

**DIN ISO 7503-3
(VDE 0493-2-5033)**
DIN

Diese Norm ist zugleich eine **VDE-Bestimmung** im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.

VDE

ICS 17.240

Ersatzvermerk
siehe unten

**Bestimmung der Radioaktivität –
Messung und Bewertung der Oberflächenkontamination –
Teil 3: Gerätekalibrierung
(ISO 7503-3:2016)**

Measurement of radioactivity –
Measurement and evaluation of surface contamination –
Part 3: Apparatus calibration
(ISO 7503-3:2016)

Mesurage de la radioactivité –
Mesurage et évaluation de la contamination de surface –
Partie 3: Étalonnage de l'appareillage
(ISO 7503-3:2016)

Ersatzvermerk

Mit **DIN ISO 7503-1 (VDE 0493-2-5031):2017-12** und **DIN ISO 7503-2 (VDE 0493-2-5032):2017-12**
Ersatz für DIN ISO 7503-1:1990-07 und DIN ISO 7503-2:1990-07
Siehe Anwendungsbeginn

Gesamtumfang 70 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE
DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR)
DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn für diese Norm ist 2017-12-01.

Für DIN ISO 7503-1:1990-07 und DIN ISO 7503-2:1990-07 besteht eine Übergangsfrist bis 2018-11-30.

Inhalt

Seite

Nationales Vorwort.....	5
Nationaler Anhang NA (informativ) Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Dokumenten	6
Nationaler Anhang NB (informativ) Literaturhinweise.....	7
Einleitung	8
1 Anwendungsbereich	9
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe, Formelzeichen und Abkürzungen	10
3.1 Begriffe	10
3.2 Formelzeichen und Abkürzungen.....	10
4 Methoden zur Bestimmung von Oberflächenkontaminationen	11
5 Hauptmethodik der direkten Kalibrierung einschließlich Summenkorrektur	12
5.1 Allgemeines	12
5.2 Kalibrierung für Radionuklide bei Zerfalls-Schema mit Einzelemission	12
5.3 <i>P</i> -Faktor für Radionuklide mit einem einfachen Zerfallsschema	14
5.4 <i>P</i> -Faktoren für Radionuklide mit komplexem Zerfallsschema	16
5.5 Allgemeine Abschätzung des Ansprechvermögens des Messgeräts	16
5.5.1 Bestimmung des energieabhängigen Ansprechvermögens des Messgeräts	16
5.5.2 Modellierung der Zerfallspfade des interessierenden Radionuklids	18
5.5.3 Bestimmung des Gesamt-Ansprechvermögens eines Messgeräts	21
5.5.4 Alternative Bestimmung des Gesamt-Ansprechvermögens eines Messgeräts	21
5.6 Folgerungen	21
6 Prüfbericht	21
Anhang A (normativ) Alternative Methodik zur Kalibrierung.....	23
Anhang B (informativ) Direkte Bestimmung der Oberflächenkontamination: Zahlenbeispiele für die Kalibrierung	33
Anhang C (informativ) Bestimmung der Oberflächenkontamination für Radionuklidgemische	46
Anhang D (informativ) Kalibrierung für die indirekte Bestimmung von Oberflächenkontaminationen	48
Anhang E (informativ) Anwendung der ISO 11929 auf die direkte Bestimmung von Oberflächenkontaminationen	51
Anhang F (informativ) Anwendung der ISO 11929 auf die indirekte Bestimmung von Oberflächenkontaminationen	63
Literaturhinweise.....	70

Bilder

Bild 1 – Schematische Darstellung der Emissionsprozesse an der Oberfläche eines Strahlers	14
Bild 2 – Ansprechvermögen des Messgeräts als Funktion der Alphaenergie.....	17
Bild 3 – Ansprechvermögen des Messgeräts als Funktion der Betaenergie	17
Bild 4 – Ansprechvermögen des Messgeräts als Funktion der Photonenenergie	18
Bild 5 – Typisches Zerfallsschema	19
Bild A.1 – Ansprechvermögen für einen Oberflächenkontaminationsmonitor mit relativ hohem Ansprechvermögen (oben) und für ein Gerät mit relativ niedrigem Ansprechvermögen (unten)	27
Bild B.1 – Zerfallsschema von ^{125}I	33
Bild B.2 – Zerfallsschema von ^{32}P	35
Bild B.3 – Zerfallsschema von $^{99\text{m}}\text{Tc}$	35
Bild B.4 – Zerfallsschema von ^{111}In	37
Bild E.1 – Nachweisgrenze gegen ihre relative Unsicherheit.....	54
Bild F.1 – Nachweisgrenze gegen ihre relative Unsicherheit.....	66

Tabellen

Tabelle 1 – Größen zur Beschreibung des Messgeräts	13
Tabelle 2 – Größen zur Beschreibung der Oberfläche	14
Tabelle 3 – Unterschiedliche Abschwächungseffekte je nach Art und Energie der Emissionen	15
Tabelle 4 – Relative Transmissionsfaktoren von Oberflächenbeschichtungen	15
Tabelle 5 – Zerfallsschema in tabellarischer Form	19
Tabelle 6 – Imaginäres Beispiel für die mit jedem Zerfallspfad verbundenen Wahrscheinlichkeiten	20
Tabelle A.1 – Referenzstrahler zur Bestimmung des Ansprechvermögens von Messgeräten.....	24
Tabelle A.2 – Beispiel der Auswirkung der Koinzidenz-Zählung für einen Oberflächenkontaminationsmonitor mit hohem Ansprechvermögen (Radionuklid ^{169}Yb)	31
Tabelle A.3 – Beispiel der Auswirkung der Koinzidenz-Zählung für einen Oberflächenkontaminationsmonitor mit niedrigem Ansprechvermögen (Radionuklid ^{134}I)	31
Tabelle A.4 – Auswirkungen auf das Messergebnis bei verschiedenen Arten von Kalibrierfaktoren	32
Tabelle B.1 – Häufigkeiten der Zerfallspfade und -produkte für ^{125}I	34
Tabelle B.2 – Häufigkeiten der Zerfallspfade und -produkte für ^{111}In	38
Tabelle B.3 – Nukleare Daten für das Beispiel für das Radionuklid ^{131}I	39
Tabelle B.4 – Addierte Intensitäten der Energiebereiche von Beta- und Photonenemissionen für ^{131}I	41
Tabelle B.5 – Berechnungsschema für den Summenausdruck der Gleichung (A.3).....	42
Tabelle B.6 – Vergleich der $I(A)$ -Berechnungen für ^{125}I nach Anhang A und Anhang B.....	43
Tabelle B.7 – Vergleich der $I(A)$ -Berechnungen für $^{99\text{m}}\text{Tc}$ nach Anhang A und Anhang B.....	44
Tabelle B.8 – Vergleich der $I(A)$ -Berechnungen für ^{111}In nach Anhang A und Anhang B.....	45
Tabelle E.1 – Für das direkte Messverfahren verwendete angemessen konservative Werte	55
Tabelle E.2 – Ansprechvermögen des Monitors	56

	Seite
Tabelle E.3 – Nukleare Daten $\eta_{i,j}$ für die Radionuklide dieser Beispiele	57
Tabelle E.4 – Berechnung des Aktivitäts-Ansprechvermögens des Messgeräts und seiner Unsicherheit.....	60
Tabelle E.5 – Eingangsdaten, Zwischenwerte und Ergebnisse	60
Tabelle F.1 – Für das Wischtest-Verfahren verwendete angemessene konservative Werte	67
Tabelle F.2 – Dynamische Eigenschaften des Zählers	67
Tabelle F.3 – Eingangsdaten, Zwischenwerte und Ergebnisse	68

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN ISO 7503-3 (VDE 0493-2-5033):2013-05.

Die Internationale Norm ISO 7503-3:2016, *Measurement of radioactivity – Measurement and evaluation of surface contamination – Part 3: Apparatus calibration*, ist unverändert in diese Norm übernommen worden.

Das internationale Dokument wurde vom SC 2 „Radiological protection“ des TC 85 „Nuclear energy, nuclear technologies and radiological protection“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme und Abstimmung vorgelegt.

Für diese Norm ist das nationale Arbeitsgremium GK 851 „Aktivitätsmessgeräte für den Strahlenschutz“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de), Gemeinschaftsgremium mit dem Normenausschuss Radiologie (NAR) im DIN, zuständig.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO [und/oder] IEC sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

DIN ISO 7503 (VDE 0493-2), *Bestimmung der Radioaktivität – Messung und Bewertung der Oberflächenkontamination*, besteht aus den folgenden Teilen:

- **Teil 1: Allgemeine Grundlagen**
- **Teil 2: Wischtest**
- **Teil 3: Gerätekalibrierung**

Änderungen

Gegenüber **DIN ISO 7503-1:1990-07** und **DIN ISO 7503-2:1990-07** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die Normenreihe wurde neu gegliedert;
- b) die Inhalte wurden vollständig überarbeitet.

Frühere Ausgaben

DIN 25415-2: 1977-04

DIN ISO 7503-1: 1990-07

DIN ISO 7503-2: 1990-07

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Dokumenten

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden Deutschen Dokumenten ist nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 60325:2004	IEC 60325:2002, mod.	DIN EN 60325 (VDE 0493-2-1):2005-02	VDE 0493-2-1
–	ISO 31-0 <i>ersetzt durch:</i>	–	–
EN ISO 80000-1:2013	ISO 80000-1:2009 + Cor. 1:2011	DIN EN ISO 80000-1:2013-08	–
–	ISO 31-9 <i>ersetzt durch:</i>	–	–
EN ISO 80000-10:2013	ISO 80000-10:2009	DIN EN ISO 80000-10:2013-08	–
–	ISO 7503-1:2016	DIN ISO 7503-1 (VDE 0493-2-5031):2017-12	VDE 0493-2-5031
–	ISO 7503-2:2016	DIN ISO 7503-2 (VDE 0493-2-5032):2017-12	VDE 0493-2-5032
–	ISO 8769:2016	DIN ISO 8769 (VDE 0412-8769):2016-08	VDE 0412-8769
–	ISO 11929:2010	DIN ISO 11929:2011-01	–
–	–	DIN ISO 11929 Bbl 1:2014-08	–
–	ISO 11932:1996	–	–
EN ISO/IEC 17025:2005	ISO/IEC 17025:2005	DIN EN ISO/IEC 17025:2005-08	–
–	ISO/IEC-Guide 98-3	–	–
–	IEC/TR 62461:2015	<i>Für Strahlungsmessungen siehe</i> DIN IEC/TR 62461 (VDE 0492-1000):2015-07	VDE 0492-1000
–	ISO/IEC-Guide 99	–	–

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60325 (VDE 0493-2-1):2005-02, Strahlenschutz-Messgeräte – Alpha-, Beta- und Alpha/Beta-(Betaenergie > 60 keV) Kontaminationsmessgeräte und -monitore (**IEC 60325:2002**, modifiziert); Deutsche Fassung **EN 60325:2004**

DIN EN ISO 80000-1:2013-08, Größen und Einheiten – Teil 1: Allgemeines (ISO 80000-1:2009 + Cor. 1:2011); Deutsche Fassung **EN ISO 80000-1:2013**

DIN EN ISO 80000-10:2013-08, Größen und Einheiten – Teil 10: Atom- und Kernphysik (ISO 80000-10:2009); Deutsche Fassung **EN ISO 80000-10:2013**

DIN EN ISO/IEC 17025:2005-08, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2005); Deutsche und Englische Fassung **EN ISO/IEC 17025:2005**

DIN IEC/TR 62461 (VDE 0493-1000):2015-07, Strahlenschutz-Messgeräte – Bestimmung der Unsicherheit beim Messen (**IEC/TR 62461:2015**)

DIN ISO 7503-1 (VDE 0493-2-5031):2017-12, Bestimmung der Radioaktivität – Messung und Bewertung der Oberflächenkontamination – Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 7503-1:2016)

DIN ISO 7503-2 (VDE 0493-2-5032):2017-12, Bestimmung der Radioaktivität – Messung und Bewertung der Oberflächenkontamination – Teil 2: Wischtest (ISO 7503-2:2016)

DIN ISO 8769 (VDE 0412-8769):2016-08, Referenzstrahler – Kalibrierung von Oberflächenkontaminationsmonitoren – Alpha-, Beta- und Photonenquellen (**ISO 8769:2016**)

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)

DIN ISO 11929 Beiblatt 1:2014-08, Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung – Grundlagen und Anwendungen; Beiblatt 1: Beispiele

Bestimmung der Radioaktivität – Messung und Bewertung der Oberflächenkontamination – Teil 3: Gerätekalibrierung

Einleitung

ISO 7503 gibt eine Anleitung für die Bestimmung von Oberflächenkontamination. Diese Internationale Norm ist auf viele Situationen anwendbar, bei denen radioaktive Kontamination auftreten kann. Radioaktive Kontamination entsteht durch die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung. In den meisten Fällen ist die Freisetzung unbeabsichtigt, sie kann aber auch in bestimmten Situationen absichtlich erfolgen. Obwohl Zweck und Umfang der Untersuchungen unterschiedlich sein können, ist die Herangehensweise zur Bestimmung des Umfangs und des Ausmaßes der Kontamination im Wesentlichen gleichartig.

Radioaktive Kontamination kann durch eine Reihe von Tätigkeiten oder Vorfällen verursacht werden, wie z. B.:

- routinemäßiger Laboreinsatz von radiochemischen Substanzen;
- medizinische Behandlungen;
- industrielle Anwendungen;
- Transportunfälle;
- Funktionsstörungen von Anlagen und Geräten;
- terroristische Anschläge;
- nukleare Störfälle.

Ohne Prozesskenntnis oder Dokumentationsunterlagen ist es nicht immer möglich, die verschiedenen Radionuklide, die zu einer Oberflächenkontamination beitragen, zu identifizieren oder zu unterscheiden; die Bestimmung einer solchen Kontamination kann daher oft nicht auf quantitativer Basis erfolgen. Es kann auch notwendig sein, anstelle von Messgeräten mit nuklidspezifischer Kalibrierung andere Messgeräte zu verwenden, die für diesen Zweck geeigneter sind.

Es können jedoch Fälle auftreten (z. B. ein kontaminierter Transportbehälter für Brennelemente), in denen die Radionuklide oder das Radionuklidgemisch genau beschrieben werden können/kann. Die Bestimmung einer Oberflächenkontamination, die über die qualitative Ermittlung festhaltender oder nicht festhaltender Oberflächenkontamination hinausgeht, kann erforderlich sein. Darüber hinaus ist entsprechend nationaler Bestimmungen und internationaler Regelungen die in Einheiten der Aktivität je Flächeneinheit gemessene Oberflächenkontamination mit den Richtwerten oder Grenzwerten für die Oberflächenkontamination zu vergleichen.

Richtwerte für Oberflächenkontamination sind nuklidspezifisch und erfordern daher komplexe nuklidspezifische Kalibrierungen der Messgeräte. Die Qualitätssicherung der Kalibrierung ist ein wesentlicher Punkt, um eine Nicht-Erkennung (d. h. Typ-2-Fehler) zu vermeiden, welche zu einer inkorrekten Annahme der Einhaltung gegebener Richtwerte oder Grenzwerte für die Oberflächenkontamination führen würde. Die Bestimmung einer Oberflächenkontamination mit einem Nuklidgemisch bekannter Zusammensetzung erfordert entsprechende Kalibrierfaktoren.

ISO 7503 behandelt die Messung und Abschätzung von Radioaktivitätsniveaus. Sie gibt keine Anleitung für Stilllegungs-, Planungs- und Überwachungstechniken.

Die Oberflächenkontamination wird als Aktivität je Flächeneinheit angegeben, und die Grenzwerte basieren auf den Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiological Protection, ICRP 103).

Dieser Teil der ISO 7503 behandelt eine Methodik zur nuklidspezifischen Kalibrierung, die additive Korrekturen enthält. [Anhang A](#) enthält bezüglich der Behandlung der Emissionsdaten der Radionuklide vereinfachte Kalibrierverfahren.

1 Anwendungsbereich

ISO 7503 und **ISO 8769** richten sich an diejenigen Personen, die für die Bestimmung der auf festen Oberflächen vorhandenen Radioaktivität verantwortlich sind.

Dieser Teil der ISO 7503 bezieht sich auf die Bestimmung von Oberflächenkontaminationen in Einheiten der Aktivität je Fläche durch direkte und indirekte Messverfahren und behandelt die komplexen Aspekte der Gerätekalibrierung.

Dieser Teil der ISO 7503 ist auf wohldefinierte Oberflächen anwendbar, wie die von Geräten und Anlagen, Behältern für radioaktives Material, umschlossene radioaktive Quellen und Gebäude oder Bodenflächen.

Dieser Teil der ISO 7503 kann zur Kontrolle im Labor und von Geräten und Einrichtungen und bei Sanierungs- und Überwachungsmaßnahmen zur Einhaltung von Ableitungskriterien angewendet werden.

Dieser Teil der ISO 7503 gilt auch für:

- Kalibrierlabore oder Institutionen, die sich mit Radionukliden mit komplexen Emissionen oder mit Radionukliden, für die keine Kalibrierstrahler verfügbar sind, beschäftigen;
- Institutionen, die die Aufgabe haben, Oberflächenkontaminationen zu bestimmen, die sich aus einem Radionuklidgemisch zusammensetzen;
- Institutionen/Behörden, die den Transport von nuklearem Material oder die Freigabe von Materialien/Geräten nach nationalen gesetzlichen Bestimmungen oder international vereinbarten Grenzwerten überwachen.

Dieser Teil der ISO 7503 gilt nicht für Kontaminationen der Haut, von Kleidung oder von losem Material wie Kies/Schotter.

ANMERKUNG Die direkte Bestimmung von Oberflächenkontaminationen mit Alpha-, Beta- und Photonenstrahlern wird in ISO 7503-1 behandelt. Die Bestimmung von radioaktiven Oberflächenkontaminationen mittels Wischtests wird in **ISO 7503-2** behandelt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 7503-1, *Measurement of radioactivity – Measurement and evaluation of surface contamination – Part 1: General principles*

ISO 7503-2, *Measurement of radioactivity – Measurement and evaluation of surface contamination – Part 2: Test method using wipe test samples*

ISO 8769, *Reference sources – Calibration of surface contamination monitors – Alpha-, beta- and photon emitters*

ISO 11929, *Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit, and limits of the confidence interval) for ionizing radiation measurements – Fundamentals and applications*

ISO/IEC 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

IEC 60325, *Radiation protection instrumentation – Alpha, beta and alpha/beta (beta energy > 60 keV) contamination meters and monitors*

3 Begriffe, Formelzeichen und Abkürzungen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach **ISO 7503-1** und **ISO 7503-2** und die folgenden Begriffe.

3.1.1

Emissionswahrscheinlichkeit eines Radionuklids

(en: emission probability of a radionuclide)

Verhältnis der Anzahl von Teilchen einer bestimmten Art oberhalb einer festgelegten Energie oder der Photonen, die je Zeiteinheit von einem gegebenen Radionuklid erzeugt werden, zur Anzahl der Zerfallsereignisse dieses Radionuklids je Zeiteinheit

3.1.2

Austrittsfaktor einer Strahlenquelle

(en: emergence factor of a source)

Verhältnis zwischen der Anzahl der Teilchen einer bestimmten Art oberhalb einer festgelegten Energie oder der Photonen, die in einer Strahlenquelle (bei einer dünnen Quelle) oder in ihrer Sättigungsschicht (bei einer dicken Quelle) je Zeiteinheit erzeugt oder freigesetzt werden, und der Anzahl der Teilchen desselben Typs oder der Photonen, die durch die Vorderfläche oder das Fenster einer Strahlenquelle je Zeiteinheit austreten (Oberflächenemissionsrate)

3.1.3

Wirkungsgrad einer Quelle

(en: source efficiency)

Verhältnis zwischen der Anzahl der Teilchen einer bestimmten Art oberhalb einer festgelegten Energie oder der Photonen, die durch die Vorderfläche oder das Fenster einer Strahlenquelle je Zeiteinheit austreten, (Oberflächenemissionsrate) und der Anzahl der Photonen oder der Teilchen derselben Art, die innerhalb der Quelle (bei dünnen Quellen) oder in ihrer Sättigungsschichtdicke je Zeiteinheit erzeugt und freigesetzt werden

3.2 Formelzeichen und Abkürzungen

Für diesen Teil von ISO 7503 gelten die in **ISO 7503-1** und **ISO 7503-2** definierten sowie folgende Formelzeichen.

p_e	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Teilchen aus der Oberfläche austritt
p_c	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Teilchen aus der Oberfläche eines Kalibrierstrahlers austritt
P	Kehrwert der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Teilchen aus der Oberfläche austritt
E_{ij}	Austrittsfaktor einer Quelle für eine bestimmte Energie oder Energiebereich i und für die Art der Strahlung j (Alpha-, Beta- oder Photonenstrahlung)
a_i	Komponente i des Zerfallspfad eines Radionuklids
ε_{ij}	Ansprechvermögen des Messgeräts für eine bestimmte Energie oder Energiebereich i und für die Art der Strahlung j (Alpha-, Beta- oder Photonenstrahlung) in $\text{s}^{-1}/\text{s}^{-1}$
k_i	Häufigkeit des Zerfallspfad i eines Radionuklids
$C(A)_n$	Kalibrierfaktor der direkten Methode, bezogen auf die Aktivität für das Radionuklid n , in $(\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2})/\text{s}^{-1}$
S_G	aktive Fläche des Kalibrierstrahlers, gleich der Mittelungsfläche für den Richtwert der Oberflächenkontamination in cm^2
η_{ij}	Gesamtemissionsstärke für einen bestimmten Energiebereich und für die Art der Strahlung j (Alpha-, Beta- oder Photonenstrahlung)
G_n	nuklidspezifischer Richtwert der Oberflächenkontamination für das Radionuklid n , in Bq cm^{-2}
$r_{G,n}$	Nettozählrate des Messgeräts, die dem nuklidspezifischen Richtwert G_n einer Oberflächenkontamination mit dem Radionuklid n in s^{-1} entspricht

$M_{G,n}$	Vielfaches des Richtwerts G_n einer Oberflächenkontamination
$E_{\beta,\max}$	maximale Energie der Betastrahlung, in MeV
P_d	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Oberflächenkontaminationsmonitor eine Zerfallskaskade mit n Stufen erkennt
$A_{s,n}$	Aktivität der festhaftenden und der nicht festhaftenden Kontamination eines Radionuklids n je Flächeneinheit in Bq cm^{-2}
$C(A)_m$	Kalibrierfaktor der direkten Methode, bezogen auf die Aktivität für ein gegebenes Radionuklidgemisch m mit bekannten Radionuklidbestandteilen der Mischung in $(\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2})/\text{s}^{-1}$
G_m	Richtwert der Oberflächenkontamination mit einem gegebenen Radionuklidgemisch m mit bekannten Radionuklidbestandteilen in $\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$
f_n	Anteil des Radionuklids n in einem Radionuklidgemisch
$A_{s,m}$	Aktivität der festhaftenden und der nicht festhaftenden Kontamination durch ein Radionuklidgemisch m je Flächeneinheit in Bq cm^{-2}
$r_{G,m}$	Nettozählrate des Messgeräts, die dem Richtwert G_m einer Oberflächenkontamination in s^{-1} entspricht
$M_{G,m}$	Vielfaches des Richtwerts G_m einer Oberflächenkontamination
$C(A)_n^{\text{ind}}$	Kalibrierfaktor der indirekten Methode, bezogen auf die Aktivität für ein gegebenes Radionuklid n in $(\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2})/\text{s}^{-1}$
L_n	Grenzwert einer nuklidspezifischen Oberflächenkontamination in $\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$
$r_{L,n}$	Nettozählrate des Messgeräts, die dem Grenzwert L_n einer nuklidspezifischen Oberflächenkontamination in s^{-1} entspricht
$C(A)_m^{\text{ind}}$	Kalibrierfaktor der indirekten Methode, bezogen auf die Aktivität für ein gegebenes Radionuklidgemisch m mit bekannten Radionuklidbestandteilen in $(\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2})/\text{s}^{-1}$

4 Methoden zur Bestimmung von Oberflächenkontaminationen

Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit der direkten Messung oder der indirekten Bestimmung von Oberflächenkontaminationen sind in starkem Maße von den jeweiligen Umständen abhängig [d. h. der physikalischen und chemischen Form einer Kontamination, deren Haftung an der Oberfläche (festhaftend oder nicht festhaftend), der Zugänglichkeit der Oberfläche für die Messung und dem Vorhandensein störender Strahlenfelder].

Die direkte Messung wird angewendet, wenn die Oberfläche unmittelbar zugänglich und einigermaßen sauber ist und wenn keine störenden Strahlenfelder wie erhöhter Untergrund vorliegen. Die direkte Messung wird benutzt, um das Vorhandensein von sowohl festhaftender als auch nicht festhaftender Kontamination festzustellen.

Die direkte Messung von Oberflächenkontaminationen wird in **ISO 7503-1** behandelt.

Die indirekte Bestimmung von Oberflächenkontaminationen ist allgemeiner anwendbar, wenn Oberflächen wegen ihrer Lage oder Anordnung schwer zugänglich sind, wenn störende Strahlungsfelder Kontaminationsmonitore ungünstig beeinflussen oder wenn Verfahren zur direkten Messung mit üblichen Messgeräten nicht verfügbar sind (z. B. bei Tritium). Die indirekte Methode kann jedoch keine festhaftenden Kontaminationen erfassen und liefert aufgrund der mit dem Entnahmefaktor verbundenen Messunsicherheiten nur konservative Bewertungen.

Die indirekte Bestimmung der Oberflächenkontamination wird in **ISO 7503-2** behandelt.

Da sowohl mit der direkten Messung als auch mit der indirekten Bestimmung von Oberflächenkontaminationen viele Unzulänglichkeiten verbunden sind, werden oft beide Verfahren nacheinander durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse den Messzwecken am besten gerecht werden.

5 Hauptmethodik der direkten Kalibrierung einschließlich Summenkorrektur

5.1 Allgemeines

Ziel dieses Abschnitts 5 ist es, die Interpretation von Messungen mit Oberflächenkontaminations-Messgeräten zu verdeutlichen. Trotz der Einfachheit solcher Messungen stößt man in nationalen und internationalen Normen sowie in Unterlagen von Herstellern auf eine verwirrende Vielfalt von Begriffen. Eine falsche Interpretation der Terminologie kann aber zu Fehlern in berichteten Messergebnissen oder zur Auswahl eines ungeeigneten Messgeräts führen.

Unterabschnitt 5.2 beginnt mit den grundlegenden Prinzipien einer Kalibrierung, erläutert die getroffenen Annahmen und verwendet diesen Ansatz, um die Unterschiede zwischen den für die Beschreibung der Geräteanzeige verwendeten Parametern aufzuzeigen.

Der P -Faktor, der die Art der zu überwachenden Oberfläche wiedergibt, wird in 5.3 eingeführt und in 5.4 diskutiert.

Kalibrierungen unter Verwendung von Kalibrierstrahlern nach ISO 8769 ermöglichen es, das energieabhängige Ansprechvermögen von Messgeräten, d. h. ihre Reaktion auf jede Emission, über einen breiten Energiebereich zu charakterisieren (5.5.1). Dadurch wird es möglich, das Ansprechvermögen von Messgeräten auf verschiedene Emissionen eines bestimmten Radionuklids zu interpolieren. Wird nun jede dieser Reaktionen auf einzelne Emissionen mit dem P -Faktor modifiziert (5.4), kann man sie für speziell vorliegende Radionuklide und Oberflächen kombinieren, um einen Faktor für das Ansprechvermögen des Messgeräts für diese Radionuklid-Oberflächen-Kombination als Reaktion je Bq cm^{-2} festzulegen (5.5.3).

5.2 Kalibrierung für Radionuklide bei Zerfalls-Schema mit Einzelemission

Für das Folgende wird davon ausgegangen, dass ein betrachtetes Radionuklid je Zerfall nur ein einzelnes Teilchen emittiert (z. B. ein reiner Betastrahler, der direkt in den Grundzustand des Tochternuklids zerfällt).

Wenn ein unendlich dünner Detektor mit einer wirksamen Messfläche S_p direkt über der zu überprüfenden Oberfläche angebracht wird, erfasst der Detektor nur die von der Oberfläche unmittelbar unter dem Messgerät emittierten Teilchen (d. h. keine Randeffekte). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen aus einer Oberfläche austritt, wird durch p_e angegeben. Jedes Teilchen, das auf die Messsonde trifft, wird mit einer Wahrscheinlichkeit ε erfasst. Die Nachweiswahrscheinlichkeit ε wird zur Vereinfachung der Diskussion hier als unabhängig von der Energie des Teilchens angenommen.

Um einen idealen Monitor zu kalibrieren, wird dieser über einem Kalibrierstrahler mit bekannter Oberflächenemissionsrate R_c und einer aktiven Fläche S_c (die größer als das Detektorfenster ist) angebracht. Nimmt man eine Untergrundzählrate von null an, ist die vom Messgerät angezeigte Zählrate:

$$\rho_c = \varepsilon \cdot \frac{R_c}{S_c} \cdot S_p \quad (1)$$

Wenn die Aktivität des Kalibrierstrahlers A_c ist, ergibt sich $R_c = A_c \cdot p_c$ und die Gleichung lautet dann

$$\rho_c = \varepsilon \cdot \frac{A_c \cdot p_c}{S_c} \cdot S_p \quad (2)$$

Wird das Messgerät nunmehr über einer Oberfläche angebracht, die gleichförmig mit demselben Radionuklid wie der Kalibrierstrahler kontaminiert ist (über eine Fläche, die größer als die Detektorfläche ist), ergibt sich eine Zählrate von

$$\rho' = \varepsilon \cdot \frac{R'}{S'} \cdot S_p \quad (3)$$

wobei sich die mit ' gekennzeichneten Parameter auf die kontaminierte Oberfläche beziehen.

Die Oberflächenemissionsrate je Flächeneinheit der kontaminierten Oberfläche ergibt sich aus

$$\frac{R'}{S'} = \rho' \cdot \left(\frac{A_c}{S_c} \right) \cdot \left(\frac{p_c}{\rho_c} \right) \quad (4)$$

Unter der Annahme, dass der Zusammenhang zwischen der Aktivität der kontaminierten Oberfläche und der gemessenen Emissionsrate durch die Gleichung $R' = A'_s \cdot p'_e$ gegeben ist, folgt

$$\frac{A'_s}{S'} = \rho' \cdot \frac{1}{p'_e} \cdot \left(\frac{A_c}{S_c} \right) \cdot \left(\frac{p_c}{\rho_c} \right) \quad (5)$$

Man kann erkennen, dass die obigen Gleichungen Ausdrücke beinhalten, die das Gerät (ε und S_p) (siehe Tabelle 1) bzw. die zu überprüfende Oberfläche (p_e) (siehe Tabelle 2) beschreiben. Der zuletzt genannte Ausdruck bezieht sich auf den „P-Faktor“ (siehe 5.3).

Die Größen in den obigen Gleichungen können kombiniert werden, um einen Parameter zu erhalten, der das Gerät beschreibt, den Ansprechfaktor des Messgeräts, und einen Parameter, der die zu überprüfende Oberfläche beschreibt. Faktoren für das Ansprechvermögen von Messgeräten wurden im Laufe der Zeit auf verschiedene Weise definiert und sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Drei dieser Definitionen sind unabhängig von der Oberflächenstruktur des Kalibrierstrahlers, vorausgesetzt, dass das Ansprechvermögen mit Kalibrierstrahlern ermittelt wurden, die je Zerfall ein einzelnes Teilchen emittieren. Das Ansprechvermögen bezogen auf die Aktivität des Messgeräts $I(A)$ und der Kalibrierfaktor bezogen auf die Aktivität $C(A)$ hängen sowohl von der Charakteristik des Messgeräts als auch von der Art der Oberfläche des Kalibrierstrahlers (angegeben als p_c) ab.

Tabelle 1 – Größen zur Beschreibung des Messgeräts

Definition	Formelzeichen	Gleichung	Beschreibung
Ansprechvermögen des Messgeräts	ε	$\varepsilon = \rho_c \cdot \left(\frac{S_c}{R_c} \right) \cdot \left(\frac{1}{S_p} \right)$	Ansprechvermögen des Messgeräts = angezeigte Zählrate je Oberflächenemissionsrate unter dem Detektorfenster
Ansprechvermögen des Messgeräts bezogen auf die Oberflächenemission	$I(E)$	$I(E) = \varepsilon \cdot S_p = \rho_c \cdot \left(\frac{S_c}{R_c} \right)$	Ansprechvermögen des Messgeräts mal Fensterfläche = angezeigte Zählrate je Oberflächenemissionsrate je Flächeneinheit
Ansprechvermögen des Messgeräts bezogen auf die Aktivität	$I(A)$	$I(A) = \varepsilon \cdot S_p \cdot p_c = \rho_c \cdot \left(\frac{S_c}{R_c} \right) \cdot p_c$	Ansprechvermögen des Messgeräts mal Fensterfläche mal Wahrscheinlichkeit, mit der ein Teilchen die Strahloberfläche verlässt = angezeigte Zählrate je Bq je Flächeneinheit
Kalibrierfaktor bezogen auf die Oberflächenemission	$C(E)$	$C(E) = \frac{1}{\varepsilon \cdot S_p} = \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\frac{R_c}{S_c} \right)$	Kehrwert des Ansprechvermögens mal Fensterfläche
Kalibrierfaktor bezogen auf die Aktivität	$C(A)$	$C(A) = \frac{1}{\rho \cdot S_p \cdot p_c} = \frac{1}{\rho_c} \cdot \left(\frac{R_c}{S_c} \right) \cdot \frac{1}{p_c}$	Kehrwert des Ansprechvermögens mal Fensterfläche mal Wahrscheinlichkeit, mit der ein Teilchen die Strahloberfläche verlässt

Tabelle 2 – Größen zur Beschreibung der Oberfläche

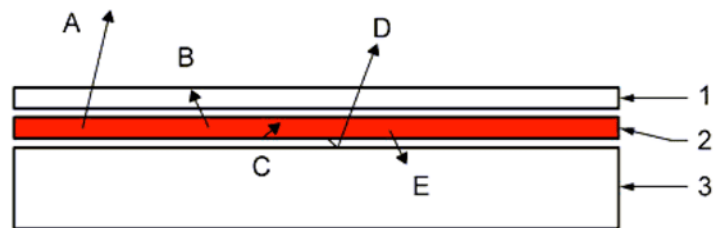
Größe	Formelzeichen	Beschreibung
Oberflächenemissionsrate des Kalibrierstrahlers	R_c	Oberflächenemissionsrate von Teilchen oder Photonen
<i>P</i> -Faktor	$P \left(= \frac{1}{p_e} \right)$	Kehrwert der Wahrscheinlichkeit der Teilchenemission

5.3 *P*-Faktor für Radionuklide mit einem einfachen Zerfallsschema

Das Konzept des *P*-Faktors wurde ursprünglich in der in Literaturhinweis [3] beschriebenen Entwicklung eingeführt.

ANMERKUNG Der *P*-Faktor nach [3] wurde geschaffen, um die Messung einer Oberflächenemissionsrate an einer Kalibrierquelle nach **ISO 8769** in eine Aktivität umzurechnen. Da solche Kalibrierquellen nur jeweils ein Radionuklid mit hauptsächlich einer einzelnen Emission mit 100 % Emissionswahrscheinlichkeit enthalten, kann der *P*-Faktor in einfacher Weise für diese Umrechnung verwendet werden. Der *P*-Faktor ist im Wesentlichen der Kehrwert von p_e (Tabelle 2). Die ursprüngliche Definition: „Der *P*-Faktor ist das Verhältnis zwischen der Aktivität je Flächeneinheit eines Strahlers und seiner Oberflächenemissionsrate je Flächeneinheit“ ist korrekt, gilt jedoch nur für Kalibrierstrahler nach **ISO 8769** mit Einzel-emission.

Bild 1 zeigt verschiedene von einer kontaminierten Oberfläche ausgehenden Emissionsprozesse, die bei der Ermittlung des *P*-Faktors eine Rolle spielen.



Legende

- A von der Oberfläche emittiertes Teilchen/Photon
- B in der Oberflächenverschmutzung absorbiertes Teilchen/Photon (siehe Tabellen 3 und 4)
- C in der aktiven Schicht absorbiertes Teilchen/Photon (siehe Tabellen 3 und 4)
- D vom Trägermaterial zurückgestreutes Teilchen/Photon (siehe Tabellen 3 und 4)
- E im Trägermaterial absorbiertes Teilchen/Photon
- 1 Oberflächenverschmutzung
- 2 aktive Schicht
- 3 Trägermaterialschicht

Bild 1 – Schematische Darstellung der Emissionsprozesse an der Oberfläche eines Strahlers

Die relative Stärke der Beiträge der Effekte B, C und D zum *P*-Faktor ist in den Tabellen 3 und 4 angegeben. Zu den Tabellen 3 und 4 siehe [4].

Tabelle 3 – Unterschiedliche Abschwächungseffekte je nach Art und Energie der Emissionen
(nur zur Veranschaulichung)

Effekt	P-Faktor-komponente	Betroffener Teilchentyp	Stärke des Effekts
Rückstreuung	D	Betateilchen mit hoher Energie	Erhöht die Oberflächenemission von Betateilchen hoher Energie bei einem Trägermaterial mit hoher Ordnungszahl (z. B. Stahl) um 10 % bis 20 %
Selbstabsorption	C	Alphateilchen	Verringert die Oberflächenemission um mindestens den Faktor 2
		Betateilchen mit niedriger Energie (0,15 bis 0,4) MeV	Selbst sehr dünne Schichten verursachen eine erhebliche Verringerung der Oberflächenemissionsrate
		Betateilchen mit hoher Energie	Die Oberflächenemission bleibt bei dünnen Schichten ($< 1 \text{ mg cm}^{-2}$) unbeeinflusst
Oberflächenbeschichtung	B (siehe Tabelle 4)	Alphateilchen	Eine Schichtdicke von 5 mg cm^{-2} absorbiert Alphastrahlung vollständig
		Betateilchen mit niedriger Energie	Eine Schichtdicke von 5 mg cm^{-2} verringert die Oberflächenemission um mindestens den Faktor 2
		Betateilchen mit hoher Energie	Eine Schichtdicke von 5 mg cm^{-2} verringert die Oberflächenemission um 30 %
Störstrahlung			Störende Einwirkungen von Gamma-Strahlung sind möglich, jedoch üblicherweise nur mit geringem Effekt (typischerweise 1 % für $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$)

Tabelle 4 – Relative Transmissionsfaktoren von Oberflächenbeschichtungen
(nur zur Veranschaulichung)

Oberflächenbeschichtung	Masse je Flächeneinheit [mg cm^{-2}]	Typisches Nuklid und Strahlungsart				
		^{238}Pu Alphas	^{14}C Weiche Betas	^{36}Cl Mittlere Betas	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ N1) Mittlere und harte Betas	^{55}Fe 5,9-keV-Photonen
		Prozentualer Transmissionsfaktor				
Autolack	2,6	10	50	90	95	30
Rostschutzfarbe	4,0	0	30	90	95	35
Überzugslack	2,4	10	50	90	95	50
Holzlack	1,4	30	60	95	100	70
Möbelpolitur	0,1	90	95	100	100	95
Aufgetragenes Öl	1,3	30	70	95	100	70
Abgewischtes Öl	0,14	90	95	100	100	95
Aufgetragenes Fett	1,8	20	60	95	100	60
ANMERKUNG Die Farbaufträge bestehen nur aus einer Schicht. Die Politur besteht aus zwei Schichten. Alle sind entsprechend den Angaben des Herstellers aufgetragen.						

N1) Nationale Fußnote: Bezeichnung in Deutschland nach StrlSchV: Sr-90+.

In einer idealen Situation ist die Kontamination auf eine unendlich dünne Schicht beschränkt, und es treten keine Streueffekte auf. Unter diesen Umständen wird genau die Hälfte der infolge des radioaktiven Zerfalls entstehenden Emissionen austreten und auf den Detektor treffen. In denjenigen Fällen, in welchen nur eine Emission je Zerfall auftritt, hat der P -Faktor den Wert 2, und die Aktivität je Flächeneinheit ist das Zweifache der Emissionsrate je Flächeneinheit, die der Detektor anzeigt.

Unterabschnitt 5.4 beschäftigt sich mit der Berechnung des P -Faktors für Radionuklide mit komplexem Zerfallsschema.

5.4 P -Faktoren für Radionuklide mit komplexem Zerfallsschema

Bei der Mehrzahl der Radionuklide liegt kein einfaches Zerfallsschema vor, und es kann vielfältige Verzweigungen vom Mutternuklid zum Grundzustand geben, einschließlich der Emission von Photonen, Konversionselektronen und Sekundäremissionen wie Röntgenstrahlung und Auger-Elektronen. Für jeden einzelnen Zerfallsprozess ist es möglich, dass mehr als eine Emission erzeugt wird, wie z. B. ein Betateilchen und ein anschließendes Gammaquant.

Das Messgerät kann einzelne oder alle von einem einzelnen Zerfall stammenden Emissionen erfassen, doch wird nur ein Ereignis registriert, da alle Emissionen zur gleichen Zeit auftreten. Das ist der Hauptgrund dafür, dass die Interpretation der Anzeigewerte eines Oberflächenkontaminations-Messgeräts so kompliziert ist. Das bedeutet, dass es falsch ist, die Nachweiswahrscheinlichkeiten ohne Korrektur der Summation aufzuaddieren.

Bei der Ermittlung eines geeigneten Kalibrierfaktors (in $\text{Bq cm}^{-2}/\text{s}^{-1}$) für ein bestimmtes Radionuklid ist es notwendig, die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Emissionen, die Auswirkung der Oberflächenstruktur auf jede separate Emission und die Nachweiswahrscheinlichkeit für die gleichzeitige Messung einzelner oder aller Emissionen von einem einzelnen Zerfall zu berücksichtigen. Die Ermittlung eines geeigneten Faktors für das Ansprechvermögen des Messgeräts ist deshalb für die meisten Radionuklide eine komplexe Aufgabe, weil es nicht möglich ist, denselben P -Faktor für jede am Zerfall beteiligte Emission anzuwenden, und die grob vereinfachende Definition des P -Faktors ist nicht anwendbar.

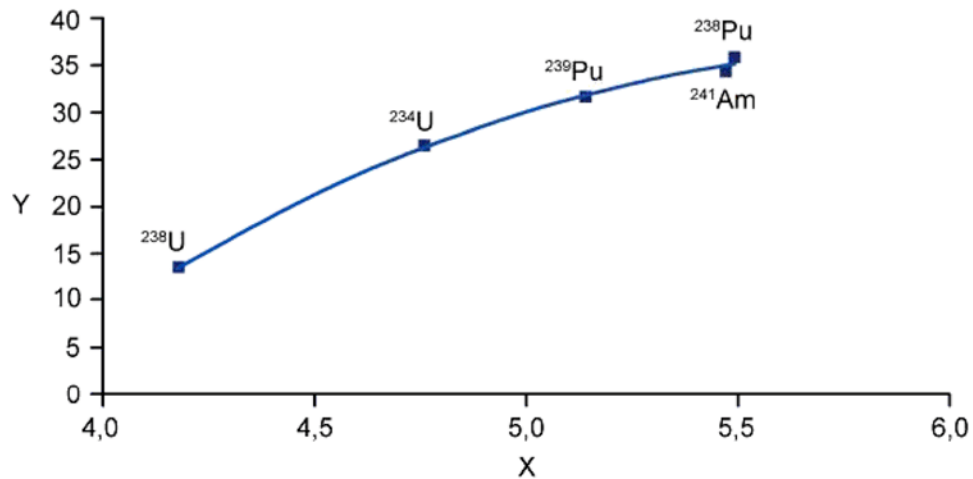
In der Praxis können bei Messungen üblicherweise größere Unsicherheiten (mehrere zig Prozent) toleriert werden, da die Messungen oft nur als Übersichtsmessung oder zur Sicherheit als Wiederholung durchgeführt werden. Dennoch ist es erforderlich, die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse und den angewendeten Algorithmus zu verstehen, um grobe Fehler zu vermeiden. Die nachstehende Behandlung des Themas soll eine allgemeine Vorgehensweise zur Bestimmung von Kontaminationen auf solider Grundlage vermitteln.

Es wird ein zusätzlicher Faktor, der „Austrittsfaktor einer Strahlenquelle“, eingeführt, der das Verhältnis der Erzeugung einzelner Emissionen zu dem Anteil derjenigen Emissionen charakterisiert, die von der Oberfläche austreten. Dieser Faktor soll mit $E_{i,j}$ für die relevante Energie i und Emission von Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung j bezeichnet werden. Für jede Emission kann nun wiederum ein geeigneter Wert von $E_{i,j}$ bestimmt und dieser mit der Emissionswahrscheinlichkeit je Zerfall und der Gesamtauswirkung aller Emissionen eines Zerfalls unter Berücksichtigung der Möglichkeit eines Nachweises in Koinzidenz kombiniert werden.

5.5 Allgemeine Abschätzung des Ansprechvermögens des Messgeräts

5.5.1 Bestimmung des energieabhängigen Ansprechvermögens des Messgeräts

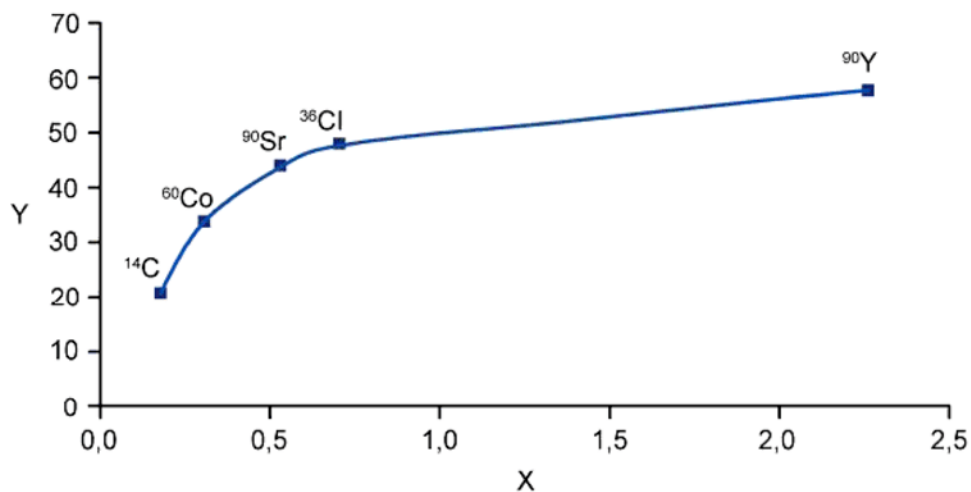
Der erste Schritt ist die Bestimmung des Ansprechvermögens des Messgeräts (5.2) als Funktion der Energie für die drei Strahlungsemissionsarten Alpha-, Beta- und Photonenstrahlung. Beispiele für das Ansprechvermögen von Messgeräten sind in den Bildern 2, 3 und 4 dargestellt.

**Legende**

X Alphaenergie (MeV)

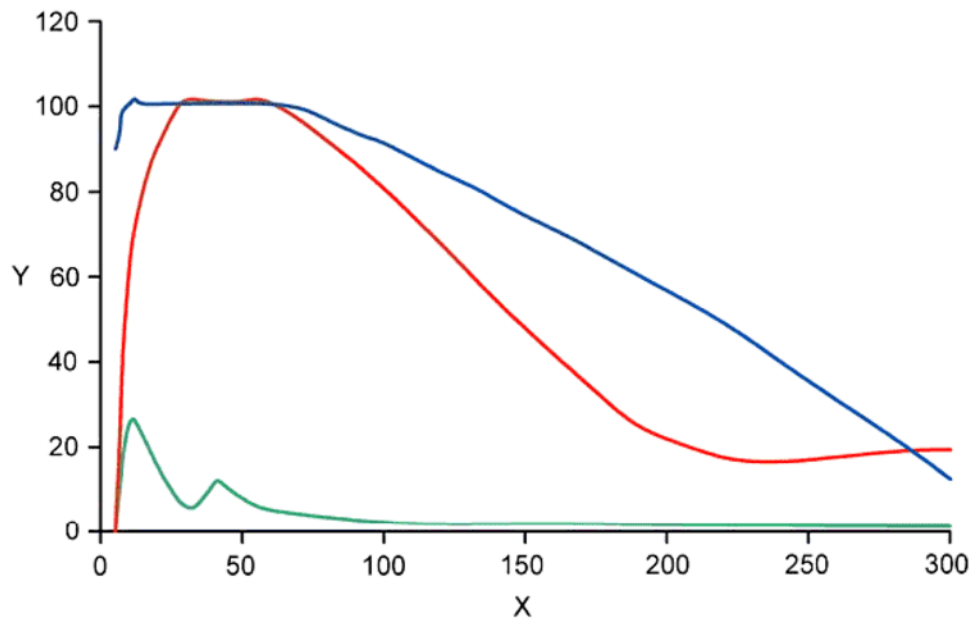
Y Ansprechvermögen des Messgeräts (%)

Bild 2 – Ansprechvermögen des Messgeräts als Funktion der Alphaenergie
(nur zur Veranschaulichung)

**Legende**X Betaenergie E_{max} (MeV)

Y Ansprechvermögen des Messgeräts (%)

Bild 3 – Ansprechvermögen des Messgeräts als Funktion der Betaenergie
(nur zur Veranschaulichung)



Legende

X	Photonenenergie (MeV)
Y	Ansprechvermögen des Messgeräts (%)
—	NaI-Detektor, 3 mm dick, Be-Fenster 47 mg cm ⁻²
—	NaI-Detektor, 2 mm dick, Al-Fenster 14 mg cm ⁻²
—	Xe-Gasdetektor, 20 mm dick, Ti-Fenster 5 mg cm ⁻²

Bild 4 – Ansprechvermögen des Messgeräts als Funktion der Photonenenergie
(nur zur Veranschaulichung)

5.5.2 Modellierung der Zerfallspfade des interessierenden Radionuklids

In jedem vollständigen Zerfallspfad kann mehr als eine Emission auftreten, die jedoch üblicherweise gleichzeitig (in Kaskaden) emittiert werden und zu denen der Detektor nur einen Impuls erzeugt, selbst wenn mehr als eine Emission erkannt wurde. Es muss sichergestellt sein, dass in den Berechnungen doppelte (oder gar mehrfache) Zählungen ausgeschlossen sind.

Zunächst wird deshalb jeder Zerfallspfad (Kaskade) des Radionuklids separat behandelt. Beispielsweise hat ⁶⁰Co eine Kaskade (Betazerfall gefolgt von zwei Gammas), während ¹³¹I sechs Betazweige aufweist, wobei jedem dieser Zweige die Emission verschiedener Kombinationen von Photonen, Konversionselektronen, Auger-Elektronen und Röntgenstrahlung folgt. Im letzteren Fall entstehen Dutzende individuelle Zerfallspfade, und mit jedem Pfad müssen verschiedene Werte von $E_{i,j}$ für die verschiedenen Emissionen eingesetzt werden. Aufgrund der relativ groben Genauigkeitsanforderungen in der Strahlungsüberwachung kann die Aufgabe jedoch durch Einführung verschiedener Gruppierungen und Schwellenwerte entsprechend nachstehender Auflistung vereinfacht werden.

Generell sind folgende Prozessschritte durchzuführen:

- Identifizierung jedes vollständigen sequenziellen Zerfallspfad für das Radionuklid und Bestimmung seiner Häufigkeit;
- Bestimmung des Detektor-Ansprechvermögens für jede Emission (Alpha, Beta, Gamma) im betreffenden Zerfallspfad;
- Bestimmung des relevanten E -Faktors für jede Emission anhand der Art der kontaminierten Oberfläche;
- Berechnung des Gesamt-Ansprechvermögens für jeden vollständigen sequenziellen Zerfallspfad.

Als Beispiel kann ein typisches Zerfallsschema (Bild 5) betrachtet werden, das eine für viele Radionuklide typische Komplexität aufweist. Der hier dargestellte Zerfall ist zunächst ein Betazerfall, doch gilt die Methode gleichermaßen für Radionuklide, bei denen die Sequenz mit einem Alphazerfall oder einem Elektroneneinfang eingeleitet wird.

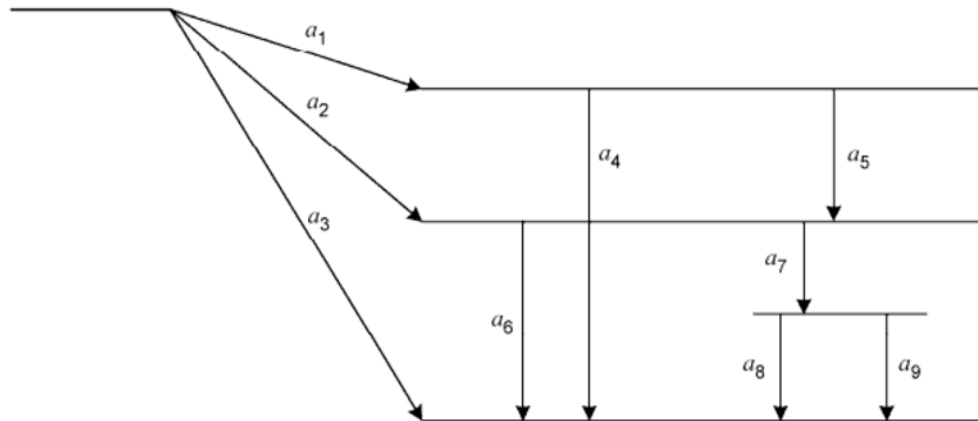


Bild 5 – Typisches Zerfallsschema

Wenn für die relevante Emission i mit einer Energie e das energiespezifische Ansprechvermögen des Messgeräts, $\varepsilon_{i,j}$, und ein geeigneter Austrittsfaktor $E_{i,j}$ definiert sind, kann das Zerfallsschema in tabellarischer Form zusammengefasst werden, wie in Tabelle 5 gezeigt, wobei die Häufigkeit des Zerfallspfads einen Anteil der Zerfallsereignisse ab einem bestimmten Zustand darstellt.

Tabelle 5 – Zerfallsschema in tabellarischer Form

Komponenten des Pfads	Art des Zerfalls	Ansprechvermögen des Detektors	Austrittsfaktor
a_1	Beta mit niedriger Energie	ε_1	$E_{1,\beta}$
a_2	Beta mit mittlerer Energie	ε_2	$E_{2,\beta}$
a_3	Beta mit hoher Energie	ε_3	$E_{3,\beta}$
a_4	Gamma mit hoher Energie	ε_4	$E_{4,\gamma}$
a_5	Gamma mit mittlerer Energie	ε_5	$E_{5,\gamma}$
a_6	Gamma mit mittlerer Energie	ε_6	$E_{6,\gamma}$
a_7	Innere Konversion	ε_7	$E_{7,\gamma}$
a_8	K-Röntgenstrahlung	ε_8	$E_{8,\gamma}$
a_9	L, M, N ... Röntgenstrahlung und K, L, M, N ... Auger-Elektronen	ε_9	$E_{9,\gamma}$

Es gibt acht vollständige Pfade zum Grundzustand, und wenn jede vollständige Pfadhäufigkeit als k_i definiert ist, ergeben sich diese wie in Tabelle 6 angegeben.

Tabelle 6 – Imaginäres Beispiel für die mit jedem Zerfallspfad verbundenen Wahrscheinlichkeiten

Häufigkeit des Zerfallspfads	Komponenten des Pfads	
k_1	$a_1 \cdot a_4$	Σk_i ist gleich der gesamten Zerfallswahrscheinlichkeit
k_2	$a_1 \cdot a_5 \cdot a_6$	
k_3	$a_1 \cdot a_5 \cdot a_7 \cdot a_8$	
k_4	$a_1 \cdot a_5 \cdot a_7 \cdot a_9$	
k_5	$a_2 \cdot a_6$	
k_6	$a_2 \cdot a_7 \cdot a_8$	
k_7	$a_2 \cdot a_7 \cdot a_9$	
k_8	a_3	

Betrachtet werden im Folgenden die zwei Pfadhäufigkeiten: k_8 und k_4 .

Für die Pfadkomponente a_3 ergibt sich das Ansprechvermögen des Messgeräts bezogen auf die Aktivität als:

$$I(A) = \frac{k_8 \cdot \varepsilon_3 \cdot S_p}{E_{3,\beta}} \quad (6)$$

Dabei ist

S_p die effektive Sondenfläche.

Einheit: $[s^{-1}/(Bq \cdot cm^{-2})]$

Dies ist analog zu der Situation mit einem reinen Betastrahler (z. B. ^{14}C). In diesem Fall, unter der Annahme, dass keine Abschwächung durch die Strahlenquelle vorliegt, werden $k_8 = 1$ und $E_{3,\beta} = 2$, was die Gleichung vereinfacht zu:

$$I(A)_{C-14} = \frac{\varepsilon_3 \cdot S_p}{2} \quad (7)$$

Für Pfad k_4 ist die Situation komplizierter. Der Faktor $I(A)$ für jeden Teil des Pfads kann in gleicher Weise wie oben ausgedrückt werden, jedoch muss jetzt ein Kaskadeneffekt berücksichtigt werden. Wird eine der vier verschiedenen Emissionen erfasst, wird ein Impuls registriert (das Gerät kann auch andere Emissionen in der Kaskade erfassen, doch wird nur ein Impuls registriert). Das Ansprechvermögen beträgt deshalb 1 minus die Wahrscheinlichkeit einer Nichterkennung irgendeiner dieser Emissionen, was gleich dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Nichterkennung jeder einzelnen Emission ist. Die relevanten E -Faktoren müssen ebenso einbezogen werden, und die Wahrscheinlichkeit der Registrierung eines Impulses für diesen Pfad kann ausgedrückt werden als:

$$1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1}{E_{1,\beta}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_5}{E_{5,\gamma}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_7}{E_{7,\beta}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_9}{E_{9,\gamma}}\right) \quad (8)$$

In den meisten praktischen Fällen wird die obige Gleichung vereinfacht, indem nur einer der Ausdrücke benutzt wird (entsprechend der Emission der Kaskade mit der höchsten Nachweiswahrscheinlichkeit). Daraus ergibt sich eine Unterschätzung des Ansprechvermögens, was zu einer Überschätzung der Aktivität auf der Oberfläche führt, was wiederum für Strahlenschutz- bzw. Freigabezwecke ein akzeptables konservatives Ergebnis liefert.

5.5.3 Bestimmung des Gesamt-Ansprechvermögens eines Messgeräts

Für den gesamten Radionuklidzerfall werden die Wahrscheinlichkeiten der Erkennung von mindestens einer Emission von jedem vollständigen Pfad addiert und dann mit den vollständigen Pfadhäufigkeiten kombiniert. Das Aktivitäts-Ansprechvermögen des Messgeräts kann dann allgemein ausgedrückt werden als:

$$I(A) = S_p \cdot \sum_{l=1}^n k_l \left\{ 1 - \prod \left(1 - \frac{\varepsilon_{ij}}{E_{ij}} \right) \right\} \quad (9)$$

wobei l die verschiedenen vollständigen Pfadhäufigkeiten und i die individuellen Emissionen in jedem vollständigen Pfad angeben.

Einige typische Radionuklide wurden untersucht, und für jedes Radionuklid wurden zwei verschiedene Oberflächengegebenheiten betrachtet. Die detaillierten Analysen sind in [Anhang B](#) wiedergegeben.

5.5.4 Alternative Bestimmung des Gesamt-Ansprechvermögens eines Messgeräts

Die Identifizierung jedes vollständigen sequenziellen Zerfallspfads für das interessierende Radionuklid und die Bestimmung seiner Häufigkeit sind komplex und sollten durch einen geübten Experten erfolgen. Kalibrierlabore, die innerhalb möglichst kurzer Zeit Messgeräte für verschiedene Radionuklide kalibrieren müssen, benötigen möglicherweise ein einfacher anzuwendendes Kalibrierverfahren.

Ein vereinfachtes Kalibrierverfahren wird daher in [Anhang A](#) angegeben. Dieses basiert auf der Klassifizierung der Daten von Teilchen- und/oder Photonenemissionen des interessierenden Radionuklids im spezifischen Energiebereich [5]. Die Daten von Teilchen- und/oder Photonenemissionen von Radionukliden sind in den meisten Nukliddatenbanken tabellarisch erfasst und können daher einfach für Berechnungszwecke herangezogen werden. Ein Vergleich von Berechnungsbeispielen einer Kalibrierung nach 5.5.2 und nach [Anhang A](#) wird in [Anhang B](#) gegeben.

5.6 Folgerungen

Aus den obigen Ausführungen und den in [Anhang B](#) enthaltenen Beispielen geht hervor, dass ein P -Faktor in der ursprünglichen Definition nicht für Radionuklide anwendbar ist, die komplexe Zerfallsmuster aufweisen. Ein Versuch, den Faktor neu zu definieren, würde nur Verwirrung stiften. Deshalb wurde hier versucht, das Ansprechvermögen eines Messgeräts aus grundsätzlichen Prinzipien zu bestimmen.

In Abschnitt 5 wurden Gleichungen hergeleitet, um die von einem Oberflächenkontaminationsmonitor abgelesene Impulszählrate von Impulsen je Sekunde in Bq cm^{-2} umzurechnen, wobei von der Annahme ausgegangen wird, dass das auf der Oberfläche vorhandene Radionuklid bekannt ist; das energieabhängige Ansprechvermögen eines Monitors kann abgeschätzt werden, und Kenntnisse über die Oberfläche und die Tiefenverteilung des Radionuklids liegen vor.

Messungen der Oberflächenkontamination unterliegen hohen Unsicherheiten und sollten eher als qualitative Werte betrachtet werden und nicht als quantitative Werte. Die Gleichungen in Abschnitt 5 sollen den Leser in die Lage versetzen zu überprüfen, ob die Messungen für den beabsichtigten Zweck geeignet sind.

6 Prüfbericht

Alle ausgestellten Prüfberichte sollten die Anforderungen der ISO/IEC 17025 erfüllen und folgende Angaben enthalten:

- eine Überschrift wie „Kalibrierzertifikat“ oder „Prüfbescheinigung“;
- Name und Adresse des Kunden;
- Bezeichnung des Messgeräts (einschließlich Typ und Seriennummer);

ANMERKUNG Viele Kontaminationsmonitore bestehen aus dem eigentlichen Messgerät und einer anschließbaren Messsonde. Beide werden üblicherweise als ein Messgerät kalibriert. Daher sollte sich das Kalibrierzertifikat auf beides beziehen: Sonde und Messgerät.