

**Verfahren zur Bestimmung der  
aerosolgetragenen künstlichen  
Gesamt-Alpha-Aktivität der bodennahen Luft  
nach dem Alpha-Beta-Pseudokoinzidenz-  
Differenz-Verfahren (ABPD)**

A- $\alpha$ -GESAMT-AEROS-01

Bearbeiter:

W. Kiese Wetter

H. Diedrich

W. Dyck

T. Steinkopff

H. Ulbricht

Leitstelle für Luft und Niederschlag

# **11 Verfahren zur Bestimmung der aerosolpartikelgetragenen künstlichen Gesamt-Alpha-Aktivität der bodennahen Luft nach dem Alpha-Beta-Pseudokoinzidenz-Differenz-Verfahren (ABPD)**

## **1 Anwendbarkeit**

Die Methode dient der schnellen Erfassung eines Anstiegs der aerosolpartikelgetragenen künstlichen Gesamt-Alpha-Aktivitätskonzentration der bodennahen Luft. Die Probeentnahme und die Messung sind getrennte Vorgänge. Bedingt durch das Meßprinzip wird gleichzeitig die künstliche Gesamt-Beta-Aktivitätskonzentration (siehe Verfahren A- $\beta$ -GESAMT-AEROS-01) bestimmt. Das Meßverfahren wird beim Deutschen Wetterdienst gemäß den Vorgaben der AVV-IMIS (1) und den dazugehörigen Anlagen 1 und 2 eingesetzt.

## **2 Probeentnahme**

Bei der Probeentnahme werden die Aerosolpartikeln der bodennahen Luft auf einem geeigneten Filter gesammelt. Die Bestaubungseinheit der Probeentnahmevorrichtung besteht aus einer Pumpe und einem Filterhalter mit einem Glasfaserfilter von 200 mm Durchmesser, Klasse S, Nr. 10 nach DIN 24184 (2), der für eine festgelegte Zeitspanne mit einem annähernd konstanten Luftvolumenstrom von ca. 40 bis 50 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup> bestaubt wird.

Die Probeentnahmeleitung muß möglichst kurz und krümmungsfrei ausgelegt sein. Das Material der Probeentnahmeleitung ist so auszuwählen, daß Anlagerungen durch elektrostatische Effekte vermieden werden. Weitere Hinweise zur Probeentnahme sind dem Verfahren A- $\gamma$ -SPEKT-AEROS-01 dieser Meßanleitungen zu entnehmen.

## **3 Analytik**

### **3.1 Probenvorbereitung**

Es ist keine Probenvorbereitung erforderlich.

### **3.2 Radiochemische Trennung**

Eine radiochemische Trennung ist bei dem hier beschriebenen Verfahren nicht erforderlich.

## 4 Messung der Aktivität

### 4.1 Grundlagen

Mit dem oben beschriebenen Probeentnahmesystem werden folgende aerosolpartikelgetragene Aktivitäten auf dem Filter akkumuliert:

- natürliche Radionuklide, meßbar über deren
  - Alpha-Strahlung
  - Beta-Strahlung
- künstliche Radionuklide, meßbar über deren
  - Alpha-Strahlung
  - Beta-Strahlung

Das Meßverfahren zur Bestimmung der künstlichen Gesamt-Alpha-Aktivitätskonzentration in der bodennahen Luft muß folglich unterscheiden können zwischen

- künstlicher und natürlicher Aktivität
- Alpha- und Beta-Aktivität.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Verfahren, die diese Anforderungen erfüllen (3, 4). Das hier beschriebene ABPD-Verfahren (**A**lpha-**B**eta-**P**seudokoinzidenz-**D**ifferenz-Verfahren) eignet sich insbesondere auch als Schnellverfahren.

Die Unterscheidung zwischen Alpha- und Beta-Strahlung wird durch die Verwendung eines alpha/beta-empfindlichen Großflächenproportionaldurchflußzählrohrs ermöglicht. Die Alpha-Impulse mit hoher Amplitude (0,5 V bis 1,0 V) lassen sich mit einem Impulshöhendiskriminator von den Beta-Impulsen mit niedrigerer Amplitude (50 mV bis 100 mV) trennen. Das Trennvermögen liegt in der Größenordnung von 100 : 1; das heißt, von 100 Alpha-Impulsen wird 1 Impuls als Beta-Impuls gezählt.

Das ABPD-Verfahren beruht auf der Möglichkeit, aufgrund der Besonderheiten des radioaktiven Zerfalls innerhalb der natürlichen Zerfallsreihen des Uran-238 und des Thorium-232, die natürlichen Radionuklide getrennt zu identifizieren. Die natürliche Aktivität in der Luft besteht im wesentlichen aus den gasförmigen Radionukliden Radon-222 und Radon-220 und deren aerosolpartikelgetragenen Zerfallsprodukten, den Radioisotopen der Elemente Polonium, Blei und Wismut. Auszugsweise sind die natürlichen Zerfallsreihen von U-238 ab Rn-222 und von Th-232 ab Rn-220 in Abbildung 1 dargestellt.

Der für dieses Verfahren wesentliche Anteil an natürlicher luftgetragener Aktivität stammt von Rn-222 und seinen Zerfallsprodukten; Rn-220 und seine Zerfallsprodukte sind im Rahmen dieser Betrachtung in der Regel von untergeordneter Bedeutung.

Auf den Alpha-Zerfall von Rn-222 folgt ein Alpha-Zerfall von Po-218. Aufgrund der kurzen Halbwertszeit von ca. 3 Minuten reichert sich Po-218 auf dem Filter nicht in nennenswerter Menge an. Po-218 zerfällt über Pb-214 und Bi-214 (jeweils ein Beta-Zerfall mit 26,8 Minuten bzw. 19,7 Minuten Halbwertszeit) in das kurzlebige Po-214, einen Alpha-Strahler mit 165  $\mu$ s Halbwertszeit. Charakteristisch für diese Zerfallsreihe ist der nahezu koinzidente Zerfall von Bi-214 und des Po-214. Hierfür hat sich der Begriff «Pseudokoinzidenz» eingebürgert.

In der Rn-220 Zerfallsreihe tritt eine ähnliche Pseudokoinzidenz beim Zerfall von Bi-212 in Po-212 auf. Allerdings zerfallen hier nur 64 % des Bi-212 durch Beta-Zerfall.

Da bei den zu bestimmenden künstlichen Radionukliden eine vergleichbare Pseudokoinzidenz nicht auftritt, stellt die Zählung der pseudokoinzidenten Ereignisse eine geeig-

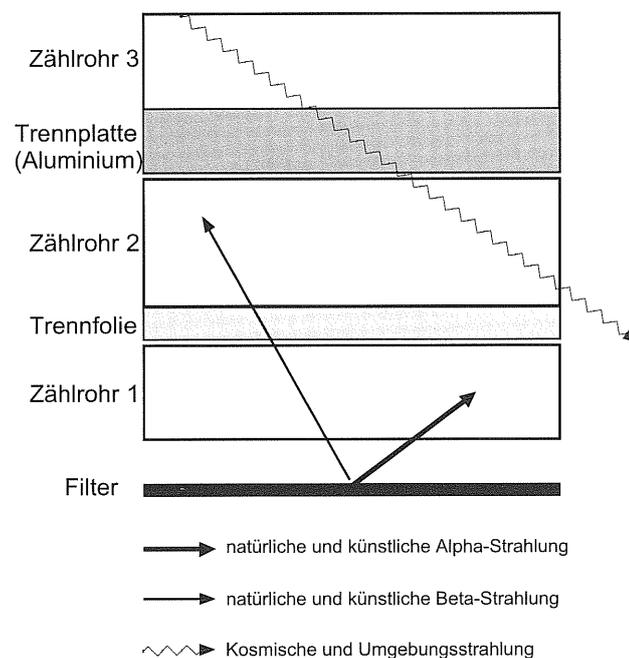
Rn-222 (3,82 d)		Rn-220 (55,6 s)	
↓ $\alpha$		↓ $\alpha$	
Po-218 (3,05 min)		Po-216 (0,15 s)	
↓ $\alpha$		↓ $\alpha$	
Pb-214 (26,8 min)		Pb-212 (10,6 h)	
↓ $\beta$		↓ $\beta$	
Bi-214 (19,7 min)		Bi-212 (60,6 min)	
	$\alpha : 0,04 \% \text{ Tl-210}$		$\alpha : 36 \% \text{ Tl-208}$
↓ $\beta$		↓ $\beta$ (64%)	
Po-214 (165 $\mu$ s)		Po-212 (0,3 $\mu$ s)	
↓ $\alpha$		↓ $\alpha$	
Pb-210 (22,3 a)		Pb-208 (stabil)	

**Abb. 1:** Die natürlichen Zerfallsreihen von Rn-222 (Radon) und Rn-220 (Thoron) mit Angabe der Halbwertszeiten und der Strahlungsart

nete Methode dar, den Anteil der durch natürliche Radionuklide erzeugten Impulse separat von den künstlichen Radionukliden zu erfassen.

## 4.2 Prinzip des Meßverfahrens

Für die Messung wird das in Abbildung 2 schematisch dargestellte ABPD-Zählrohrsystem eingesetzt. Die Durchflußzählrohre werden mit dem Zählgas P10 (90% Argon und 10% Methan) im Proportionalbereich betrieben.



**Abb. 2:** Das ABPDZählrohrsystem

In den einzelnen Zählrohren werden folgende Strahlungskomponenten registriert:

Zählrohr 1 = Alpha-Teilchen der auf dem Filter abgeschiedenen Radionuklide

Zählrohr 2 = Beta-Teilchen und die Gamma-Strahlung der auf dem Filter abgeschiedenen Radionuklide sowie Umgebungsstrahlung einschließlich kosmischer Strahlung

Zählrohr 3 = Beta-Teilchen und Gamma-Strahlung der Umgebung

Das Zählrohr 1, das sich unmittelbar über dem Filter befindet, wird im Alpha-Plateau, die darüber angeordneten Zählrohre 2 und 3 im Alpha+Beta-Plateau betrieben. Zwischen den Zählrohren 1 und 2 befindet sich eine Trennfolie, die einerseits die Alpha-Teilchen absorbiert und andererseits dünn genug ist, um genügend Beta-Teilchen in das Zählrohr 2 gelangen zu lassen. Das Zählrohr 3 (Schirmzählrohr) ist durch eine Trennplatte aus Aluminium vom Zählrohr 2 getrennt, so daß nur die kosmische Strahlung und die Umgebungsstrahlung erfasst wird. Zählrohr 2 ist mit Zählrohr 3 durch eine Antikoinzidenzschaltung verbunden. Für die Auswertung werden die Zählraten folgender elektronischer Zähler gemäß der in Abbildung 3 dargestellten Schaltskizze verwendet:

$R_1$  = Zählrate für die Gesamt-Alpha-Aktivität aus Zählrohr 1

$R_2$  = Zählrate für die Gesamt-Beta-Aktivität aus Zählrohr 2 nach Berücksichtigung der Antikoinzidenzzählraten aus  $R_2$  und  $R_5$

$R_3$  = Gesamt-Pseudokoinzidenzzählrate gemessen durch Koinzidenz zwischen Zählrohr 1 und Zählrohr 2

$R_4$  = Zufällige Koinzidenzzählrate, gemessen mit einer zweiten, um mehr als 250  $\mu$ s verzögerten Koinzidenzstufe

$R_5$  = Zählrate der Beta- und Gamma-Strahlung der Umgebung in Zählrohr 3 (Schirmzählrohr)

Die Antikoinzidenzstufe zwischen Zählrohr 2 und Zählrohr 3 hat die Aufgabe, die Impulse der Probe (Zählrohr 2) von den Impulsen aus der Umgebungsstrahlung (Zählrohr 3) zu diskriminieren. Zur Erfassung der Gesamtpseudokoinzidenzzählrate  $R_3$  werden die gemessenen Alpha- und Beta-Impulse einer Koinzidenzstufe mit einem Zeitfenster von 240  $\mu$ s zugeführt. Aufgrund dieses relativ großen Zeitfensters wurde der Begriff Pseudokoinzidenz geprägt. Alle innerhalb dieser Zeit registrierten Alpha-Impulse passieren die Stufe und werden elektronisch als Zählrate  $R_3$  identifiziert. Später eintreffende Alpha-Impulse werden nicht als Pseudokoinzidenzen gezählt. Bei sehr hohen Beta-Aktivitäten besteht das Problem, daß diese Pseudokoinzidenzstufe nahezu ständig geöffnet ist, wodurch alle Alpha-Impulse als Pseudokoinzidenzen registriert werden, obwohl es sich nur um zufällige Koinzidenzen handelt. Dieser Fehler wird dadurch korrigiert, daß in diese Koinzidenzstufe eine Schaltung integriert ist, mit der die zufälligen Koinzidenzen ebenfalls herausgefiltert werden.

Von der gemessenen Zählrate  $R_1$  für die Gesamt-Alpha-Aktivität aus Zählrohr 1 wird der Anteil ( $R_3$  und  $R_4$ ), welcher durch die Koinzidenzstufe erfaßt wurde, abgezogen. Die verbleibende Differenz ist diejenige Zählrate, welche der künstlichen Gesamt-Alpha-Aktivität entspricht.

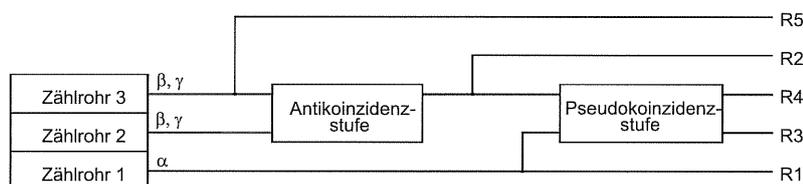


Abb. 3: Prinzipschaltung zum ABPD-Verfahren

### 4.3 Kalibrierung

Die Meßeinrichtung wird mit Flächenstrahlern der Radionuklide Am-241 und Sr-90, die mit 200 mm Durchmesser die gleiche Geometrie wie das zu messende Filter aufweisen, kalibriert.

Die Flächenstrahler werden auch zur Aufnahme der Zählrohrplateaus verwandt, um die jeweiligen Arbeitspunkte zu bestimmen.

### 4.4 Messung

Die Zählrate der künstlichen Gesamt-Alpha-Aktivität  $R_k$  wird nach Gleichung 1 berechnet.

$$R_k = R_1 - F_\alpha \cdot (R_3 - R_4) \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

Dabei ist  $F_\alpha$  der Kompensationsfaktor für die natürliche Alpha-Zählrate.

Der Kompensationsfaktor berücksichtigt verschiedene Einflußgrößen, wie zum Beispiel die Gleichgewichtseinstellung der Radionuklide der Rn-222 Zerfallsreihe, die Toröffnungszeit der Pseudokoinzidenzstufen, die unterschiedliche Nachweiswahrscheinlichkeit für  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung und den Pegel der Umgebungsstrahlung.

Der Kompensationsfaktor  $F_\alpha$  wird experimentell durch separate Meßreihen bestaubter Filter bestimmt, deren künstliche Aktivität  $R_k$  gleich Null ist. Damit werden auch die zählrohrspezifischen Eigenschaften berücksichtigt.

$$F_\alpha = R_1 / (R_3 - R_4)$$

Damit sich das radioaktive Gleichgewicht auf dem Filter einstellen kann, muß ein frisches Filter mindestens 2 Stunden bestaubt werden. Nach der Bestäubung wird das Filter sofort gemessen.

Erfahrungsgemäß liegt  $F_\alpha$  für solche Meßreihen bei Werten von 4,0.

Die Unsicherheit des Kompensationsfaktors von etwa 20% hängt im wesentlichen von den Schwankungen der Alpha-Zählrate  $R_1$  ab, die insbesondere durch die Schwankungen der Po-218-Aktivitätskonzentration verursacht werden. Die Schwankungen von  $R_3$  und  $R_4$  sind bei Bestäubungszeiten von mehr als 2 Stunden vernachlässigbar.

## 5 Berechnung der Analyseergebnisse

Die Berechnung der Aktivitätskonzentration erfolgt nach Gleichung 2:

$$c = \frac{R_1 - F_\alpha (R_3 - R_4)}{\epsilon_\alpha \cdot \dot{V} \cdot t_s} = \frac{R_k}{\epsilon_\alpha \cdot \dot{V} \cdot t_s} = \varphi \cdot R_k \quad (2)$$

mit

$c$  = Aktivitätskonzentration in  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$

$\epsilon_\alpha$  = Alpha-Nachweiswahrscheinlichkeit in  $\text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

$\dot{V}$  = Luftvolumenstrom in  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

- $t_s$  = Sammelzeit (Bestäubungszeit) in s  
 $R_1$  = Alpha-Zählrate aus Zählrohr 1 in  $s^{-1}$   
 $R_3$  = Gesamt-Pseudokoinzidenzzählrate gemessen durch Koinzidenz zwischen Zählrohr 1 und Zählrohr 2 in  $s^{-1}$   
 $R_4$  = Zufällige Koinzidenzzählrate (die Zählrate der zufälligen Koinzidenzen wird mit einer zweiten, zeitlich verschobenen Koinzidenzstufe gemessen) in  $s^{-1}$   
 $R_k$  = Zählrate für die künstliche Aktivität in  $s^{-1}$   
 $\varphi$  = Verfahrensbezogener Kalibrierfaktor in  $Bq \cdot s \cdot m^{-3}$  ( $\varphi = \varepsilon_s^{-1} \cdot \dot{V}^{-1} \cdot t_s^{-1}$ )  
 $F_\alpha$  = Kompensationsfaktor für die Alpha-Zählrate

Die Berechnung der Standardabweichung  $s(c)$  der Aktivitätskonzentration unter ausschließlicher Berücksichtigung der Meßgrößen  $R_1$ ,  $R_3$  und  $R_4$  erfolgt gemäß Gleichung 3.

$$s(c) = \varphi \sqrt{\frac{s^2(\varepsilon_\alpha)}{\varepsilon_\alpha^2} \cdot [R_1 - F_\alpha (R_3 - R_4)]^2 + s^2(F_\alpha) \cdot (R_3 - R_4)^2 + \frac{R_1}{t_m} + \frac{F_\alpha^2 \cdot R_3}{t_m} + \frac{F_\alpha^2 \cdot R_4}{t_m}} \quad (3)$$

- $s(c)$  = Standardabweichung der Aktivitätskonzentration  $c$  in  $Bq \cdot m^{-3}$   
 $s(\varepsilon_\alpha)$  = Standardabweichung der Alpha-Nachweiswahrscheinlichkeit  
 $s(F_\alpha)$  = Standardabweichung von  $F_\alpha$   
 $t_m$  = Meßzeit in s

Für  $F_\alpha$  wird eine Rechteckverteilung im Bereich  $(F_\alpha - a, F_\alpha + a)$  von  $\pm 20\%$  angenommen. Für  $F_\alpha = 4,0$  resultiert daraus ein Wert von  $a = 0,8$  und daraus ein Wert für die Standardabweichung von  $s(F_\alpha) = 0,577a = 0,46161$  (5).

## 5.1 Rechenbeispiel

Für die Berechnung der künstlichen Gesamt-Alpha-Aktivitätskonzentration werden in einer Beispielrechnung folgende Werte angenommen:

- $\varepsilon_\alpha = 0,28 Bq^{-1} \cdot s^{-1}$   
 $V = \dot{V} \cdot t_s = 1265,0 m^3$  ( $V$  = Gesamtvolumen bei einem gemittelten Luftvolumenstrom von  $0,01465 m^3 \cdot s^{-1}$ )  
 $F_\alpha = 4,0$   
 $t_m = 600 s$   
 $R_1 = 30 s^{-1}$   
 $R_3 = 3,55 s^{-1}$   
 $R_4 = 0,12 s^{-1}$

Mit Gleichung 2 ergibt sich:

$$c = \frac{30,0 - 4,0 \cdot (3,55 - 0,12)}{0,28 \cdot 1265} = 0,046 Bq \cdot m^{-3}$$

Damit resultiert eine Gesamt-Alpha-Aktivitätskonzentration von  $0,046 Bq \cdot m^{-3}$ .

Die Berechnung der Standardabweichung  $s(c)$  für die Aktivitätskonzentration  $c$  erfolgt unter Berücksichtigung der Gleichung (3) und nachfolgender Zahlenwerte:

- $\varphi = 0,0028 Bq \cdot s \cdot m^{-3}$   
 $F_\alpha = 4,0$

$$\begin{aligned} s(\varepsilon_\alpha) &= 0,009 \\ s(F_\alpha) &= 0,4616 \\ t_m &= 600 \text{ s} \end{aligned}$$

$$s(c) = 0,0028 \sqrt{0,0001 \cdot [30 - 4,0 (3,55 - 0,12)]^2 + 0,2131 \cdot (3,55 - 0,12)^2 + \frac{30}{600} + \frac{16 \cdot 3,55}{600} + \frac{16 \cdot 0,12}{600}}$$

$$s(c) = 0,0048 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

Als Ergebnis dieses Rechenbeispiels werden die Aktivitätskonzentration der künstlichen Gesamt-Alpha-Aktivität und die Standardabweichung angegeben als

$$c = (4,6 \pm 0,5) \cdot 10^{-2} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}.$$

## 5.2 Fehlerbetrachtung

Die Beispielrechnungen orientieren sich an einem konstanten Pegel der kurzlebigen Radon-Folgeproduktkonzentration von Bi-214 und Pb-214 von ca.  $10 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ . Aufgrund meteorologischer Einflüsse ist dieser Pegel nicht konstant und kann bis zu einem Faktor von 5 zu- oder abnehmen. Dies wirkt sich erheblich auf die berechneten Aktivitätskonzentrationen und die Nachweisgrenzen aus. Der detektorbezogene Nulleffekt ist kleiner als 1 % der gemessenen Zählraten und wird vernachlässigt.

Bei sehr hohen, natürlichen Alpha-Zählraten von etwa 1000 Impulsen pro Sekunde erreicht das ABPD-Verfahren die Grenzen seiner Leistungsfähigkeit.

## 6 Nachweisgrenzen des Verfahrens

### 6.1 Theorie

Die Nachweisgrenze  $g$  wird in Anlehnung an das Kap. IV.5 dieser Meßanleitungen nach folgender Gleichung 4 berechnet

$$g = \varphi \cdot (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \cdot \sqrt{F_\alpha \cdot \frac{(R_3 - R_4)}{t_m} + F_\alpha^2 \cdot \frac{(R_3 + R_4)}{t_m} + s^2(F_\alpha) \cdot (R_3 - R_4)^2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} g &= \text{Nachweisgrenze in Bq} \cdot \text{m}^{-3} \\ \varphi &= \text{Verfahrensbezogener Kalibrierfaktor in Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3} \\ s(F_\alpha) &= \text{Standardabweichung von } F_\alpha \\ k_{1-\alpha} &= 3,0 \\ k_{1-\beta} &= 1,645 \\ t_m &= \text{Meßzeit in s} \end{aligned}$$

### 6.2 Rechenbeispiel

Die Nachweisgrenze wird gemäß Gleichung 4 und nachfolgender Zahlenwerte berechnet:

$$\varphi = 0,0028 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\begin{aligned}F_{\alpha} &= 4,0 \\t_m &= 600 \text{ s} \\R_3 &= 3,55 \text{ s}^{-1} \\R_4 &= 0,12 \text{ s}^{-1} \\s(F_{\alpha}) &= 0,4616\end{aligned}$$

$$g = 0,0028 \cdot (3,0 + 1,645) \cdot \sqrt{4 \cdot \frac{(3,55 - 0,12)}{600} + 16 \cdot \frac{(3,55 + 0,12)}{600} + (0,4616)^2 \cdot (3,55 - 0,12)^2}$$

Damit ergibt sich für die Nachweisgrenze ein Wert von  $g = 0,021 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Bei einem Pegel der natürlichen Aktivitätskonzentration von  $80 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  resultiert ein erhöhter Wert der Gesamt-Pseudokoinzidenzzählrate  $R_3$  von  $11 \text{ s}^{-1}$ ; die zufällige Koinzidenzzählrate  $R_4$  wird davon nicht beeinflusst. Insgesamt wird die Nachweisgrenze gegenüber dem Rechenbeispiel um den Faktor 3 erhöht.

## 7 Verzeichnis der erforderlichen Chemikalien und Geräte

### 7.1. Chemikalien und Verbrauchsmaterial

- Zählgas P10 (90 % Argon/10 % Methan).
- Glasfaserfilter; Klasse S, Nr. 10 nach DIN 24 184, 200 mm Durchmesser
- Kalibrierstrahler Am-241, Sr-90 mit einem Durchmesser von 200 mm

### 7.2 Geräte

- Staubprobensammler mit Filterhalter
- Gasdurchflußzähler und Ringkanalgebläse
- Meßkanal und Auswertelektronik mit Pseudokoinzidenzstufe, Hochspannungsversorgung, Antikoinzidenzeinheit
- Dreifach-Zählrohrsystem mit integriertem ladungsempfindlichem Vorverstärker, inklusive Filterhalterung
- Reduzierventil für P10 Gas

### Literatur

- (1) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Integrierten Meß- und Informationssystem nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz (AVV-IMIS). Bundesanzeiger 47, Nummer 200a vom 24. Oktober 1995
- (2) Normenausschuß Kerntechnik im DIN e.V. (Hrsg.): Typprüfung von Schwebstofffiltern, DIN 24184, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1984
- (3) H. Gebauer, Eine Methode zur Kompensation der natürlichen Radioaktivität der Luft durch  $\beta$ - $\alpha$ -Pseudokoinzidenzen; Kerntechnik 7, 1965, A. 322
- (4) H. Kiefer und R. Maushart, Strahlenschutzmeßtechnik, Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1964
- (5) DIN 1319-3, Grundlagen der Meßtechnik – Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit, Beuth Verlag, Berlin, Köln, 1996