. Der Teil des Abfalls, der vom Transmissionsstrahler abgesucht wird, muss so repräsentativ wie möglich für das Gesamtvolumen sein. Die Repräsentativität kann durch den Einsatz mehrerer externer Transmissionsstrahler weiter verbessert werden, die den oberen Bereich auf halber Höhe und den unteren Bereich des Gebindes absuchen; alternativ dazu kann ein kontinuierlicher vertikaler Scan implementiert werden (damit gehen jedoch komplexere Anforderungen an die Hardware und Software einher). Das Gebinde kann während der Transmissionsmessung gedreht werden; alternativ können mehrere Messungen aus unterschiedlichen Richtungen durchgeführt und anschließend gemittelt werden.



Legende

- 1 Abschirmung
- 2 Detektor

ANMERKUNG Eine Abschirmung entlang der Seiten und gelegentlich auch an der Rückseite des Detektors zur Reduktion des Untergrunds ist wünschenswert. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass das gesamte Abfallgebinde im Sichtfeld des Detektors bleibt.

Bild 1 — Offene Detektorgeometrie (Strahler für die Transmissionskorrektur nicht dargestellt)

Die offene Detektorgeometrie ist anwendbar, wenn Schwankungen der Aktivitätsverteilung im Gebinde und andere Merkmale des Abfalls (insbesondere die Dichteverteilung) nicht zu einer extrem hohen Messunsicherheit führen.¹⁾

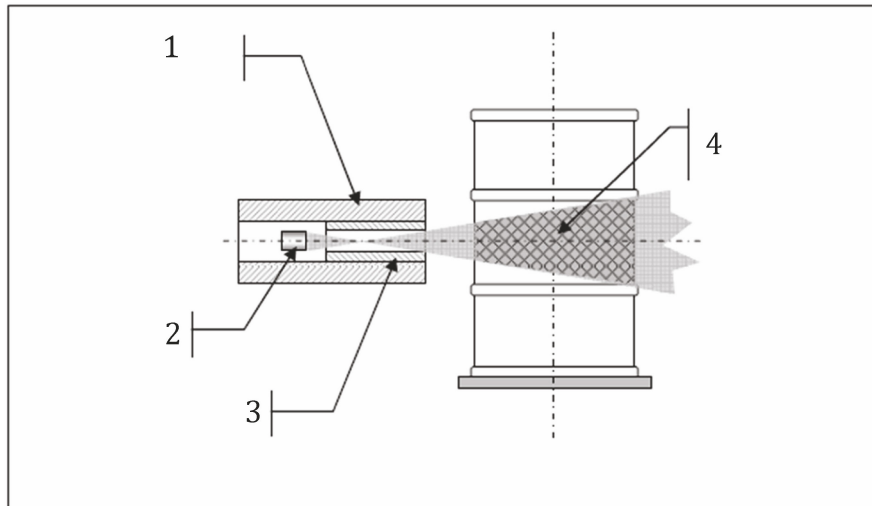
Bei heterogenen Abfällen kann die Messunsicherheit trotz Rotation des Gebindes, Mehrfachmessungen aus unterschiedlichen Richtungen und Gammatransmissionsmessung extrem ausgeprägt sein. Für diese Fälle kann die kollimierte Detektorgeometrie in Verbindung mit Techniken wie dem segmentierten Gamma-Scanning (SGS) oder dem tomographischen Gamma-Scanning (TGS), die im Folgenden beschrieben werden, besser geeignet sein.

ANMERKUNG Der Aspekt der Messunsicherheit wird in 6.4 behandelt.

4.3 Kollimierte Detektorgeometrie

Das Sichtfeld von Detektoren kann mittels Kollimierung auf spezifische Teile des Abfallgebindes eingegrenzt werden (siehe Bild 2). Damit werden Größe und Winkel des am Detektor einfallenden Strahlungsbündels beschränkt.

1) Die Rotation des Gebindes während der Messung ermöglicht eine Verringerung der durch radiale Heterogenität verursachten Messunsicherheit.



Legende

- 1 Abschirmung
- 2 Detektor
- 3 Kollimator
- 4 Messvolumen

Bild 2 — Kollimierte Detektorgeometrie

Diese Technik ist eine Kernkomponente des SGS²⁾, bei der das Sichtfeld des Detektors in der Weise eingeschränkt wird, dass das gewonnene Spektrum nur die Aktivität der in einem bestimmten Bereich (Segment) des Gebindes vorhandenen Substanzen abbildet, und nicht im ganzen Gebinde.

Da bei kollimierten Geometrien nur ein kleiner Ausschnitt des Gebindes betrachtet wird, werden sie fast immer in Kombination mit einer anderen Technik verwendet, um eine repräsentative Ansicht des gesamten Gebindes zu erhalten. Dazu gehören horizontales Scanning, vertikales Scanning, Winkelscanning oder kontinuierliche Rotation sowie mehrere stationäre Detektoren. Oft werden mehrere dieser Verfahren kombiniert.

Die Geometrie des Kollimators ist abhängig von der Art des verwendeten Scanningverfahrens und der erforderlichen Ortsauflösung.

Es gibt verschiedene, derzeit gebräuchliche SGS2-Messanordnungen:

- Vertikales Scanning [siehe Bild 3 a)] ist die Erfassung vertikal segmentierter Gammaspektren, die repräsentativ für gestapelte Scheiben des Gebindes sind. Die mechanische Bewegung kann sowohl schrittweise mit einer Erfassung pro Scheibe erfolgen als auch kontinuierlich mit zeitsegmentierter Erfassung (die Mechanik ist einfacher und die Messzeiten sind kürzer, die Auswertung der Daten jedoch komplexer). Vertikales Scanning wird am häufigsten in Kombination mit kontinuierlicher Rotation² verwendet und diese Kombination ist in der Regel auch mit Gammatransmissionsmessungen gekoppelt, mit denen (schwankende) Matrixschwächungen korrigiert werden.
- Horizontales Scanning [siehe Bild 3 b)], sei es kontinuierlich oder schrittweise, wird am häufigsten in Verbindung mit Rotation und vertikalem Scanning im Rahmen von TGS verwendet, ist aber auch für Prüfobjekte ohne Drehsymmetrie, wie z. B. kastenförmige Behälter, gebräuchlich;

2) In der Praxis beschreibt der Begriff „SGS“ in der Regel die einfache Kombination aus vertikalem Scanning und kontinuierlicher Rotation (im Unterschied zur schrittweisen Rotation beim Winkelscanning) des Gebindes. In dieser International Norm wird der Begriff in seiner allgemeinen Bedeutung verwendet.

- Winkelscanning [siehe Bild 3 c)] wird in der Regel nicht alleine, sondern als Teil von TGS-Systemen eingesetzt. Die technische Umsetzung kann mit einem Detektor oder, zur Verkürzung der Erfassungszeiten, mit mehreren Detektoren (wie dargestellt) sowie mit schrittweiser Rotation oder kontinuierlicher Rotation mit zeitsegmentierter Erfassung erfolgen.

Bei drehsymmetrischen Prüfobjekten kann die Unsicherheit infolge von Heterogenität durch kontinuierliche Rotation des Gebindes verringert werden. Ebenso können Mehrfachmessungen an unterschiedlichen Stellen des Gebindes die Unsicherheit reduzieren. Die Feststellung von Hotspots oder die Bestätigung der Homogenität ist durch Beobachtung der momentanen Zählrate während der Rotation oder an den einzelnen Messpunkten möglich.

Im Vergleich zur Messung an einem rotierenden Fass in offener Detektorgeometrie bietet SGS den wesentlichen Vorteil, dass es die Kombination der Emissionsdaten eines Segments mit denen der Transmissionsmessung des entsprechenden Segments ermöglicht, eine Korrektur um Unterschiede in den vertikalen Dichteschichten des Gegenstandes vorzunehmen. Dies ist dort besonders wichtig, wo das Radionuklid niederenergetische Gammastrahlung emittiert und wo Stoffe mit mittlerer bis hoher Kernladungszahl im Abfall vorhanden sind (z. B. Eisen, Blei oder Uran).

Je nach Abfallheterogenität und geforderter Messunsicherheit können die oben beschriebenen Scangeometrien kombiniert werden.

Wenn die Rotationssegmente 360° vollständig abdecken und sowohl seitliches als auch vertikales Scanning stattfindet und wenn Emission und Transmission für jedes kleine Segment separat bestimmt werden, ist eine gekoppelte 3D-Emissions-Transmissions-Computertomographie (ECT-TCT, auch TGS genannt) möglich. Damit wird die Messunsicherheit in Fällen reduziert, in denen es räumlich abgegrenzte Konzentrationen von Radioaktivität wie auch Schwächung gibt.

Die Tomographie bietet den Vorteil, die Messunsicherheit deutlich zu reduzieren, da Stellen mit inhomogener Radioaktivität und Matrix genauer bestimmt werden können und dadurch eine präzisere Effizienzkorrektur vorgenommen werden kann.

Diese Technik geht jedoch mit erhöhter Komplexität, höheren Kosten und längeren Messzeiten einher.

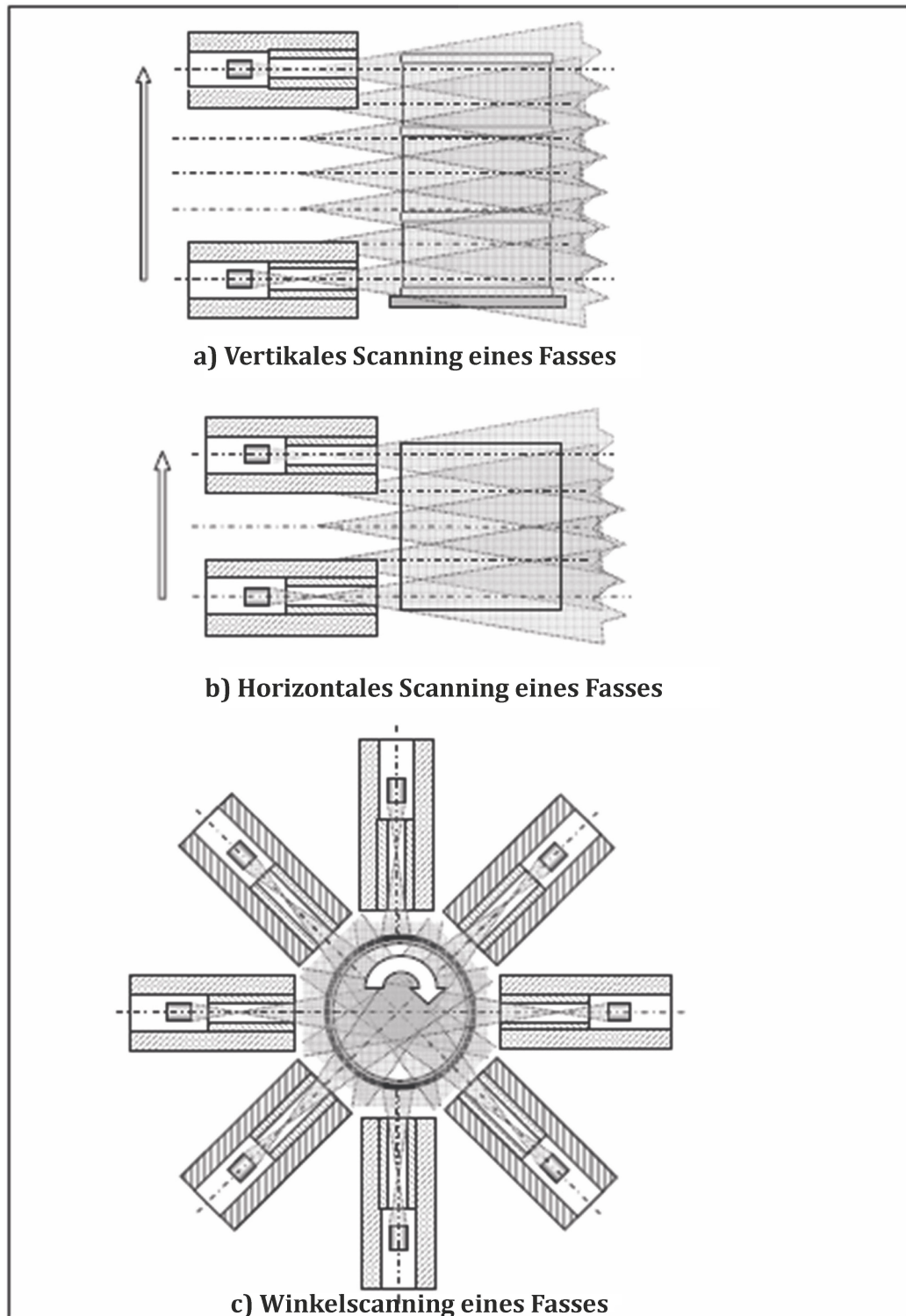


Bild 3 — Derzeit gängige Messanordnungen für segmentiertes Gamma-Scanning

ANMERKUNG 1 Die Bilder 1, 2, 3 a) und 3 c) zeigen typische Scanning-Konfigurationen für Abfallgebinde in zylindrischen Behältern (wie z. B. Fässern). Bei der Analyse von Abfallgebinden in quaderförmigen Umhüllungen wie jene in Bild 3 b) können sich die Anzahl der Detektoren und die Anordnungen unterscheiden. Der Einsatz eines Drehtellers kann durch Größe und Form des Behälters ausgeschlossen sein; stattdessen kann eine Messanordnung mit Detektoren verwendet werden, die jede Fläche erfassen (diese Art der Anordnung ist auf den Bildern oben nicht dargestellt).

ANMERKUNG 2 Das Scanning kann entweder nur mit Bewegungen des Abfallgebundes oder mit Bewegungen sowohl des Detektors als auch des Abfallgebundes erfolgen. So z. B. ist bei vielen SGS-Systemen das Fass in kontinuierlicher Rotation, während die Detektor-/Kollimator-Anordnung das Fass vertikal abtastet. In kompakten TGS-Systemen befindet sich das Fass im Allgemeinen in einer Translations- und Rotationsbewegung, während der Detektor das Gebinde vertikal abscannt. Darüber hinaus kann die Anordnung kollimierter Detektoren die Messzeiten verkürzen und unter Umständen auch ein mechanisches Bewegen des Gebindes unnötig machen (z. B. kann die vertikale Anordnung, mit dem das Gebinde in seiner gesamten Höhe erfasst wird, als Alternative zu einer mechanischen Vorrichtung zum Anheben und Absenken des Detektors dienen).

Spektren einzelner Segmente können kontinuierlich erfasst werden, während das Gebinde rotiert, oder an einzelnen, festgelegten Positionen. Die Aktivität in dem Gebinde als Ganzes wird durch Addition der Ergebnisse der Einzelsegmente rekonstruiert und nicht am Ergebnis einer Einzelmessung abgelesen. Auf diese Weise kann eine höhere Präzision erzielt werden, da jedes einzelne Spektrum nur als repräsentativ für das Volumen des Segments, aus dem es stammt, zu betrachten ist und nicht für das Volumen des gesamten Abfallgebundes.

Das SGS-Messverfahren kann mit einer segmentspezifischen Bestimmung des *Schwächungsfaktors* (d. h. Transmissionsmessung) kombiniert werden. Somit bietet SGS die Möglichkeit einer segmentspezifischen Schwächungskorrektur. In der Regel wird das Messverfahren dadurch weniger empfindlich gegenüber ungleichmäßiger Aktivitäts- und Dichteverteilung als die offene Detektorgeometrie.

Segmentspezifische Spektren können genutzt werden, um zu prüfen, ob sich das Abfallgebinde entsprechend zugrunde gelegter Annahmen verhält, wie z. B. zur Gleichmäßigkeit der Quell- und Matrixverteilung. Dies erleichtert die Festlegung und Auswertung von Kriterien für die Konformitätsprüfung, was besonders wichtig für Abfallprodukte ist, die keinem eindeutig definierten Verfahren entstammen.

Kollimierte SGS-Messungen eignen sich insbesondere für Abfallgebinde, bei denen die Matrixeffekte bekanntermaßen oder vermutlich heterogen sind und die mit einfacheren Techniken erreichbare Messunsicherheit unzulässig hoch ist.

Wenn von der Homogenität des Abfalls ausgegangen werden kann (z. B. im Fall von aufbereiteten Abfallprodukten) und segmentierte Techniken wenig Vorteile bringen, ist der Einsatz einer kollimierten Detektorgeometrie zur Beschränkung der vom Detektor erfassten Zählrate möglich, wo dies andernfalls zu einer Sättigung der Messwerterfassungselektronik führen würde (was möglicherweise übermäßige Totzeit zur Folge hätte).

4.4 Bestandteile von Gammamesssystemen

Im Anwendungsbereich dieser Internationalen Norm werden nur die Kernkomponenten von gamma-spektrometrischen Messsystemen behandelt. Typische Systeme bestehen aus den folgenden Komponenten:

- mechanische Vorrichtung für die Positionierung des Detektors und/oder Abfallgebundes sowie Geräte zum Beschicken des Behälters;
- Strahlungsmessgerät;
- Datenerfassungs- und Analyseeinheit;
- elektrische Steuerung;
- zusätzliche Geräte.

4.4.1 Mechanische Geräte

Die mechanischen Geräte setzen sich im Allgemeinen aus folgenden Komponenten zusammen:

- Halterungen für den Detektor und Kollimator;

- mechanische Vorrichtung zur Aufnahme des Abfallgebundes und zur Ausführung aller erforderlichen Bewegungen (kontinuierliche oder schrittweise Rotation, vertikales und horizontales Scanning);
- Vorrichtung zur manuellen oder automatisierten Handhabung des Abfallgebundes;
- mechanische Vorrichtung zur Positionierung des Detektors in Relation zum Abfallgebinde (oder umgekehrt).

4.4.2 Strahlungsmessgerät

Das Strahlungsmessgerät ist anwendungsspezifisch, umfasst jedoch im Allgemeinen die folgenden Komponenten:

- Gammadetektor: es sind Detektoren mit hoher, niedriger und mittlerer Auflösung erhältlich, z. B. Halbleiter aus hochreinem Germanium (en: high purity germanium, HPGe) und aus Cadmium-Zink-Tellurid (CdZnTe oder CZT) oder Szintillatoren mit Thallium-aktiviertem Natriumiodid NaI(Tl) oder Cer-aktiviertem Lanthanbromid LaBr₃(Ce);
- Kühleinrichtung (für hochauflösende HPGe-Detektoren);
- Kollimator/Abschirmungsvorrichtungen (nach Bedarf).

4.4.3 Datenerfassungs- und Analyseeinheit

Die Funktionen zur Verarbeitung der erfassten Daten sind anwendungsspezifisch, umfassen im Allgemeinen jedoch die folgenden Komponenten:

- Hochspannungsnetzteil;
- Photoelektronenvervielfacher (nur bei Szintillationsdetektoren);
- Vorverstärker (in der Regel direkt an den Detektor gekoppelt);
- gammaspektroskopische Messeinrichtung mit Signalverarbeitungs- und Digitalisierungselektronik, die in der Regel aus einem signalformenden Hauptverstärker, einem Analog-Digital-Umformer und einem Mehrkanalpuffer und -speicher besteht. Diese Komponenten sind heute üblicherweise in Einzelgeräten verbaut, es können jedoch auch unabhängige Module zusammengeschlossen werden;
- Hardware zur Betriebssteuerung des gammaspektroskopischen Messsystems;
- Software zur spektralen Auswertung;
- Benutzerschnittstelle.

4.4.4 Elektrische Steuerung

Zur elektrischen Steuerung gehören alle Komponenten, die für die Steuerung und Synchronisierung der mechanischen Einrichtungen mit der Mess- und Datenerfassungseinheit in Kombination mit dem Datenerfassungssystem benötigt werden. Daneben stellt die Steuerung den sicheren Betrieb des gesamten Systems sicher.

4.4.5 Zusätzliche Anlageteile

Zu den zusätzlichen Anlageteilen können folgende Komponenten gehören (Liste nicht vollständig):

- Wägetechnik (Waage) für das Abfallgebinde mit geeignetem Wägebereich;

- Dosisleistungsmessgerät(e);
- Einrichtungen zur Stromumwandlung.

5 Kalibrierung

5.1 Allgemeines

Das Ziel der Kalibrierung besteht darin, die Beziehung zwischen der Radionuklidaktivität eines oder mehrerer bekannter Strahler und dem für diese(n) Strahler gemessenen Wert, d. h. das Ansprechvermögen des Systems, zu ermitteln.

Die Kalibrierung ist ein wesentlicher Bestandteil des Messwesens und der Qualitätssicherheit. Das Kalibrierverfahren für Systeme zur Gammastrahlungsmessung umfasst im Allgemeinen die folgenden Schritte:

- Kalibrierung der Peakenergie sowie der Peakform;
- Kalibrierung der Effizienz;
- Kalibrierung von Zusatzgeräten.

Die Kalibrierung hängt von der Strahlungsquelle und dem geometrischen Zustand des zu prüfenden Abfallgebundes ab. Die Kalibrierstrahler sollten den Energiebereich der im Abfallgebunde erwarteten Gammastrahlung abdecken. Bei der Effizienzkalibrierung sollten die Messungsgeometrie sowie die Dichte und Zusammensetzung der Abfallstoffe (Matrix) miteinbezogen werden, ebenso wie die Verteilung von Radioisotopen im Abfall (homogen oder inhomogen). In vielen Abfallgebunden ist sowohl die Matrix- als auch die Radioaktivitätsverteilung heterogen. Dem kann entweder bei der Kalibrierung Rechnung getragen werden, z. B. durch Messung oder Berechnung der Effizienz in allen erwarteten Situationen, oder aber durch den Einsatz spezifischer Korrekturtechniken auf der Basis von segmentierten Gammatransmissions- und Nachweismessungen (siehe 5.3 und 5.4).

5.2 Kalibrierung von Peakenergie und Peakform des gammaspektrometrischen Systems

Hierzu gehören:

- Energiekalibrierung (Ermittlung der Beziehung zwischen den individuellen Gammaenergien und den Kanälen des Analysators), welche für Detektoren aus hochreinem Germanium (HPGe) im Allgemeinen linear, für anorganische Szintillatoren, wie z. B. NaI(Tl), bei niedrigen Energien jedoch nichtlinear verläuft;
- Kalibrierung der Peakform (einschließlich der energetischen Auflösung). Die energetische Auflösung bestimmt die Fähigkeit des Detektors, für ähnliche Energiebereiche im Gammaspektrum abgrenzbare Einzelpeaks erfassen zu können. Die energetische Auflösung ist im Wesentlichen abhängig vom gewählten Detektortyp: Die Auflösung ist mit HPGe-Detektoren hoch, mit NaI(Tl)-Detektoren schwächer und mit LaBr₃(Ce)-Detektoren mittel.

ANMERKUNG Die energetische Auflösung wird im Allgemeinen als Halbwertsbreite FWHM(E) in keV oder als relative Auflösung FWHM(E)/E in % bei einer spezifischen Energie E angegeben.

5.3 Effizienzkalibrierung des gammaspektrometrischen Systems

Das bevorzugte Verfahren für die Effizienzkalibrierung ist die Herstellung eines physikalisch, chemisch und radiologisch (nach Größe, Dichte, chemischer Zusammensetzung, Radionukliden) äquivalenten Ersatzpräparates der zu analysierenden radioaktiven Abfallprobe unter Verwendung bekannter (rückführbarer) Strahlungsquellen mit entsprechender Energie. Eine Verhältniskurve Energie zu Effizienz

wird erstellt und auf die zu messenden Proben angewendet. Die Anwendung dieses Verfahrens ist zwar äußerst wünschenswert, in der Praxis für Messungen an Abfallgebinden jedoch selten umsetzbar. Die Herstellung eines physikalischen radioaktiven Kalibrierstandards für Abfallgebinde ist kosten- und zeitaufwendig, erfordert die entsprechenden Lizenzen zum Umgang mit radioaktivem Material, geht mit einem gewissen Grad an radioaktiver Gefährdung einher und wirft Probleme hinsichtlich der Lagerung und Entsorgung des radioaktiven Materials auf.

Die folgenden Alternativen sind in Abfallanalysesystemen gebräuchlich.

- Befüllen eines physisch identischen Behälters mit radioaktivem, für den Inhalt des Abfallgebundes repräsentativem Material, Entnahme repräsentativer Proben mit reproduzierbarer Messung der Radioaktivität in diesen Proben; auf diese Weise erfolgt die Kalibrierung für diese Art des Abfalltyps. Ist die zu messende Abfallmatrix homogen und die Entnahme von Proben unproblematisch, kann dies ein sehr genaues und praktisches Kalibrierverfahren darstellen. Allerdings ist die Erweiterung der Kalibrierung auf andere Matrizen, Dichten oder Gammastrahlungsenergien nicht einfach.
- Herstellung eines Abfallgebinde-Dummies aus einem oder mehreren nichtradioaktiven Materialien, der die Schwächungsmerkmale der zu messenden Matrix repräsentiert, und ein kontrolliertes Einbringen vieler Punkt- und Linienstrahler in diese Matrix. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass nur physisch kleine, umschlossene Strahler benötigt werden, die in vielen verschiedenen Simulationen Verwendung finden können. Weit verbreitet ist der Einsatz von Linienstrahlern in Kästen oder rotierenden Fässern sowie die Herstellung komplexer Formen aus vielen kleinen Kästen mit je einem Punktstrahler. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt darin, dass sich hier, verglichen mit einem echten homogenen Strahler, die Effizienz geringer ist und dass geeignetes Matrixmaterial nicht immer verfügbar ist. Zur Herleitung eines Korrekturfaktors für die systematische Abweichung könnten numerische Simulationen verwendet werden.
- Bestimmung der intrinsischen Effizienz des Detektors mithilfe eines einzigen Punktstrahlers und anschließende Anwendung einer Reihe von mathematischen Korrekturfaktoren zur Effizienzberechnung für das Abfallgebinde. Dies ist das übliche Kalibrierverfahren für SGS. Für die anzuwendenden Korrekturfaktoren der unterschiedlichen geometrischen und physikalischen Parameter gehören: Schwächung durch die Behälterwand, Matrixkorrektur, Korrekturen aufgrund der Detektor-Behälter-Geometrie, Kollimatorkorrektur sowie Korrekturen aufgrund der Selbstabsorption im radioaktiven Material. Eine Darstellung dieses Verfahrens findet sich weiter unten.
- Erstellung realistischer mathematischer Simulationen des Abfallgebundes mithilfe mathematischer Modellierung und anschließende Berechnung der Emission aus dem Gebinde sowie der Vollenergie-Interaktionswahrscheinlichkeit mit dem Detektor. Im Vergleich zu den mit Strahlungsquellen hergestellten Simulationen können diese Simulationen schneller und günstiger ohne anfallende Kosten für Lagerung und Entsorgung erstellt werden. Wie für andere Verfahren gilt auch hier, dass die Qualität der Ergebnisse davon abhängt, wie gut die strahlenempfindlichen Elemente des Gebindes bekannt sind (Matrix, Dichte, Radionuklide, Quellverteilung usw.). Daneben muss die mathematische Beschreibung des Detektors (Detektorcharakterisierung) gut bekannt sein und wird am besten mit vergleichbaren Strahlenquellen verifiziert. Die Genauigkeit mathematischer Kalibrierungen, wenn sie korrekt und unter Anwendung bewährter Verfahren erfolgen, ist gegenüber den meisten anderen Kalibrierverfahren für große Volumina gleich hoch oder höher.

Das unten gezeigte Beispiel veranschaulicht das Verfahren mit einem einzelnen Punktstrahler zur Bestimmung der intrinsischen Effizienz des Detektors und anschließender Aufstellung rechnerischer Korrekturfaktoren in Bezug auf das Ansprechvermögen des Systems. Diese Korrekturfaktoren können auf Messungen an „echten“ Abfallgebinden zur Quantifizierung der Aktivität (A) eines bestimmten Radionuklids (i) angewendet werden, das Gammastrahlung der Energie (E) mit einer Emissionswahrscheinlichkeit (p) emittiert; nach Gleichung (1):

$$A_{i,E} = (N_{i,E} - B_{i,E}) \cdot K_i \frac{1}{\rho_{i,E}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_E} \cdot f_{i,E}(k_1, k_2, \dots) \quad (1)$$

Dabei ist

- $A_{i,E}$ die Aktivität (Bq) des Radionuklids i bei Energie E ;
- $N_{i,E}$ die Nettofläche des Full-Energy-Peaks des **im Spektrum des Abfallgebundes vorkommenden** Radionuklids i bei Energie E , (Anzahl von Zählungen pro Sekunde, ausgedrückt in s^{-1}); die Nettofläche ermittelt sich durch Subtraktion des Compton-Kontinuums unterhalb des Peaks (siehe 6.2);
- $B_{i,E}$ die Nettofläche des Full-Energy-Peaks des **im Spektrum des Untergrunds vorkommenden** Radionuklids i bei Energie E , (Anzahl von Zählungen pro Sekunde, ausgedrückt in s^{-1}); dies wird am besten an einem Gebinde mit gleichen Abmessungen und gleicher Masse, jedoch ohne die zu betrachtenden Analyte durchgeführt, da das Gebinde gegenüber einer leeren Messkammer den Untergrund reduzieren kann; die Nettofläche ermittelt sich durch Subtraktion des Compton-Kontinuums unterhalb des Peaks (siehe 6.2);
- ANMERKUNG Um zu verhindern, dass ein im Spektrum des Untergrunds vorkommender Peak die gleiche Energie wie das zu betrachtende Radionuklid im Gebinde aufweist, kann mit geeigneten Abschirmungen um das Gebinde herum das Sichtfeld des Gammadetektors auf das zu analysierende Gebinde eingeschränkt werden.
- $\rho_{i,E}$ die Wahrscheinlichkeit einer Photonenemission durch das Radionuklid i bei Energie E (der Quotient aus emittierten Photonen pro radioaktivem Zerfall), z. B. nach Literaturhinweis [13];
- ε_E die „intrinsische Nachweiswahrscheinlichkeit“ bei Energie E (Quotient der Zählungen in der Full-Energy-Peak-Nettofläche pro Photon mit der Energie E , das in den Detektor eintritt);
- K_i der Korrekturfaktor für den radioaktiven Zerfall während der Messung zum Nachweis des Radionuklids i ; er ist definiert als $A_0 = K_i \times \bar{A}$, dabei sind A_0 und $\bar{A}$ die Aktivität zu Beginn der Messung bzw. der Mittelwert während der Messung; K_i wird wie folgt angegeben:

$$K_i = \frac{\frac{t_{\text{Messung}}}{T_i} \times \ln 2}{1 - \exp(-\frac{t_{\text{Messung}}}{T_i} \times \ln 2)}$$

Dabei ist

- t_{Messung} die Messzeit und T_i die Halbwertszeit des Radionuklids i . Für die meisten praktischen Anwendungen ist K_i fast gleich 1, da die Messzeit im Vergleich zu T_i im Allgemeinen sehr kurz ist und vernachlässigt werden kann;
- $f_{i,E}(k_1, k_2, \dots)$ ist der Korrekturfaktor für Schwankungen der geometrischen und physikalischen Parameter k_n , z. B. ist/sind:
- k_1 die Werkstoffe und Abmessungen des Behälters;
- k_2 die relative Position von Detektor zu Behälter (Abstand, Winkel);
- k_3 Kollimierungseffekte;

- k_4 die Position der Abfallstoffe im Behälter (Matrixgeometrie);
- k_5 die chemischen und physikalischen Merkmale der Matrix (Werkstofftyp, Dichte);
- k_6 die Verteilung der radioaktiven Substanzen im Behälter (homogene Verteilung, Hotspots, oberflächliche oder durchgängige Kontamination eines Teils des Abfallstoffes oder des gesamten Abfallstoffes), wodurch die Schwächungseffekte von Matrix und Verteilung kombiniert werden;
- k_7 die chemischen und physikalischen Merkmale der radioaktiven Substanzen (z. B. inhomogene Strahler, deren Dichte und Kernladungszahl Z sich deutlich von der Matrix unterscheiden, was wiederum zu Selbstabsorption im radioaktiven Material führen könnte, welche nicht durch die Korrektur für die Matrixdichte ausgeglichen wird).

Die Kalibrierung sollte den gesamten Bereich der Aktivitäten (A), den gesamten Bereich der Energien (E) und die Dynamikbereiche aller Parameter k abdecken.

Die zur Kalibrierung verwendeten Strahlenquellen sollten soweit wie möglich auf nationale und internationale Normen rückführbar sein.

Mit der Kalibrierung der Messeinrichtung wird das Produkt $\frac{1}{\varepsilon_E} \cdot f_{i,E}(k_1, k_2, \dots)$ bestimmt, das die „Gesamtdetektoreffizienz“ darstellt (Anzahl der Zählungen in der Full-Energy-Peakfläche pro Photon mit der Energie E , das im Abfallgebinde emittiert wird).

Dies kann ermittelt werden durch

- getrennte Betrachtung von ε_E und $f_{i,E}(k_1, k_2, \dots)$; dabei kann ε_E durch Messung der Referenzquellen bestimmt werden; $f_{i,E}(k_1, k_2, \dots)$ werden rechnerisch oder mittels Simulation ermittelt;

ANMERKUNG Die Kalibriergeometrie (Referenzquellen sind Punkt- oder Linienstrahler) kann sich von der Messgeometrie (Verteilung der Radionuklide im Abfallgebinde) unterscheiden, was unterschiedliche Einfallwinkel der Photonen in den Detektor zur Folge hat. Dem kann mit einem Korrekturfaktor Rechnung getragen werden, entweder in ε_E oder in $f_{i,E}(k_1, k_2, \dots)$.

- Betrachtung des gesamten Ausdrucks als eine Einheit, die durch Messungen von in repräsentativen Gebinden eingeschlossenen Referenzquellen oder mittels numerischer Simulationen bewertet werden kann.

In beiden Fällen müssen das oder die mittels Messung oder Simulation zu kalibrierenden Gebinde für das oder die zu charakterisierenden Gebinde in Bezug auf Geometrie, Aktivität, Verteilung der radioaktiven Substanzen und Matrixmerkmale (Parameter k_n) repräsentativ sein.

5.4 Techniken zur Schwächungskorrektur

Es gibt Kalibrierverfahren, mit denen direkt ein Wert für die Gesamteffizienz erreicht wird (z. B. numerische Simulationen, 1:1-Behältersurrogat). Kann keines dieser bevorzugten Verfahren angewendet werden, ist eine partielle Kalibrierung in Verbindung mit Korrekturfaktoren möglich. Ein wichtiger Korrekturfaktor resultiert aus der Schwächung. Zu den routinemäßig angewendeten Verfahren zur Schwächungskorrektur gehören die folgenden:

- *Korrektur auf der Grundlage der mittleren Dichte:* dies ist die einfachste Technik zur Schwächungskorrektur und besteht darin, die mittlere Dichte der Abfallmatrix zu bestimmen (oder zu schätzen); der entsprechende Wert kann dann zur Bestimmung der Schwächung bei den zu betrachtenden Energien verwendet werden.

Zur Bestimmung der Dichte wird das Gebinde üblicherweise gewogen (die Abmessungen des Gebindes sind im Allgemeinen bekannt); das Volumen der Matrix wird basierend auf einer angenommenen Füllhöhe, häufig geschätzt. Manche derzeit gebräuchlichen Systeme ermitteln Daten zur Füllhöhe mittels Radiographietechniken. Die Bestimmung des Abfallvolumens ist häufig nicht der Hauptgrund für den Einsatz von Radiographiesystemen. Wo solche Systeme jedoch für andere Zwecke vorhanden sind, gilt es als bewährte Verfahrensweise, so ermittelte Informationen zu nutzen;

- *Korrektur auf der Grundlage der differentialen Peakabsorption:* wenn von Substanzen, die als nebeneinander angesehen werden können, Gammastrahlung mit ausreichend unterschiedlichen Energien nachgewiesen werden kann, kann daraus ein Korrekturfaktor für die Schwächung abgeleitet werden. Dieses Verfahren ist vor allem dann nützlich, wenn Selbstschwächung in kleinen Mengen radioaktiven Materials (z. B. U oder Pu) auftritt und Dichte und Z in diesen kleinen Mengen nicht repräsentativ für die Matrix sind. In diesem Fall kann die relative Schwächung der Gammastrahlen bei unterschiedlichen Energien nützliche Informationen zu den Schwächungseigenschaften des analysierten radioaktiven Materials liefern;
- *Korrektur auf der Grundlage von Transmissionsmessungen oder bildgebenden Verfahren:* mit einer externen Gamma- (oder Röntgen-)strahlungsquelle wird die Transmission bei einer oder mehreren Energien an einer Position in der Matrix oder an mehreren, über die Matrix verteilten Positionen gemessen. Diese Technik zur Schwächungskorrektur kommt bei SGS-Systemen und TGS-Systemen häufig zum Einsatz.

6 Auswertung

6.1 Auswertungsschritte

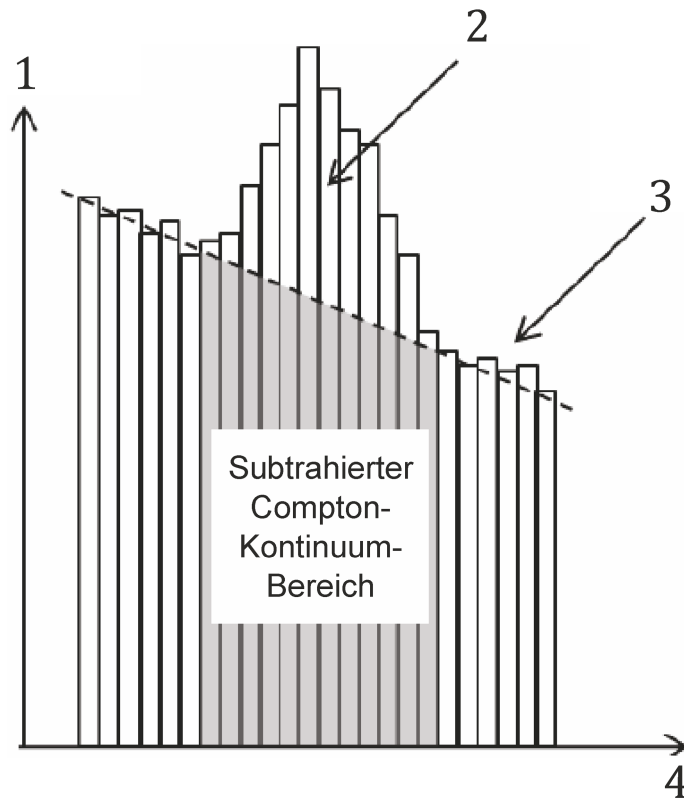
Um das Inventar an gammastrahlenden Radionukliden und ihre entsprechende Aktivität oder, im Fall von nicht nachgewiesenen Gammastrahlen, die Nachweisgrenzen zu bestimmen, werden der Reihe nach die folgenden Verfahrensschritte durchgeführt:

- Berechnung der Vollenergie-Nettopeakflächen;
- Berechnung der Netto-Peakzählraten ($N_{i,E} - B_{i,E}$), siehe 5.3;
- Berechnung des Gammaaktivitätsinventars des Abfallgebindes;
- Berechnung der Messunsicherheit;
- Berechnung der Nachweisgrenzen für nicht nachgewiesene Gammastrahlen.

6.2 Berechnung der Netto-Peakzählraten

Die folgenden Korrekturen sollten berücksichtigt werden:

- *Untergrundkorrektur:* Subtraktion des Compton-Kontinuums. Dies ist sowohl für das Spektrum des Abfallgebindes als auch für das Untergrundspektrum anwendbar (letzteres ergibt sich aus natürlicher Radioaktivität, kosmischer Strahlung, in der Umgebung des Messsystems gelagertes radioaktives Material usw.);



Legende

- 1 Zählungen (oder Zählrate)
- 2 Netto-Peakfläche
- 3 Compton-Kontinuum
- 4 Kanäle

Bild 4 — Beispiel für die Subtraktion des Compton-Kontinuums basierend auf einer einfachen Extrapolation des Compton-Untergrunds in den linken und rechten Kanälen unter Anwendung der Trapezregel

- Subtraktion des „Untergrundpeaks“ (d. h. $B_{i,E}$, siehe 5.3). Auf Folgendes muss jedoch hingewiesen werden: Liegen störende Peaks einer äußeren Strahlungsquelle vor, die die gleiche Energie wie jene des Strahlers im Gebinde haben, kann die einfache Subtraktion von $B_{i,E}$ je nach Position der äußeren Strahlungsquelle und der Größe/Form/Dichte des Gebindes und seines Inhalts zu einem falschen Ergebnis führen. Die zu subtrahierende genaue Menge ist im Allgemeinen nur ungenau bestimmbar und die Störung von Peaks durch Untergrundpeaks sollte so weit wie möglich vermieden werden oder Untergrundpeaks sollten durch Anpassung der Messgeometrie, der Abschirmung und der Umgebung unterbunden werden;
- Korrektur von Störeinflüssen (zwischen im Abfallgebinde vorhandenen Radionukliden). Liegen die Energien der von unterschiedlichen Radionukliden emittierten Gammastrahlung im Gammaskpektrum zu nahe aneinander, kann möglicherweise keine Auflösung der entsprechenden Netto-Peakflächen erfolgen; dies hat in der Regel ein Überschätzen eines oder beider beteiligter Radionuklide zur Folge: Korrekturen können erforderlich sein;
- Totzeitkorrektur (zu hohe Zählraten, die zu „Fehlzählungen“ führen könnten, werden in der Regel durch die Zählerelektronik korrigiert). Übermäßige Totzeit kann zu Untererfassung führen; es ist gängige Praxis, Grenzen für die akzeptable Totzeit festzulegen. Eine radioaktive Referenzquelle oder ein Impulsgeber kann zur Überwachung von Zählverlusten und zur Totzeitkorrektur durch die Elektronik eingesetzt werden;

- Koinzidenzkorrektur (d.h. der Effizienzverlust im Peak bei Energie E aufgrund von gleichzeitiger Erfassung zweier Gammastrahlen, die kaskadisch im Zuge eines einzigen Zerfallsereignisses emittiert werden; üblicherweise braucht dies nur bei sehr geringer Entfernung von Strahler zum Detektor und sehr kleinen Gebinden korrigiert zu werden).

6.3 Berechnung des Gammaaktivitätsinventars des Abfallgebindes

Im Idealfall wird das Gammaaktivitätsinventar des Abfallgebindes vom System nach der Kalibrierfunktion in Gleichung (2) ausgegeben:

$$A_{i,E} = (N_{i,E} - B_{i,E}) \cdot K_i \cdot \frac{1}{\rho_{i,E}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_E} \cdot f_{i,E}(k_1, k_2, \dots) \quad (2)$$

In der Regel müssen die Daten jedoch weiter aufbereitet werden, bevor das Inventar des Gebindes angegeben werden kann.

Zum Beispiel:

In der Regel ist es wünschenswert, die Informationen mehrerer, vom gleichen Radionuklid stammender Peaks zu kombinieren, um die Qualität der Ergebnisse zu verbessern, sowohl mit Blick auf die Zählstatistik als auch auf die Überprüfung der Nachweiswahrscheinlichkeit bei unterschiedlichen Energien (d.h. die Bestätigung der Effizienz-Kalibrierung).

Die Umrechnung von Aktivität in Konzentration oder Masse der Radioaktivität kann nötig sein.

Für segmentierte Systeme ist die Kombination von Informationen aus verschiedenen Spektren nötig, um die Aktivität für das gesamte Abfallgebinde zu extrahieren. In diesem Fall bedarf der Ausgleich von Überlappungen zwischen Spektren besonderer Aufmerksamkeit (im Idealfall experimentell, wo dies jedoch nicht praktikabel ist, mittels Simulation), um ein Überschätzen des Gebindeinventars aufgrund von Doppelzählungen zu vermeiden.

Für die verschiedenen Anwendungen (summiertes Spektrum, kombinierte Aktivitäten der Einzelspektren, ...) sind zwangsläufig spezifische Kalibrierungen und verschiedene Formen der Datenbearbeitung erforderlich. Aus diesem Grund liegt es nicht im Anwendungsbereich dieser Internationalen Norm, für die Datenbearbeitung oder -nutzung weitergehende Leitlinien bereitzustellen.

6.4 Berechnung der Messunsicherheit

Das Ziel einer jeder Messung ist es, den Wert eines zu betrachtenden Parameters zu ermitteln. Angesichts des statistischen Charakters von radioaktivem Zerfall kann das Messergebnis immer nur ein Schätzwert dieses Parameters sein; ohne eine Angabe der Messunsicherheit ist das Messergebnis folglich unvollständig.

Bei der Betrachtung der Messunsicherheit ist es sinnvoll, den Bereich aller wahrscheinlichen Fehler zu bestimmen, verbunden mit einer Einschätzung des Risikos, inwieweit der tatsächliche Fehler außerhalb dieses Bereichs liegen könnte.

Daraus ergibt sich, dass für eine Quantifizierung der Messunsicherheit zwei Angaben benötigt werden. Die erste Angabe (der sog. „Abdeckungsfaktor“) gibt den Bereich an, innerhalb dessen der tatsächliche Fehler vermutet wird. Die zweite Angabe (das sog. „Vertrauensniveau“) gibt an, wie sicher die Annahme ist, dass der „tatsächliche“ Messfehler im definierten Intervall liegt.

Für Variablen, die nach einer Gaußschen Normalverteilung verteilt sind, gibt es eine feste Beziehung zwischen der Standardabweichung und dem Vertrauensniveau, die in Prozent angegeben wird. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass von Strahlungsschwächung herrührende Unsicherheitselemente in der Regel nicht

zu einer Gauß-Verteilung führen, sondern zu einer nichtsymmetrischen und nichtzentrierten Verteilung, wie z. B. die logarithmische Normalverteilung.

In der Praxis setzt sich die Messunsicherheit aus Beiträgen mehrerer Quellen zusammen. Für eine Einschätzung der Messunsicherheit muss der Analyst die Effekte (auf das Ergebnis) aller wichtigen Unsicherheitsquellen bewerten. Zu den üblicherweise betrachteten Unsicherheitsquellen bei der Zusammenstellung des Toleranzbereichs für gammaspektrometrische Messsysteme gehören:

- Anzahl der nachgewiesenen strahlungsindizierten Ereignisse;
- Anzahl der nachgewiesenen untergrundstrahlungsindizierten Ereignisse;
- Kalibrierfaktor;
- Korrekturfaktoren;
- Messgeometrie (z. B. Veränderung der Behälterposition);
- Größe und Wanddicke des Behälters;
- Füllhöhe der Probe im Behälter (oft nicht einsehbar);
- Aktivitätsverteilung;
- Matrixeffekte (z. B. Matrixzusammensetzung, Dichteverteilung in der Matrix);
- Selbstabsorption im radioaktiven Material (sofern noch nicht bei den Matrixeffekten berücksichtigt);
- Isotopenzusammensetzung;
- Totzeiteffekte;
- Präzision der nuklearen Daten.

Manche Effekte werden von unregelmäßigen Ereignissen verursacht, die im Allgemeinen nicht in die Beurteilung der Unsicherheit einfließen, auch wenn sie potentielle Messfehlerquellen darstellen. Stattdessen ist das Ziel, deren Auftreten durch das Befolgen bewährter Verfahrensweisen so weit wie möglich zu reduzieren (oder im Idealfall zu vermeiden). Hierzu gehören:

- Bedienfehler;
- Fehlfunktion oder Drift der Instrumente;
- Fehler oder Beschädigung der Software.

ISO hat hierzu ISO/IEC Guide 98-3:2008 veröffentlicht. Darin wird unter anderem erklärt, wie die einzelnen Teilschätzwerte der Unsicherheit zu kombinieren sind. Dies schließt die Anwendung anderer Modelle oder Methoden nicht aus.

Bei den meisten Abfallmesssystemen wird die Gesamtmessunsicherheit von einem Mangel an genauen Kenntnissen zu Aktivitäts- und Dichteverteilung im Abfallgebinde dominiert. Um die Fehlerverteilung besser zu verstehen, haben sich rechnergestützte Modellierungen als zweckmäßig erwiesen. Dieses Vorgehen liefert Datensätze, die mit statistischen Verfahren analysiert werden können. Ein gängiges Beispiel sind numerische Simulationen zur Durchführung von wahrscheinlichkeitsbasierten Unsicherheitsanalysen. Dabei wird eine kombinierte Unsicherheit der modellierten Einheiten zusammen mit der Verteilungsfunktion der

Unsicherheit bestimmt. Dies beinhaltet in der Regel die Unsicherheit der Effizienz sowie verschiedene Korrekturfaktoren.

6.5 Berechnung der Nachweisgrenze

Aus dem zufälligen und veränderlichen Charakter sowohl des Strahlers als auch des Untergrunds resultieren die als „Nachweisgrenze“ (DL) und „Erkennungsgrenze“ (DT) bezeichneten Messparameter.

Auf dem Gebiet der Gammastrahlungsmessung kann die Nachweisgrenze definiert werden als die Mindestaktivität eines Radionuklids, das mit einem guten Vertrauensniveau nachgewiesen werden kann (es besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit β für den Nichtnachweis der Aktivität, siehe Bild 5, bei einer bestimmten Messanordnung, weil die Wahrscheinlichkeit α eines falsch positiven Nachweises ebenfalls gering ist). Die Nachweisgrenze kann sich von Radionuklid zu Radionuklid und von Messung zu Messung unterscheiden; ihr Wert wird in der Regel von den gängigen Gammaspektroskopie-Softwareanwendungen berechnet.

Die Nachweisgrenze ist ein wichtiger Leistungsparameter zum Vergleich zwischen Systemen. Oft gibt die Nachweisgrenze den Aufbau des Systems vor, da sich die Wahl des Detektors, die Detektorkonfiguration, Menge und Art der Abschirmwerkstoffe usw. auf die Nachweisgrenze auswirken. Deshalb ist es in der Regel notwendig, die Nachweisgrenze bei der Systemplanung bereits frühzeitig vor dem Hintergrund einer Reihe festgelegter Parameter zu berechnen, um sicherzustellen, dass der Systemaufbau die Leistungsanforderungen erfüllt.

Unabhängig davon, ob die Berechnung während der Planung des Systems oder zum Zeitpunkt der Messung erfolgt, ist das Berechnungsverfahren identisch.

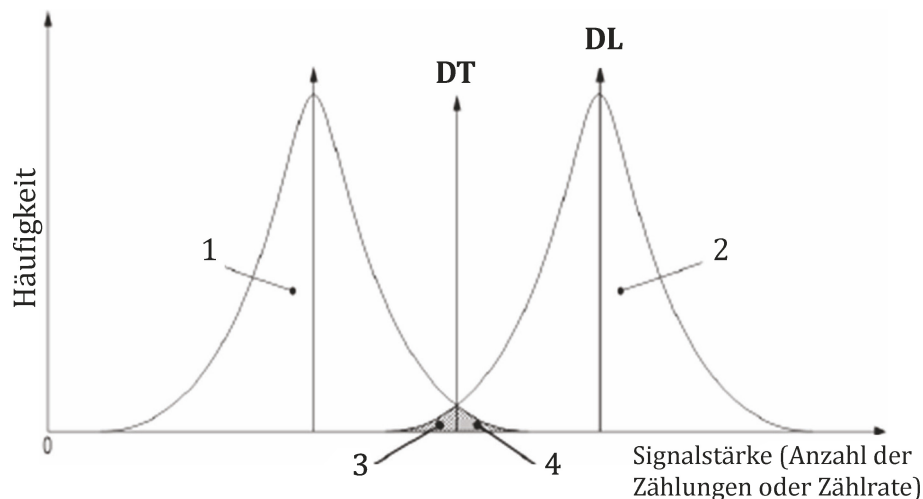
ANMERKUNG Die Bestimmung der Nachweisgrenze erfolgt anwendungsspezifisch. Aus diesem Grund werden in dieser Internationalen Norm nur die allgemeinen Prinzipien beschrieben. Detaillierte Leitlinien finden sich im ISO/IEC Guide 98-3 sowie in ISO 11929.

Zur Bestimmung der Nachweisgrenze ist es zunächst notwendig, einen als „Erkennungsgrenze“ (DT) bezeichneten Parameter zu ermitteln.

Die Erkennungsgrenze ist ein Grenzwert für die Auswertung von Netto-Signalen. Für Netto-Signale, die über der Erkennungsgrenze liegen, wird angenommen, dass sie auf das Vorhandensein eines Radionuklids im Abfallgebinde zurückzuführen sind und nicht auf zufällige Fluktuationen des Untergrunds. Der Grenzwert für einen bestimmten Gammapeak eines Radionuklids wird so gewählt, dass ein annehmbar kleiner Teilbereich der Signalverteilung darüber liegt, wenn das Radionuklid nicht im Abfallgebinde vorliegt, siehe α -Teilbereich in Bild 5, welcher das Risiko eines Fehlalarms darstellt (falsch positiv).³⁾

Die Nachweisgrenze stellt die Mindestaktivität dar, die vom Messsystem nachgewiesen werden kann, d. h. von der ein Netto-Signal ausgelöst wird, das mit ausreichender Wahrscheinlichkeit über der Nachweisgrenze liegt. Die Nachweisgrenze wird so gewählt, dass ein annehmbar kleiner Teilbereich der Netto-Signalverteilung darunter liegt, siehe Teilbereich β in Bild 5, welcher das Risiko des Nichtnachweises darstellt (falsch negativ).³⁾

3) Der „annehmbare“ kleine Teilbereich ist anwendungsspezifisch. In der Praxis typische Werte sind 0,01, 0,05 und 0,1. Dies schließt nicht aus, je nach Anwendungsfall geeignete andere Werte zu wählen.



Legende

- 1 Untergrundverteilung
- 2 Signalverteilung
- 3 Teilbereich β für Nichtnachweis
- 4 falsch

Bild 5 — Darstellung der Beziehung zwischen Erkennungsgrenze (DT) und Nachweisgrenze (DL)

In Bild 5 stellt die linke Kurve die Verteilung der Zählungen im interessierenden Objektbereich dar, in dem ein Peak auftreten würde, wenn das Radionuklid vorhanden wäre; die rechte Kurve stellt die Gesamtanzahl an Zählungen im Peakbereich dar (Netto- und Untergrundsignale), wenn die Aktivität des (im Abfall vorkommenden) Radionuklids gleich der Nachweisgrenze ist.

Die Nachweisgrenze ist ein „A-priori“-Wert. Er kombiniert die Wahrscheinlichkeit des Nachweises mit der Wahrscheinlichkeit des Nichtnachweises. Die Nachweisgrenze eignet sich am besten, um die Leistung von Systemen oder Zählansordnungen miteinander zu vergleichen. Nachdem die Probe gemessen und analysiert und eine der beiden Wahrscheinlichkeiten ausgeschlossen wurde, wird die Aktivität eines Radionuklids entweder nachgewiesen oder nicht nachgewiesen, je nachdem, ob das Netto-Signal über oder unter der Erkennungsgrenze liegt. Wird Radioaktivität nachgewiesen, sollte dies zusammen mit der Unsicherheit dokumentiert werden. Wird keine Radioaktivität nachgewiesen, muss der Analyst häufig eine Schätzung zur Größe des Strahlers vornehmen, der auch dann vorhanden sein kann, wenn das Netto-Signal unterhalb der Erkennungsgrenze liegt.

In diesem Fall kann der Analyst je nach Kontext und Leistungsanforderungen des Systems wahlweise den Messwert und dessen Unsicherheit oder die Erkennungsgrenze mit einem Vertrauensniveau oder die Nachweisgrenze angeben.

ANMERKUNG Bei sicherheitskritischen Anwendungen wird häufig die Nachweisgrenze angegeben. Bei diesem Ansatz wird jedoch die Aktivität systematisch überschätzt, was hinsichtlich der Verantwortlichkeit für Zwischen- und Endlagerung problematisch sein kann.

7 Qualitätssicherung

7.1 Allgemeines

An diese Internationale Norm wird die Erwartung geknüpft, dass alle relevanten Messdaten, angewendeten Kalibrierfaktoren und berechneten Korrekturfaktoren sowie die daraus abgeleiteten Ergebnisse dokumentiert und aufgezeichnet werden.

An diese Internationale Norm wird die Erwartung geknüpft, dass Systeme zur Messung von Gammastrahlung in Übereinstimmung mit anerkannten und geeigneten Verfahren und Verfahrensanweisungen spezifiziert, entwickelt, errichtet, betrieben, instand gehalten und außer Betrieb gesetzt werden.

Zum Anwendungsbereich dieser Internationalen Norm gehört nicht die Betrachtung der einzelnen Lebenszyklusabschnitte eines Systems in allen Einzelheiten. An diese Internationale Norm wird die Erwartung geknüpft, dass für jeden Lebenszyklusabschnitt anerkannte und geeignete Verfahren und Verfahrensanweisungen befolgt und angewendet werden.

An diese Internationale Norm wird die Erwartung geknüpft, dass geeignete Leistungsprüfungen zur Qualitätssicherung ausgearbeitet und durchgeführt und die Ergebnisse dokumentiert werden, um nachzuweisen, dass die Leistung des Systems bei seiner Einrichtung und während der gesamten Betriebsdauer den Anforderungen entspricht.

ISO/IEC 17025 legt allgemeine Anforderungen fest, die für die Qualitätssicherung relevant sind.

Es ist jedoch angebracht, die nachfolgend genannten Bereiche näher zu betrachten.

7.2 Aufzeichnung von Kalibrierungs-, Validierungs- und Abfallmessungen

Es wird empfohlen, die Rohdaten und die verarbeiteten Daten aller Prüfungen zum Leistungsnachweis (Qualitätssicherung) aufzuzeichnen, um so Abweichungen der Geräte vom Normalbetrieb erkennen zu können. Es wird empfohlen, diese Ergebnisse der Qualitätssicherung (mindestens) bis zum Ende der Betriebslebensdauer der Geräte aufzubewahren, z. B. für Auditierungszwecke.

Es wird empfohlen, die Messungen an Gebinden mit radioaktivem Abfall zum Zwecke der Rückführbarkeit sowie für nachträgliche Analysen im Falle von unerwarteten Ergebnissen oder Abweichungen der Geräte aufzuzeichnen.

Nachfolgend sind beispielhaft Informationen genannt, die entweder vollständig oder als Verweis auf einen separaten spezifischen Datensatz aufgezeichnet werden könnten:

- Kennnummer des Abfallgebindes;
- Gewicht des Abfallgebindes;
- Datum und Uhrzeit der Messung;
- Messparameter (Hochspannung, Grenzwert, Totzeit, Einstellungen der Elektronik usw.);
- Kalibrierfunktionen für Energie und Peakform (siehe 5.1);
- „Hintergrundspektrum“ (siehe 5.2);
- Nukliddaten (Peakintensitäten, Halbwertszeiten usw.);
- Gammaspektrum des Abfallgebindes;
- Netto-Peakflächen nach Subtraktion des Untergrunds;
- Kalibrierfunktion der Peak-Effizienz;
- Schwächung und andere Korrekturfaktoren (siehe 5.2);
- Aktivität der zu betrachtenden Radionuklide;