

Anlage 3

Anwendungsbeispiele

Allgemeines

Die nachfolgenden Beispiele erläutern die zur Vorberereitung einer Kontaminationskontrolle erforderlichen Schritte. Es wird gezeigt, wie bei Vorliegen eines Einzelnuclides oder eines Radionuclidgemisches, das aus zwei oder mehr Einzelnucliden bestehen kann, zu verfahren ist. Die Abfolge der Vorbereitungsschritte entspricht dem in Anlage 2 Diagramm 1 dargestellten Schema.

Die Werte der Oberflächenkontamination gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 4 der Strahlenschutzverordnung werden im folgenden vereinfacht als *Werte der Oberflächenkontamination* bezeichnet.

Bei Vorliegen eines Radionuclidgemisches wird für jedes Radionuclid eine dem *Wert der Oberflächenkontamination* äquivalente Größe berechnet, die sowohl den prozentualen Aktivitätsanteil des Radionuclids im Gemisch als auch dessen radiologische Wichtung impliziert. Diese Größe ist der gewichtete und normierte Kontaminationswert eines Einzelnuclids in einem Gemisch; die Summe dieser Werte ergibt den für das Gemisch zu ermittelnden effektiven Kontaminationswert. Die Bedeutung des effektiven Kontaminationswertes ist der Bedeutung der *Werte der Oberflächenkontamination* adäquat: Mit der Kontaminationsmessung ist nachzuweisen, dass für ein Einzelnuclid der *Wert der Oberflächenkontamination* und für ein Radionuclidgemisch der effektive Kontaminationswert nicht überschritten wird.

Zum Nachweis einer flächenbezogenen Aktivität in Höhe des *Wertes der Oberflächenkontamination* bzw. des effektiven Kontaminationswertes muss ein Kontaminationsmessgerät mindestens ein Oberflächenansprechvermögen in Höhe von S_{\min} aufweisen. Das in der Praxis ersichtbare Oberflächenansprechvermögen des Gerätes muss größer als S_{\min} sein, damit das Gerät für die Messaufgabe geeignet ist.

In Tabelle A ist beispielhaft das in der Praxis erreichbare Oberflächenansprechvermögen von Großflächenproportionalzählern mit Kohlenwasserstoffen als Zählgas für eine Reihe ausgewählter Radionuclide angegeben. Die Werte beziehen sich auf ein gebräuchliches festinstalliertes Hand-Fuß-Kontaminationsmessgerät. Einzelheiten zu den Messbedingungen, unter denen die Werte bestimmt wurden, enthält der Bericht "Erfassung von Personenkontaminationen in Höhe der Grenzwerte der Flächenkontamination nach Anlage IX StrlSchV ..." des Forschungszentrums Jülich; 2578, September 1992, ISSN 0366-0885.

Tabelle A

Radionuclid	Oberflächenansprechvermögen; $s^{-1} Bq^{-1} cm^2$	
	$S(\alpha)$	$S(\alpha+\beta)$
5 C-14		7,9
9 F-18		22
11 Na-22		19
15 P-32		21
15 P-33		11
16 S-35		7,7
17 Cl-36		21

Radionuklid	Oberflächenansprechvermögen; s ⁻¹ Bq ⁻¹ cm ²	
	S(α)	S(α+β)
20 Ca-45		11
24 Cr-51		0,10
25 Mn-54		0,31
26 Fe-55		0,11
27 Co-57		0,67
27 Co-58		3,4
27 Co-60		13
28 Ni-63		0,73
29 Cu-64		11
30 Zn-65		0,53
31 Ga-67		2,8
34 Se-75		0,74
34 Se-79		8,6
35 Br-77		0,49
38 St-89		21
38 Sr-90+		19
39 Y-90		21
40 Zr-88		0,65
40 Zr-93		1,3
40 Zr-95		14
41 Nb-93m		<0,01
41 Nb-94		18
41 Nb-95		6,9
43 Tc-99m		1,3
43 Tc-99		13
42 Mo-99		20
44 Ru-103+		9,8
47 Ag-106m		1,2
49 In-111		2,4
44 Ru-106+		<0,01
47 Ag-110m+		7,7
47 Ag-111		21
51 Sb-124		19
51 Sb-125		11
51 Sb-127		21
53 I-123		2
53 I-125		0,06

Radionuklid	Oberflächenansprechvermögen; s ⁻¹ Bq ⁻¹ cm ²	
	S(α)	S(α+β)
53 I-126		9,9
53 I-131		19
55 Cs-134		16
55 Cs-137+		20
58 Ce-141		18
58 Ce-144+		12
61 Pm-147		9,2
62 Sm-147	<0,01	<0,01
63 Eu-152		9,1
63 Eu-154		21
68 Er-169		13
75 Re-186m		0,38
75 Re-186		21
75 Re-187		<0,01
75 Re-188		22
80 Hg-194		0,05
81 Tl-201		2
81 Tl-204		20
82 Pb-210		0,01
83 Bi-210m+	7	10
83 Bi-210		21
88 Ra-224	16	16
88 Ra-226	5,4	5,7
88 Ra-228		<0,01
90 Th-228	13	14
90 Th-229	6,4	11
90 Th-230	4,9	5,2
90 Th-232	1,2	1,2
92 U-234	5,3	5,3
92 U-235	3,5	4,8
92 U-236	4	4
92 U-238+	2,4	2,4
93 Np-236		8,1
93 Np-237	5,4	6,8
94 Pu-236	17	17
94 Pu-238	14	14
94 Pu-239	9,7	9,7

Radionuklid	Oberflächenansprechvermögen; s ⁻¹ Bq ⁻¹ cm ²	
	S(α)	S(α+β)
94 Pu 241		<0,01
95 Am-241	14	14

1 Kontaminationskontrolle bei Tc-99m

Technetium-99m ist ein reiner Photonenstrahler mit einer dominierenden Gammakomponente $E_\gamma = 141 \text{ keV}$ (89%). Dieses Radionuklid wird nahezu ausschließlich für nuklearmedizinische Untersuchungen verwendet. Kontaminationen erfolgen überwiegend im Bereich der Hände. Zur Kontaminationskontrolle wird ein handelsübliches stationäres Kontaminationsmessgerät mit Xenonzählrohr verwendet, in vorliegendem Beispiel mit linearem Ratemeter ohne Nulleffeksubtraktion. Eine Alarmschwelle ist nicht vorgesehen; die Entscheidung über eine Überschreitung der Alarmschwelle wird durch Ablesen der angezeigten Impulsrate getroffen.

Der Wert der Oberflächenkontamination beträgt $O_{\text{Tc-99m}} = 10 \text{ Bq cm}^{-2}$. Zur Vorbereitung der Kontaminationskontrolle ist gemäß Anlage 2 Diagramm 1 der Empfehlung zu verfahren.

Schritt 1: Auswahl der repräsentativen Messfläche (Abschnitt 2.2.1)

Repräsentative Messfläche sind die Hände.

Schritt 2: Ermittlung des Nulleffektes (Abschnitt 2.1.2.2)

Die Zeitkonstante des Kontaminationsmessgerätes beträgt $\tau = 3 \text{ s}$. Als Messzeit für die Ermittlung der Nulleffektzählrate wird das Zehnfache der Zeitkonstante gewählt; die Messzeit des Nulleffektes beträgt $t = 30 \text{ s}$. Die Nulleffekt-Zählrate von $n_0 = 20 \text{ s}^{-1}$ wird durch Ablesung am Ratemeter ermittelt.

Schritt 3: Messung mit Prüfstrahler (Abschnitt 2.1.2.3)

In diesem und den nachfolgenden Schritten wird geprüft, ob das gewählte Kontaminationsmessgerät in Verbindung mit einem geeigneten Prüfstrahler den Messanforderungen gerecht wird.

Zum Nachweis eines Photonenstrahlers wie Tc-99m ist ein Xenonzählrohr geeignet; als Prüfstrahler wird die Verwendung von Sr-90/Y-90 empfohlen. Das Oberflächenansprechvermögen eines Xenonzählrohres bei einem Sr-90/Y-90-Prüfstrahler beträgt gemäß Herstellerangabe $S = 20 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$.

Schritt 4: Ermittlung der "kleinsten nachweisbaren Kontamination" (Abschnitt 2.1.2.4)

Für die vorliegende Messanordnung und einen Sr-90/Y-90-Prüfstrahler wird nach Formel (4) als kleinste nachweisbare Kontamination errechnet:

$$k_{1\text{min}} = \frac{3,3}{S} \sqrt{\frac{n_0}{\tau}} = \frac{3,3}{20} \sqrt{\frac{20}{3}} \cong 0,4 \text{ Bq cm}^{-2}$$

Schritt 5: Geeignet im Sinne des Abschnitts 2.1.1?

Das vorgesehene Messgerät ist im Sinne des Abschnitts 2.1.1 geeignet. Eine flächenbezogene Sr-90/Y-90-Aktivität von 10 Bq cm^{-2} , die dem Wert der Oberflächenkontamination des im Prüfstrahler verwendeten Radionuklids entspricht, ist mit der im Routinebetrieb eingestellten Zeitkonstante $\tau = 3 \text{ s}$ nachweisbar, denn

$$k_{1\text{min}} = 0,4 \text{ Bq cm}^{-2} < 10 \text{ Bq cm}^{-2}$$

Schritt 6: Schwer nachweisbares Radionuklid? (Abschnitt 3.2.4)

Sofern keine Angaben des Herstellers über die Nachweisgrenzen des Messgerätes für die interessierenden Radionuklide vorliegen, ist zu prüfen, ob diese schwer nachweisbar sind.

Im vorliegenden Fall wird dazu das mindestens erforderliche Oberflächenansprechvermögen S_{\min} des Kontaminationsmessgerätes zum Nachweis einer flächenbezogenen Tc-99m-Aktivität in Höhe des Wertes der Oberflächenkontamination $O_{\text{Tc-99m}} = 10 \text{ Bq cm}^{-2}$

- bei einer Nulleffektzählrate in der für den Xenon-Detektor zutreffenden Betriebsart ($\alpha+\beta$) von $n_0 = 20 \text{ s}^{-1}$
- und einer Zeitkonstante von $\tau = 3 \text{ s}$

gemäß Formel (5) errechnet

$$S_{\min} = \frac{3,3}{O_{\text{Tc-99m}}} \sqrt{\frac{n_0}{\tau}} = \frac{3,3}{10} \sqrt{\frac{20}{3}} \approx 0,9 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$$

Das in der Praxis erreichbare Oberflächenansprechvermögen des Kontaminationsmessgerätes bei Tc-99m beträgt nach Tabelle A: $S(\alpha+\beta) = 1,3 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$. (Die Werte in Tabelle A gelten für Großflächenproportionalzählrohre mit Kohlenwasserstoffen als Zählgas; das Oberflächenansprechvermögen eines Xenonzählrohres für Tc-99m ist etwas günstiger als in der Tabelle angegeben.)

$$S(\alpha+\beta) = 1,3 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2 > S_{\min} = 0,9 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$$

Tc-99m ist ein Radionuklid mit ausreichend guter Nachweisbarkeit.

Da Tc-99m ein Radionuklid mit ausreichend guter Nachweisbarkeit ist, können die Schritte 7 und 8 entfallen.

Schritt 9: Alarmschwelle einstellen (Abschnitt 2.1.3)

Das vorgesehene stationäre Kontaminationsmessgerät besitzt keine einstellbare Alarmschwelle. Als Überschreitung der Alarmschwelle gilt die Anzeige von Messwerten größer

$$n_{\text{alarm}} = n_0 + 1,6 \sigma$$

Mit $\sigma = \sqrt{\frac{n_0}{2 \cdot \tau}} = \sqrt{\frac{20}{2 \cdot 3}} = 1,7$ ist

$$n_{\text{alarm}} = 20 + 2,7 \approx 23 \text{ s}^{-1}$$

Der Messwert n_{alarm} ist ein Maß für das minimale Ansprechvermögen des Messgerätes unter den gegebenen Messbedingungen.

Der Wert der Oberflächenkontamination $O_{\text{Tc-99m}}$ für das zu kontrollierende Objekt (im vorliegenden Fall die Hände) ist eingehalten, wenn das Kontaminationsmessgerät eine Zählrate von

$$Z = n_0 + (O_{\text{Tc-99m}} \cdot S) = 20 \text{ s}^{-1} + (10 \text{ Bq cm}^{-2} \cdot 1,3 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2) = 33 \text{ s}^{-1}$$

nicht überschreitet.

2 Kontaminationskontrolle bei Pu-239/241

Bei der Kontaminationskontrolle ist ein Radionuklidgemisch, bestehend aus Plutonium-239 und Plutonium-241, nachzuweisen; das Aktivitätsverhältnis von Pu-239 zu Pu-241 betrage 1:10. Pu-239 ist ein energiereicher Alphastrahler mit $E_{\alpha} > 5 \text{ MeV}$; Pu-241 hingegen emittiert eine sehr weiche Betastrahlung mit einer mittleren Energie von $E_{\beta} \approx \text{keV}$. Da das Kontaminationsmessgerät für die Alphastrahlung des Pu-239 ein höheres

Oberflächenansprechvermögen aufweist als für die Betastrahlung des Pu-241, wird das Kontaminationsmessgerät auf die Betriebsart "Alphamessung" eingestellt.

Es wird vom Strahlenschutzbeauftragten ein stationäres Kontaminationsmessgerät mit Hand- und Schuhdetektor als erforderlich angesehen. Jeder Detektor hat einen Impulszähler mit Zeitvorwahl, es erfolgt keine Nulleffektsubtraktion und jeder Detektor hat eine getrennt einstellbare Alarmschwelle.

Wert der Oberflächenkontamination für Pu-239 $O_{\text{Pu-239}} = 0,1 \text{ Bq cm}^{-2}$

Wert der Oberflächenkontamination für Pu-241 $O_{\text{Pu-241}} = 10 \text{ Bq cm}^{-2}$

Zur Vorbereitung der Kontaminationskontrolle ist gemäß Anlage 2 Diagramm 1 der Empfehlung zu verfahren.

Schritt 1: Auswahl der repräsentativen Messfläche (Abschnitt 2.2.1)

Repräsentative Messfläche sind Hände und Schuhe.

Schritt 2: Ermittlung des Nulleffektes (Abschnitt 2.1.2.2)

Als Messzeit bei der Ermittlung des Nulleffektes wird das Zehnfache der im Routinebetrieb eingestellten Messzeit gewählt. Die Messzeit im Routinebetrieb beträgt $t = 10 \text{ s}$; die Messzeit bei der Ermittlung des Nulleffektes beträgt dementsprechend $t = 100 \text{ s}$. Der Mittelwert der Impulszahl des Nulleffektes in der Messzeit $t = 10 \text{ s}$ bei Routinebetrieb beträgt $N_0 = 1$.

Schritt 3: Messung mit Prüfstrahler (Abschnitt 2.1.2.3)

In diesem und den nachfolgenden Schritten wird geprüft, ob das gewählte Kontaminationsmessgerät in Verbindung mit einem geeigneten Prüfstrahler den Messanforderungen gerecht wird.

Bei der Kontaminationskontrolle von Alphastrahlern ist Am-241 als Radionuklid des Prüfstrahlers zu verwenden.

Für das Oberflächenansprechvermögen des Kontaminationsmessgerätes werden die im Vergleich zum Handdetektor ungünstigeren Daten des Schuhdetektors gewählt. Die Herstellerangabe für das Oberflächenansprechvermögen des Schuhdetektors bei einem Am-241-Prüfstrahler ist $S = 16 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$.

Schritt 4: Ermittlung der "kleinsten nachweisbaren Kontamination" (Abschnitt 2.1.2.4)

Nach Formel (3) wird für einen Am-241-Prüfstrahler als kleinste nachweisbare Kontamination errechnet:

$$k_{\text{min}} = \frac{3,3}{S} \sqrt{\frac{2 \cdot N_0}{t}} = \frac{3,3}{16} \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{100}} = 0,03 \text{ Bq cm}^{-2}$$

Schritt 5: Geeignet im Sinne des Abschnitts 2.1.1?

Das vorgesehene Messgerät ist im Sinne des Abschnitts 2.1.1 geeignet, d. h. eine flächenbezogene Am-241-Aktivität von $0,1 \text{ Bq cm}^{-2}$, die dem Wert der Oberflächenkontamination des im Prüfstrahler verwendeten Radionuklids entspricht, ist mit der im Routinebetrieb eingestellten Messzeit von $t = 10 \text{ s}$ nachweisbar, denn

$$k_{\text{min}} = 0,03 \text{ Bq cm}^{-2} < 0,1 \text{ Bq cm}^{-2}.$$

Schritt 6: Schwer nachweisbares Radionuklid? (Abschnitt 3.2.4)

Sofern keine Angaben des Herstellers über die Nachweisgrenzen des Messgerätes für die interessierenden Radionuklide vorliegen, ist zu prüfen, ob diese schwer nachweisbar sind. Dazu muss der effektive Kontaminationswert für das Radionuklidgemisch Pu-239/241 im angegebenen Aktivitätsverhältnis unter Anwendung der Summenformel errechnet werden.

Da in die Berechnung des effektiven Kontaminationswertes als bestimmende Größe nicht die aus einer Messung herrührenden absoluten Werte der Aktivität pro Flächeneinheit eingehen, sondern das Aktivitätsverhältnis der Gemischkomponenten, können die Werte der Aktivität pro Flächeneinheit normiert dargestellt werden.

	Aktivität pro Flächen-	Wert der Oberflächenkont am.	$A_{Fi}/O_i =$ Q_{gi}	Q_{ni}	O_{gni}
	$A_{Fi} \text{ Bq cm}^{-2}$	$O_i \text{ in Bq cm}^{-2}$		%	Bq cm^{-2}
Pu-239	1	0,1	10	90,9	0,09
Pu-241	10	10	1	9,1	0,91
			11	100 %	$O_{\text{eff}} = 1 \text{ Bq cm}^{-2}$

Aus den Aktivitätsanteilen A_{Fi} und den nuklidspezifischen Werten der Oberflächenkontamination O_{i1} wird die Verteilung der gewichteten Verhältniszahlen Q_{gi} bestimmt und gemäß dem Kriterium $\sum_i \frac{A_{Fi}}{O_i} \leq \sum_i Q_{ni} \leq 100\%$ normiert. Aus der prozentualen Verteilung der Verhältniszahlen Q_{ni} werden die gewichteten und normierten Kontaminationswerte O_{gni} der Gemischkomponenten berechnet, deren Summe gleich dem effektiven Kontaminationswert für das Gemisch $O_{\text{eff}} = \text{Bq cm}^{-2}$ ist.

Zur Bewertung des Messeffektes, den die energiearme Betestrahlung des Pu-241 unter den vorliegenden Messbedingungen in der Betriebsart ($\alpha+\beta$) erzeugt, wird folgende Betrachtung vorgenommen:

Das mindestens erforderliche Oberflächenansprechvermögen S_{min} des Kontaminationsmessgerätes zum Nachweis einer flächenbezogenen Pu-241-Aktivität in Höhe des gewichteten und normierten Kontaminationswertes $O_{\text{gn Pu-241}} = 0,91 \text{ Bq cm}^{-2}$ errechnet sich

– bei einer Nulleffektzählrate in der Betriebsart ($\alpha+\beta$) von 18 s^{-1}
gemäß Formel (5)

$$S_{\text{min}} = \frac{3,3}{O_{\text{Pu-241}}} \sqrt{\frac{2 \cdot N_2}{t^2}} = \frac{3,3}{0,91} \sqrt{\frac{2 \cdot 180}{10^2}} \approx 6,9 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$$

Das in der Praxis erreichbare Oberflächenansprechvermögen des Kontaminationsmessgerätes bei Pu-241 beträgt nach Tabelle A: $S(\alpha+\beta) < 0,01 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$

$$S(\alpha+\beta) = 0,01 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2 \ll S_{\text{min}} = 6,9 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$$

Pu-241 ist ein schwer nachweisbares Radionuklid; die von Pu-241 emittierte sehr energiearme Betestrahlung erzeugt im Messgerät keinen signifikanten Messeffekt.

Da im Gemisch neben Pu-241 auch das besser nachweisbare Pu-239 in einem definierten Aktivitätsverhältnis vorliegt, wird letzteres als Leitnuklid betrachtet und zur Messung herangezogen.

Das verwendete Kontaminationsmessgerät wird zur Messung der Pu-239-Komponente in der Betriebsart (α) betrieben.

Anstelle des mindestens erforderlichen Oberflächenansprechvermögens $S_{\text{off min}}$ des Kontaminationsmessgerätes zum Nachweis einer flächenbezogenen Pu-239/241-Aktivität in Höhe des effektiven Kontaminationswertes für das Gemisch $O_{\text{off}} = 1 \text{ Bq cm}^{-2}$ wird, da ausschließlich das Leitnuklid Pu-239 nachgewiesen werden kann, das mindestens erforderliche Oberflächenansprechvermögen S_{min} des Messgerätes zum Nachweis einer

flächenbezogenen Pu-239-Aktivität in Höhe des gewichteten und normierten Kontaminationswertes $O_{gn \text{ Pu-239}} = 0,09 \text{ Bq cm}^{-2}$ bestimmt

- bei einer Nulleffektzählrate in der Betriebsart (α) von $0,1 \text{ s}^{-1}$
- und einer Messzeit von $t = 10 \text{ s}$

gemäß Formel (5)

$$S_{\text{min}} = \frac{3,3}{O_{gn \text{ Pu-239}}} \sqrt{\frac{2 \cdot N_0}{t}} = \frac{3,3}{0,09} \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{10}} \approx 5,2 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$$

Das in der Praxis erzielbare Oberflächenansprechvermögen des Kontaminationsmessgerätes bei Pu-239 beträgt nach Tabelle A: $S(\alpha) = 9,7 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$.

$$S(\alpha) = 9,7 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2 > S_{\text{min}} = 5,2 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$$

Pu-239 ist ein Radionuklid mit ausreichend guter Nachweisbarkeit und kann im vorliegenden Radionuklidgemisch als Leitnuklid herangezogen werden.

Da Pu-239 ein Radionuklid mit ausreichend guter Nachweisbarkeit ist, können die Schritte 7 und 8 entfallen.

Schritte 9: Alarmschwelle einstellen (Abschnitt 2.1.3)

Das vorgesehene stationäre Kontaminationsmessgerät mit Hand- und Schuhdetektor besitzt für jeden Detektor getrennt einstellbare Alarmschwellen. Diese sind auf folgende Impulszahlen einzustellen:

$$N_{\text{alarm}} = N_0 + 1,6 \sigma$$

Mit $\sigma = \sqrt{N_0} = 1$

$$N_{\text{alarm}} = 2,6 \quad \text{ist}$$

Die Alarmschwelle ist auf 3 Impulse in 10 s einzustellen.

Der gewichtete und normierte Kontaminationswert $O_{gn \text{ Pu-239}}$ für das zu kontrollierende Objekt (im vorliegenden Fall für Hände und Schuhe) ist eingehalten, wenn das Kontaminationsmessgerät eine Impulszahl von

$$N = N_0 + (O_{gn \text{ Pu-239}} \cdot S_{\text{Pu-239}}) \cdot t = 1 + (0,09 \text{ Bq cm}^{-2}) \cdot 10 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2 \cdot 10 \text{ s} = 10$$

nicht überschreitet.

Da sich die Aktivität pro Flächeneinheit von Pu-239 zu Pu-241 im definierten Verhältnis von 1 : 10 befindet, ist bei Einhaltung des gewichteten und normierten Kontaminationswertes für Pu-239 in Höhe von $0,09 \text{ Bq cm}^{-2}$ auch der gewichtete und normierte Kontaminationswert für Pu-241 in Höhe von $0,91 \text{ Bq cm}^{-2}$ und insgesamt der effektive Kontaminationswert für das Gemisch von $O_{\text{off}} = 1 \text{ Bq cm}^{-2}$ eingehalten.

3 Kontaminationskontrolle bei einem Radionuklidgemisch (Beispiel I)

Das in diesem Beispiel verwendete Radionuklidgemisch entspricht dem Ergebnis einer Oberflächenkontaminationsmessung in einer für einen bestimmten Arbeitsbereich und über einen bestimmten Kontrollzeitraum als konstant angenommen. Da das Radionuklidgemisch überwiegend Beta/Gammastrahler enthält, von denen einige signifikant zum Messeffekt des Kontaminationsmessgerätes beitragen, und der Anteil der Alphastrahler im Bereich von Bruchteilen eines Prozentes liegt, wird das Kontaminationsmessgerät auf die Betriebsart "Alpha/Betamessung ($\alpha+\beta$)" eingestellt.

Es wird ein stationäres Kontaminationsmessgerät für den Ganzkörper verwendet. Jeder Detektor hat einen Impulszähler mit Zeitvorwahl, es erfolgt keine Nulleffektsubtraktion und jeder Detektor hat eine getrennt einstellbare Alarmschwelle.

Die im Radionuklidgemisch enthaltenen Nuklide, deren normierte Aktivitätsanteile, die relevante Strahlungskomponenten sowie die nuklidspezifischen *Werte der Oberflächenkontamination* sind in den Spalten 1 bis 4 der Tabelle B dargestellt.

Zur Vorbereitung der Kontaminationskontrolle ist gemäß Anlage 2 Diagramm 1 der Empfehlung zu verfahren.

Schritt 1: Auswahl der repräsentativen Messfläche (Abschnitt 2.2.1)

Repräsentative Messfläche ist der Ganzkörper.

Schritt 2: Ermittlung des Nulleffektes (Abschnitt 2.1.2.2)

Als Messzeit bei der Ermittlung des Nulleffektes wird das Zehnfache der im Routinebetrieb eingestellten Messzeit gewählt. Die Messzeit im Routinebetrieb beträgt $t = 10$ s; die Messzeit bei der Ermittlung des Nulleffektes beträgt dementsprechend $t = 100$ s. Der Mittelwert der Impulszahl des Nulleffektes in der Messzeit $t = 10$ s bei Routinebetrieb beträgt $N_0 = 180$.

Schritt 3: Messung mit Prüfstrahler (Abschnitt 2.1.2.3)

In diesem und den nachfolgenden Schritten wird geprüft, ob das gewählte Kontaminationsmessgerät in Verbindung mit einem geeigneten Prüfstrahler den Messanforderungen genügt.

Bei der Kontaminationskontrolle eines Radionuklidgemisches vorliegender Zusammensetzung wird Sr-90/Y-90 als Radionuklid des Prüfstrahlers empfohlen. Für das Oberflächenansprechvermögen des Kontaminationsmessgerätes werden die im Vergleich zum Handdetektor ungünstigeren Daten des Schuhdetektors gewählt. Die Herstellerangabe für das Oberflächenansprechvermögen bei einem Sr-90/Y-90-Prüfstrahler ist $S = 20 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$.

Schritt 4: Ermittlung der "kleinsten nachweisbaren Kontamination" (Abschnitt 2.1.2.4)

Nach Formel (3) wird für einen Sr-90/Y-90-Prüfstrahler als kleinste nachweisbare Kontamination errechnet:

$$k_{1\min} = \frac{3,3}{S} \sqrt{\frac{2 \cdot N_0}{t^2}} = \frac{3,3}{20} \sqrt{\frac{2 \cdot 180}{10^2}} \cong 0,3 \text{ Bq cm}^{-2}$$

Schritt 5: Geeignet im Sinne des Abschnitts 2.1.1?

Das vorgesehene Messgerät ist im Sinne des Abschnitts 2.1.1 geeignet, d. h. eine flächenbezogene Sr-90/Y-90-Aktivität von 10 Bq cm^{-2} , die dem *Wert der Oberflächenkontamination* des im Prüfstrahler verwendeten Radionuklids entspricht, ist mit der im Routinebetrieb eingestellten Messzeit von $t = 10$ s nachweisbar, denn

$$k_{1\min} = 0,3 \text{ Bq cm}^{-2} < 10 \text{ Bq cm}^{-2}$$

Schritt 6: Schwer nachweisbare Radionuklide? (Abschnitt 3.2.4)

Sofern keine Angaben des Herstellers über die Nachweisgrenzen des Messgerätes für die interessierenden Radionuklide vorliegen, ist zu prüfen, ob diese schwer nachweisbar sind.

Mit der Bestimmung des mindestens erforderlichen Oberflächenansprechvermögens S_{\min} eines Kontaminationsmessgerätes enthält man eine Information darüber, ob eine Oberflächenkontamination mit einem Radionuklid, dessen Aktivität pro Flächeneinheit gleich dem *Wert der Oberflächenkontamination* ist, mit dem gewählten Gerät unter den gegebenen Messbedingungen nachgewiesen werden kann.

Um bei Vorliegen eines Radionuklidgemisches eine analoge Aussage treffen zu können, muss der effektive Kontaminationswert für das Gemisch bestimmt werden.

Da in die Berechnung des effektiven Kontaminationswertes als bestimmende Größe nicht die aus der Messung herrührenden absoluten Werte der Aktivität pro Flächeneinheit eingehen, sondern die Aktivitätsverhältnisse der Gemischkomponenten zueinander, können die Werte der Aktivität pro Flächeneinheit normiert dargestellt werden (Tabelle B, Spalte 2).

Aus den Aktivitätsanteilen A_{Fi} der im Gemisch vorliegenden Radionuklide und den nuklidspezifischen *Werten der Oberflächenkontamination* O_i wird die Verteilung der gewichteten Verhältniszahlen Q_{gi} bestimmt (Tabelle B, Spalte 5). Die prozentuale Verteilung der gewichteten Verhältniszahlen wird auf 100% normiert (Spalte 6), womit

die Summe der gewichteten und normierten Verhältniszahlen Q_{ni} dem Kriterium $\sum_i \frac{A_{Fi}}{O_i} \leq \sum_i Q_{ni} \leq 100\%$ entspricht.

Einige Radionuklide tragen nur einen geringen (Teilsumme < 10%) Anteil zur Verteilung der gewichteten und normierten Verhältniszahlen Q_{ni} bei. Das sind Radionuklide, die wegen ihrer geringen Emissionswahrscheinlichkeit pro Kernzerfall bzw. wegen der geringen Energie ihrer Emissionskomponenten einen hohen *Wert der Oberflächenkontamination* aufweisen und/oder mit einem geringen Aktivitätsanteil im Gemisch vertreten sind. Diese Radionuklide sind von geringer radiologischer Relevanz und können gemäß Anlage III zu § 45 StrlSchV ohne Berücksichtigung bleiben (Spalte 6).

Im Ergebnis erhält man die gewichteten und normierten Kontaminationswerte O_{gni} für die relevanten Radionuklide (Spalte 7). Deren Summe entspricht dem effektiven Kontaminationswert des Gemisches O_{eff} . Die prozentualen Aktivitätsanteile p_{ni} der relevanten Radionuklide sind in Spalte 8 angegeben. Das mindestens erforderliche Oberflächenansprechvermögen $S_{eff\ min}$ des Kontaminationsmessgerätes zum Nachweis einer flächenbezogenen Aktivität des Gemisches, die gleich dem effektiven Kontaminationswert O_{eff} ist, errechnet sich gemäß Formel (5)

$$S_{eff\ min} = \frac{3,3}{O_{eff}} \sqrt{\frac{2 \cdot N_0}{t^2}} = \frac{3,3}{0,92} \sqrt{\frac{2 \cdot 180}{10^2}}$$

zu $S_{eff\ min} \approx 6,8 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$. (Spalte 9)

Das in der Praxis erreichbare Oberflächenansprechvermögen des Kontaminationsmessgerätes für die im Gemisch relevanten Radionuklide errechnet sich mit den aus Tabelle A entnommenen Einzelangaben (Spalte 10) zu

$$S_{off}(\alpha+\beta) = (p_{ni} \cdot S_i(\alpha+\beta))$$

Tabelle B

Radionuklid	Aktivität pro Flächeneinh.	Strahlungsart	Wert der Oberfl.kont	A_{Fi}/Q_i = Q_{gi}	Q_{ni}	Q_{gni}	Aktivitätsanteils P_{ni}	$S_{off\ min}$	$S_1 (\alpha+\beta)$	$P_{\mu l} \cdot S_1 (\alpha+\beta)$
	A_{p1} ; Bq cm ⁻²		O_i ; Bq cm ⁻²		%	Bq cm ⁻²	%	s ⁻¹ Bq ⁻¹ cm ²	s ⁻¹ Bq ⁻¹ cm ²	s ⁻¹ Bq ⁻¹ cm ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Co-60	19,04	β/γ	1	19	26,7	0,27	29,4	6,8	13	3,8
Fe-55	23,46	β/γ	100	0,23						
Ni-59	0,13	β/γ	100	0,0013						
Ni-63	3,50	β	100	0,035						
Sr-90 +	31,20	β	1	31,2	43,6	0,44	47,8		20	0,6
Ag-108m	0,06	β/γ	1	0,06						
Cs-134	0,07	β/γ	1	0,07						
Cs-137+	15,24	β/γ	1	15,2	21,3	0,21	22,8		20	4,6
Eu-152	3,34	β/γ	1	3,3						
Eu-154	1,53	β/γ	1	1,5						
Eu-155	0,27	β/γ	10	0,03						
Pu-238	0,01	α	0,1	0,1						
Pu-239/240	0,02	α	0,1	0,2						
Pu-241	2,09	β	10	0,2						
Am-241	0,04	α	0,1	0,4						
				$\equiv 71,5$	$= 100 \%$	$O_{off} \equiv 0,92 \text{ Bq cm}^{-2}$	100 %			$S_{off} (\alpha+\beta) \equiv 18 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$

$$S_{\text{off}}(\alpha+\beta) = 18 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2 \text{ (Spalte 11)}$$

Der Vergleich der Werte ergibt

$$S_{\text{off}}(\alpha+\beta) = 18 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2 > S_{\text{off min}} = 6,8 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$$

Das vorliegende Radionuklidgemisch ist ausreichend gut nachweisbar.

Da das vorliegende Radionuklidgemisch ausreichend gut nachweisbar ist, können die Schritte 7 und 8 entfallen.

Schritt 9: Alarmschwelle einstellen (Abschnitt 2.1.3)

Das vorgesehene Ganzkörper-Kontaminationsmessgerät besitzt für jeden Detektor getrennt einstellbare Alarmschwellen. Diese sind auf folgende Impulszahlen einzustellen:

$$\begin{aligned} N_{\text{alarm}} &= N_0 + 1,6 \sigma \\ \text{Mit } \sigma &= \sqrt{N_0} = \sqrt{180} \cong 13 \quad \text{ist} \\ N_{\text{alarm}} &\cong 200 \end{aligned}$$

Die Alarmschwelle ist auf 200 Impulse in 10 s einzustellen.

Der effektive Kontaminationswert O_{off} für das zu kontrollierende Objekt (im vorliegenden Fall Ganzkörper) ist eingehalten, wenn das Kontaminationsmessgerät eine Impulszahl von

$$\begin{aligned} N &= N_0 + \sum_i (O_{\text{gr}i} \cdot S_i(\alpha + \beta)) \cdot t \\ N &= 180 + (3,5 + 8,8 + 4,2) \text{ s}^{-1} \cdot 10 \text{ s} \cong 345 \end{aligned}$$

nicht überschreitet.

4 Kontaminationskontrolle bei einem Radionuklidgemisch (Beispiel II)

Das in diesem Beispiel verwendete Radionuklidgemisch entspricht dem Ergebnis einer Oberflächenkontaminationsmessung in einer kerntechnischen Anlage. Das Aktivitätsverhältnis der Radionuklide wird für einen bestimmten Arbeitsbereich und über einen bestimmten Kontrollzeitraum als konstant angenommen. Da das Radionuklidgemisch ausschließlich Beta/Gammastrahler enthält, wird das Kontaminationsmessgerät auf die Betriebsart "Alpha/Betamessung ($\alpha+\beta$)" eingestellt.

Es wird ein stationäres Kontaminationsmessgerät mit Hand- und Schuhdetektor verwendet. Jeder Detektor hat einen Impulszähler mit Zeitvorwahl, es erfolgt keine Nulleffektsubtraktion und jeder Detektor hat eine getrennt einstellbare Alarmschwelle.

Die im Radionuklidgemisch enthaltenen Nuklide, deren normierte Aktivitätsanteile, die relevante Strahlungskomponente sowie die nuklidspezifischen *Werte der Oberflächenkontamination* sind in den Spalten 1 bis 4 der Tabelle C dargestellt.

Zur Vorbereitung der Kontaminationskontrolle ist gemäß Anlage 2 Diagramm 1 der Empfehlung zu verfahren.

Schritt 1: Auswahl der repräsentativen Messfläche (Abschnitt 2.2.1)

Repräsentative Messfläche ist der Ganzkörper.

Schritt 2: Ermittlung des Nulleffektes (Abschnitt 2.1.2.2)

Als Messzeit bei der Ermittlung des Nulleffektes wird das Zehnfache der im Routinebetrieb eingestellten Messzeit gewählt. Die Messzeit im Routinebetrieb beträgt $t = 10$ s; die Messzeit bei der Ermittlung des Nulleffektes beträgt dementsprechend $t = 100$ s. Der Mittelwert der Impulszahl des Nulleffektes in der Messzeit $t = 10$ s bei Routinebetrieb beträgt $N_0 = 180$.

Schritt 3: Messung mit Prüfstrahler (Abschnitt 2.1.2.3)

In diesem und den nachfolgenden Schritten wird geprüft, ob das gewählte Kontaminationsmessgerät in Verbindung mit einem geeigneten Prüfstrahler den Messanforderungen genügt.

Bei der Kontaminationskontrolle eines Radionuklidgemisches vorliegender Zusammensetzung wird Co-60 als Radionuklid des Prüfstrahlers empfohlen. Für das Oberflächenansprechvermögen des Kontaminationsmessgerätes werden die im Vergleich zum Handdetektor ungünstigeren Daten des Schuhdetektors gewählt. Das Oberflächenansprechvermögen bei einem Co-60-Prüfstrahler beträgt gemäß Tabelle A : $S = 13 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$.

Schritt 4: Ermittlung der "kleinsten nachweisbaren Kontamination" (Abschnitt 2.1.2.4)

Nach Formel (3) wird für einen Co-60-Prüfstrahler als kleinste nachweisbare Kontamination errechnet:

$$k_{\min} = \frac{3,3}{S} \sqrt{\frac{2 \cdot N_0}{t^2}} = \frac{3,3}{13} \sqrt{\frac{2 \cdot 180}{10^2}} = 0,48 \text{ Bq cm}^{-2}$$

Schritt 5: Geeignet im Sinne des Abschnitts 2.1.1?

Das vorgesehene Messgerät ist im Sinne des Abschnitts 2.1.1 geeignet, d. h. eine flächenbezogene Co-60-Aktivität von 1 Bq cm^{-2} , die dem Wert der Oberflächenkontamination des im Prüfstrahler verwendeten Radionuklids entspricht, ist mit der im Routinebetrieb eingestellten Messzeit von $t = 10$ s nachweisbar, denn

$$k_{\min} = 0,48 \text{ Bq cm}^{-2} < 1 \text{ Bq cm}^{-2}$$

Schritt 6: Schwer nachweisbare Radionuklide? (Abschnitt 3.2.4)

Sofern keine Angaben des Herstellers über die Nachweisgrenzen des Messgerätes für die interessierenden Radionuklide vorliegen, ist zu prüfen, ob diese schwer nachweisbar sind.

Mit der Bestimmung des mindestens erforderlichen Oberflächenansprechvermögens S_{\min} eines Kontaminationsmessgerätes erhält man eine Information darüber, ob eine Oberflächenkontamination mit einem Radionuklid, dessen Aktivität pro Flächeneinheit gleich dem Wert der Oberflächenkontamination ist, mit dem gewählten Gerät unter den gegebenen Messbedingungen nachgewiesen werden kann.

Um bei Vorliegen eines Radionuklidgemisches eine analoge Aussage treffen zu können, muss der effektive Kontaminationswert für das Gemisch bestimmt werden.

Da in die Berechnung des effektiven Kontaminationswertes als bestimmende Größe nicht die aus der Messung herrührenden absoluten Werte der Aktivität pro Flächeneinheit eingehen, sondern die Aktivitätsverhältnisse der Gemischkomponenten zueinander, können die Werte der Aktivität pro Flächeneinheit normiert dargestellt werden (Tabelle C, Spalte 2).

Aus den Aktivitätsanteilen A_{F_i} der im Gemisch vorliegenden Radionuklide und den nuklidspezifischen Werten der Oberflächenkontamination O_i wird die Verteilung der gewichteten Verhältniszahlen Q_{gi} bestimmt (Tabelle C, Spalte 5). Die prozentuale Verteilung der gewichteten Verhältniszahlen wird auf 100% normiert

(Spalte 6), womit die Summe der gewichteten und normierten Verhältniszahlen Q_{ni} dem Kriterium $\sum_i \frac{A_{F_i}}{O_i} \leq \sum_i Q_{ni}$ $\leq 100\%$ entspricht.

Einige Radionuklide tragen nur einen geringen (Teilsumme < 10%) Anteil zur Verteilung der gewichteten und normierten Verhältniszahlen Q_{ni} bei. Das sind Radionuklide, die wegen ihrer geringen Emissionswahrscheinlichkeit pro Kernzerfall bzw. wegen der geringen Energie ihrer Emissionskomponenten einen hohen *Wert der Oberflächenkontamination* aufweisen und/oder mit einem geringen Aktivitätsanteil im Gemisch vertreten sind. Diese Radionuklide sind von geringer radiologischer Relevanz und können gemäß Anlage III zu § 45 StrlSchV ohne Berücksichtigung bleiben (Spalte 6).

Im Ergebnis erhält man die gewichteten und normierten Kontaminationswerte O_{gni} für die relevanten Radionuklide (Spalte 7). Deren Summe entspricht dem effektiven Kontaminationswert des Gemisches O_{off} . Die prozentualen Aktivitätsanteile p_{ni} der relevanten Radionuklide sind in Spalte 8 angegeben.

Tabelle C

Radionuklid	Aktivität pro Flächeneinh.	Strahlungsart	Wert der Oberfl.kont	$A_{Fi}/Q_i = Q_{gi}$	Q_{ni}	Q_{gni}	Aktivitätsanteile P_{ni}	$S_{off\ min}$	$S_i (\alpha+\beta)$	$P_{ni} \cdot S_i (\alpha+\beta)$
	$A_{Fi}; Bq\ cm^{-2}$		$O_i; Bq\ cm^{-2}$		%	$Bq\ cm^{-2}$	%	$s^{-1}\ Bq^{-1}\ cm^2$	$s^{-1}\ Bq^{-1}\ cm^2$	$s^{-1}\ Bq^{-1}\ cm^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Be-7	2,9	γ	100	0,020				6,6		
Cr-51	20,7	γ	100	0,287						
Mn-54	25,2	γ	1	25,2	37,6	0,38	40		0,31	0,12
Co-58	12,5	β/γ	1	12,5	18,66	0,19	20		3,4	0,68
Fe-59	0,2	β/γ	1	0,2						
Co-60	5,8	β/γ	1	5,8	8,7	0,09	9,5		13	1,2
Zr-95	8,8	β/γ	1	8,8	13,1	0,13	13,7		14	1,9
Nb-95	10,9	β/γ	1	10,9	16,2	0,16	16,8		0,9	1,2
Ag-110m	2,8	β/γ	1	2,8						
Sn-113	0,8	β/γ	10	0,00						
Sb-125	1,1	β/γ	10	0,11						
Cs-134	0,1	β/γ	1	0,1						
Cs-137	0,2	β/γ	1	0,2						
				$\equiv 67$	= 100 %	$O_{off} = 0,05\ Bq\ cm^{-2}$	100 %			

Das mindestens erforderliche Oberflächenansprechvermögen $S_{\text{off min}}$ des Kontaminationsmessgerätes zum Nachweis einer flächenbezogenen Aktivität des Gemisches, die gleich dem effektiven Kontaminationswert O_{off} ist, errechnet sich gemäß Formel (5)

$$S_{\text{eff min}} = \frac{3,3}{O_{\text{eff}}} \sqrt{\frac{2 \cdot N_0}{t^2}} = \frac{3,3}{0,95} \sqrt{\frac{2 \cdot 180}{10^2}}$$

$$S_{\text{eff min}} \cong 6,6 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2. \quad (\text{Spalte 9})$$

Das in der Praxis erreichbare Oberflächenansprechvermögen des Kontaminationsmessgerätes für die im Gemisch relevanten Radionuklide errechnet sich mit den aus Tabelle A entnommenen Einzelangaben (Spalte 10) zu

$$S_{\text{off}}(\alpha+\beta) = (P_{\text{ni}} \cdot S_{\text{l}}(\alpha+\beta))$$

$$S_{\text{off}}(\alpha+\beta) = 5,1 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2 \quad (\text{Spalte 11})$$

Der Vergleich der Werte ergibt

$$S_{\text{off}}(\alpha+\beta) = 5,1 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2 < S_{\text{off min}} = 6,6 \text{ s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$$

Das vorliegende Radionuklidgemisch ist schwer nachweisbar.

Schritt 7: Prüfung veränderter Messbedingungen zum Nachweis schwer nachweisbarer Radionuklide (Abschnitt 3.2.3)

Entsprechend der für dieses Anwendungsbeispiel eingangs getroffenen Vorgaben soll für die Kontaminationskontrolle ein festinstalliertes Kontaminationsmeßgerät mit Hand- und Schuhdetektor verwendet werden. Die zur Bestimmung des Oberflächenansprechvermögens $S_{\text{off}}(\alpha+\beta)$ dieses Gerätes erforderlichen nuklidspezifischen Einzelangaben $S_{\text{l}}(\alpha+\beta)$ wurden der Tabelle A entnommen. Die Schlussfolgerung, dass das vorliegende Radionuklidgemisch schwer nachweisbar ist, gilt demzufolge für festinstallierte Hand-, Fuß-, Kleider- und Ganzkörper-Kontaminationsmonitore, für die die Werte in Tabelle A unter bestimmten Messbedingungen ermittelt wurden.

Tabelle D

Radionuklid	O_{gni}	Aktivitätsanteile P_{ni}	$S_{\text{off min}}$	$S_{\text{l}}(\alpha+\beta)$	$P_{\text{ni}} \cdot S_{\text{l}}(\alpha+\beta)$
	Bq cm ⁻²	%	s ⁻¹ Bq ⁻¹ cm ²	s ⁻¹ Bq ⁻¹ cm ²	s ⁻¹ Bq ⁻¹ cm ²
1	7	8	9	10	11
Be-7					
Cr-51					
Mn-54	0,38	40		0,41	0,16
Co-58	0,19	20		5,5	1,1
Fe-59					
Co-60	0,09	9,5		21	2,0
Zr-95	0,13	13,7	6,6	23	3,15

Radionuklid	O_{gni}	Aktivitätsanteile P_{ni}	$S_{off\ min}$	$S_i (\alpha+\beta)$	$P_{ni} \cdot S_i (\alpha+\beta)$
	$Bq\ cm^{-2}$	%	$s^{-1}\ Bq^{-1}\ cm^2$	$s^{-1}\ Bq^{-1}\ cm^2$	$s^{-1}\ Bq^{-1}\ cm^2$
1	7	8	9	10	11
Nb-95	0,16	16,8		12	2,0
Ag-110m					
Sn-113					
Sb-125					
Cs-134					
Cs-137					
	$O_{off} = 0,95\ Bq\ cm^{-2}$	100 %			$S_{off} (\alpha+\beta) = 8,4\ s^{-1}\ Bq^{-1}\ cm^2$

Der Vergleich der Werte ergibt

$$S_{off} (\alpha+\beta) = 8,4\ s^{-1}\ Bq^{-1}\ cm^2 > S_{off\ min} = 6,6\ s^{-1}\ Bq^{-1}\ cm^2$$

Das vorliegende Radionuklidgemisch ist ausreichend gut nachweisbar.

Eine Möglichkeit, vorliegendes Radionuklidgemisch dennoch einer Messung zugänglich zu machen, besteht generell darin, das nuklidspezifische Oberflächenansprechvermögen $S_i (\alpha+\beta)$ durch Änderung der Messbedingungen zu erhöhen und/oder ein geeignetes Kontaminationsmeßgerät zu verwenden, das sich durch ein höheres Oberflächenansprechvermögen gegenüber den Strahlungskomponenten auszeichnet, die von den im Gemisch vorliegenden Radionukliden emittiert werden.

In diesem Anwendungsbeispiel wird geprüft, ob ein geeigneteres Kontaminationsmeßgerät zur Verfügung steht. Es sei angenommen, dass die Kontaminationskontrolle ersatzweise mit einem tragbaren Kontaminationsmeßgerät durchgeführt werden kann, dessen Oberflächenansprechvermögen gegenüber den relevanten Strahlungskomponenten größer ist als bei dem festinstallierten Kontaminationsmonitor.

Für das neu gewählte Kontaminationsmeßgerät ist zu prüfen, ob mit dem in der Praxis erreichbaren Oberflächenansprechvermögen $S_{off} (\alpha+\beta)$ mindestens eine flächenbezogene Aktivität des Gemisches, die gleich dem effektiven Kontaminationswert O_{off} ist, nachgewiesen werden kann. Zur Berechnung des Oberflächenansprechvermögens $S_{off} (\alpha+\beta)$ werden nuklidspezifische Werte $S_i (\alpha+\beta)$ herangezogen, die für tragbare Kontaminationsmessgeräte gelten.

Die für die Neuberechnung erforderlichen Spalten der Tabelle C sind in Tabelle D dargestellt.

Das in der Praxis erreichbare Oberflächenansprechvermögen des Kontaminationsmessgerätes für die im Gemisch relevanten Radionuklide errechnet sich mit den für tragbare Geräte geltenden Einzelangaben (Spalte 10) zu

$$S_{off} (\alpha+\beta) = (P_{ni} \cdot S_i (\alpha+\beta))$$

$$S_{off} (\alpha+\beta) = 8,4\ s^{-1}\ Bq^{-1}\ cm^2 \text{ (Spalte 11)}$$

Schritt 8: Ist eine Kontamination in Höhe des effektiven Kontaminationswertes nachweisbar?

Da mit dem neu gewählten Kontaminationsmessgerät das vorliegende Radionuklidgemisch ausreichend gut nachweisbar ist, kann die Einleitung spezieller Messverfahren bzw. Maßnahmen entfallen.

Schritt 9: Alarmschwelle einstellen (Abschnitt 2.1.3)

Für das tragbare Kontaminationsmessgerät ist zunächst der Nulleffekt in der Betriebsart ($\alpha + \beta$) zu ermitteln. Der Mittelwert der Impulszahl des Nulleffektes in der Messzeit $t = 10$ s bei Routinebetrieb betrage $N_0 = 60$. Die Alarmschwelle ist auf folgende Impulszahl einzustellen:

$$N_{\text{alarm}} = N_0 + 1,6 \sigma$$

Mit $\sigma = \sqrt{N_0} = \sqrt{60} \cong 8$ ist

$$N_{\text{alarm}} \cong 73$$

Die Alarmschwelle ist auf 73 Impulse in 10 s einzustellen.

Der effektive Kontaminationswert O_{eff} für das zu kontrollierende Objekt (im vorliegenden Fall Ganzkörper) ist eingehalten, wenn das Kontaminationsmessgerät eine Impulszahl von

$$N = N_0 + \sum (O_{\text{eff},i} \cdot S_i \cdot (\alpha + \beta)) \cdot t$$
$$N = 60 + (0,2 + 1,1 + 1,9 + 3,0 + 1,9) \text{ s}^{-1} \cdot 10 \text{ s} \cong 140$$

nicht überschreitet.