

**Verfahren zur Bestimmung der  
mittleren Aktivitätskonzentrationen  
von aerosolpartikelgetragenen  
Strontium-89 und Strontium-90  
in der Fortluft kerntechnischer Anlagen**

J-Sr-89/Sr-90-ALUFT-01

Bearbeiter:

K. Vogl  
A. Heckel  
P. Gesewsky<sup>†</sup>

Leitstelle für Fortluft aus kerntechnischen Anlagen

# **Verfahren zur Bestimmung der mittleren Aktivitätskonzentrationen von aerosolpartikelgetragendem Strontium-89 und Strontium-90 in der Fortluft kerntechnischer Anlagen**

## **1 Anwendbarkeit**

Das im folgenden beschriebene Verfahren für die Bestimmung der Aktivitätskonzentration der Strontiumisotope Sr-90 und auch Sr-89 in der Fortluft lässt sich sowohl auf die Emissions- als auch auf die Immissionsüberwachung anwenden. Das hier beschriebene Verfahren kann mit entsprechenden Modifikationen auch auf andere Medien übertragen werden.

## **2 Probeentnahme**

Aus der Fortluft der kerntechnischen Anlage wird mittels eines Probeentnahmesystems ein repräsentativer Teilluftstrom entnommen. Die aerosolpartikelgetragenen Radionuklide Sr-90 und Sr-89 werden kontinuierlich auf einem Schwebstofffilter mit einem Abscheidegrad über 0,995 (H12 oder besser nach DIN EN 1822, Teil 1) abgeschieden (1). Der Volumenstrom durch den Schwebstofffilter beträgt einige Kubikmeter pro Stunde.

Als Schwebstofffilter können sowohl Glasfaser- als auch Membranfilter mit einem Porendurchmesser von 4 µm bis 8 µm eingesetzt werden (2). Die meisten Vorteile bietet ein gewebeunterstützter Teflonfilter mit einer Porengröße von 5 µm (3).

Ausführliche Hinweise zur Probeentnahme, insbesondere Angaben zur Halterung des Schwebstofffilters und zum Aufbau des Probeentnahmesystems, werden in dem Verfahren J-γ-SPEKT-ALUFT-03 dieser Messanleitungen und in der Literatur (4) gegeben.

Bei Messungen gemäß den Anforderungen der KTA-Regel 1503.1 werden die Schwebstofffilter wöchentlich gewechselt und für die Messung der Aktivitätskonzentration zu Quartalsproben zusammengefasst (5).

## **3 Analyse**

### **3.1 Prinzip des Verfahrens**

Zur Trennung des radioaktiven Strontiums wird die Probe mit inaktivem Strontiumträger versetzt. Nach dem Auslaugen bzw. Auflösen der Filter werden die Erdalkalisulfate ausgefällt; Eisen, Magnesium und Aluminium bleiben in der Lösung.

Die ausgefällten Sulfate werden in Carbonate umgewandelt und wieder gelöst. Mittels einer Bariumchromat-Fällung werden Barium, Radium und Blei als Chromate abgetrennt. Eine Abtrennung des Calciums kann im Allgemeinen entfallen, da geringe Mengen – bis zu 40 mg – im letzten Fällungsschritt durch Zugabe von EDTA komplexiert werden. Durch Scavenger-Fällung mit  $\text{Fe}^{3+}$  werden alle Radionuklide, für die kein Träger in der Lösung vorliegt, abgetrennt.

Nach Fällung des Strontiums als Strontiumsulfat in Gegenwart von EDTA wird das erste Messpräparat im Low-level-Proportionalzähler 1000 Minuten gemessen. Diese Messung dient der Bestimmung der Summenaktivität von Sr-89 und Sr-90. Die chemische Ausbeute wird vor der Messung gravimetrisch bestimmt (siehe Abbildung 1).

Nach zwei bis drei Wochen, in denen Y-90, das Tochternuklid von Sr-90, bis auf mehr als 97 % nachgebildet wurde, wird das Yttrium als Oxalat abgetrennt, ein zweites Messpräparat hergestellt und ebenfalls 1000 Minuten gemessen (siehe Abbildung 2). Aus beiden Messungen kann die Aktivität von Sr-89 und Sr-90 berechnet werden. Die chemische Ausbeute wird gravimetrisch mit Yttriumoxalat oder nach zweistündiger Veraschung bei 900 °C als Yttriumoxid ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) bestimmt.

## 3.2 Probenvorbereitung

**3.2.1** Teflonmembranfilter werden in Transparentpapier (kein Papier verwenden, das als Füllstoff Bariumsulfat enthält) eingeschlagen und zusammengefaltet. Die Veraschung erfolgt in einem Quarzbecherglas oder Porzellanbecher, der mit einer perforierten Aluminiumfolie abgedeckt ist. Je nach Filtermenge dauert die Veraschung bei 600 °C vier bis sechs Stunden. Die Asche wird in 150 ml Salzsäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gelöst, nachdem 10 ml Strontiumträgerlösung (200 mg  $\text{Sr}^{2+}$ ) zugegeben wurden.

**3.2.2** Glasfaserfilter werden in einem 600 ml-Becherglas mit 10 ml Strontiumträgerlösung (200 mg  $\text{Sr}^{2+}$ ) und 300 ml Salzsäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) versetzt. Das Becherglas wird mit einem Uhrglas abgedeckt und unter starkem Rühren bis zum Sieden erhitzt. Nach einer Stunde wird die Filtermatrix über eine Hahnsche Nutsche über ein Weißbandfilter abgesaugt. Der Filterkuchen wird zweimal mit jeweils 20 ml Salzsäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gewaschen und anschließend verworfen.

**3.2.3** Membranfilter werden in einem 600 ml-Becherglas mit 10 ml Strontiumträgerlösung (200 mg  $\text{Sr}^{2+}$ ) versetzt und in 150 ml Königswasser unter Rühren in der Hitze gelöst.

## 3.3 Radiochemische Trennung

**3.3.1** Zu der klaren Lösung werden pro 100 ml Lösung 5 g Ammoniumsulfat gegeben und unter Rühren gelöst. Nach ca. 30 Minuten wird der entstandene Niederschlag abzentrifugiert und mit wenig destilliertem Wasser wieder in das Becherglas gespült. Der Niederschlag entsteht bei diesem Schritt in der Regel sehr langsam (hoher Dekontaminationsfaktor).

**3.3.2** Zu dem Rückstand im Becherglas werden 100 ml destilliertes Wasser, drei Natriumhydroxid-Plätzchen und ca. 3 g Natriumcarbonat gegeben. Der pH-Wert der Lösung muss größer als 7 sein. Anschließend wird die Lösung in der Siedehitze mindestens 30 Minuten gerührt. Nach dem Abkühlen wird der entstandene Nieder-

schlag abzentrifugiert, dreimal mit destilliertem Wasser gewaschen und in möglichst wenig Salzsäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gelöst.

**3.3.3** Die Lösung des Niederschlags wird mit 60 ml destilliertem Wasser verdünnt. Nach Zugabe von 1 ml Eisenträgerlösung ( $20 \text{ mg Fe}^{3+}$ ) wird unter Rühren durch tropfenweise Zugabe von Ammoniak ( $13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) das Eisenhydroxid ausgefällt. Der Niederschlag wird abzentrifugiert und in ein anderes Zentrifugenglas überführt.

**3.3.4** Der Überstand wird mit einigen Tropfen Methylrot als Indikator versetzt und mit Salzsäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) auf einen pH-Wert von etwa 4 eingestellt. Danach werden 2 ml Essigsäure ( $6 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ), 2 ml Ammoniumacetatlösung ( $3,25 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) sowie 2 ml Bariumträgerlösung ( $40 \text{ mg Ba}^{2+}$ ) zur Lösung gegeben. Durch Zugabe von 1 ml kaltgesättigter Ammoniumchromatlösung wird das Bariumchromat ausgefällt. Der Niederschlag wird abzentrifugiert und die überstehende Lösung in ein anderes Zentrifugenglas überführt (pH = 4,5).

**3.3.5** Die Lösung wird mit Ammoniak ( $13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) auf den pH-Wert 11 eingestellt (Farbumschlag von orange nach gelb). Durch Zugabe von ca. 2 g Ammoniumcarbonat werden die Carbonate ausgefällt. Der Niederschlag wird abzentrifugiert, mit destilliertem Wasser gewaschen und der Überstand verworfen (Chromat-Abfall).

**3.3.6** Der Niederschlag wird in möglichst wenig Salzsäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gelöst. Nach Zugabe von 0,5 ml Yttriumträgerlösung ( $20 \text{ mg Y}^{3+}$ ), 10 ml Titriplex-III-Lösung ( $0,1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und einigen Tropfen Phenolphthalein wird Ammoniak ( $13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) bis zum Farbumschlag nach rot zugegeben. Nach Zugabe von 40 ml Ammoniumsulfatlösung ( $0,75 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und Methylrot als Indikator wird mit Schwefelsäure ( $8 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) auf einen pH-Wert von etwa 4 eingestellt (Farbumschlag nach rot). Der Zeitpunkt der Strontiumsulfatfällung wird notiert.

**3.3.7** Nach ca. 20 Minuten wird der Strontiumsulfat-Niederschlag über ein ausgewogenes Blaubandfilter mittels einer Hahnschen Nutsche abgesaugt. Der Niederschlag wird einmal mit destilliertem Wasser und anschließend mit wenig Aceton gewaschen und bei  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Nach dem Auswiegen wird das Messpräparat (Messpräparat 1) im Low-level-Proportionalzähler (siehe Abschnitt 7.2) gemessen.

**3.3.8** Nach 10 bis 20 Tagen wird der Strontiumsulfat-Niederschlag mit destilliertem Wasser vollständig in ein 600 ml-Becherglas überführt. Man fügt drei Natriumhydroxid-Plättchen, 1 ml Yttriumträgerlösung ( $40 \text{ mg Y}^{3+}$ ), 100 ml destilliertes Wasser und ca. 3 g Natriumcarbonat hinzu und erhitzt unter kräftigem Rühren 30 Minuten bis zum Sieden. Nach dem Abkühlen wird der entstandene Niederschlag abzentrifugiert und dreimal mit destilliertem Wasser gewaschen.

**3.3.9** Anschließend wird der Niederschlag in möglichst wenig Salzsäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) aufgelöst. Zu der Lösung im Zentrifugenglas werden ca. 60 ml destilliertes Wasser gegeben und das Yttrium mit Ammoniak ( $13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) als Yttriumhydroxid ausgefällt (pH-Wert größer als 7). Der Zeitpunkt der Fällung wird notiert. Der in der Lösung kaum sichtbare Niederschlag wird abzentrifugiert und der Überstand verworfen.

**3.3.10** Der Rückstand wird mit wenig Salzsäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) erneut gelöst und mit 60 ml destilliertem Wasser, 5 ml Strontiumträgerlösung ( $100 \text{ mg Sr}^{2+}$ ) und soviel Ammoniak ( $13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) versetzt, dass der pH-Wert der Lösung im Bereich 8 bis 9 liegt. Der Niederschlag wird abzentrifugiert und anschließend dreimal mit destilliertem Wasser, dem einige Tropfen Ammoniak ( $13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) hinzugefügt sind, gewaschen.

**3.3.11** Der Niederschlag wird mit wenig Salzsäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gelöst. Die Lösung wird mit 60 ml destilliertem Wasser, 5 ml Ammoniumacetatlösung ( $3,25 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und 5 ml Essigsäure ( $6 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) auf einen pH-Wert von ca. 4,5 eingestellt. Durch Zugabe von 2 ml kaltgesättigter Ammoniumoxalatlösung wird Yttrium als Oxalat ausgefällt. Die Lösung mit dem Niederschlag wird über ein gewogenes Blaubandfilter gegeben; der Rückstand wird dreimal mit destilliertem Wasser und mit Aceton gewaschen und bei  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  im Trockenschrank getrocknet. Nach dem Auswiegen wird das Messpräparat (Messpräparat 2) im Low-level-Proportionalzähler (siehe Abschnitt 7.2) gemessen. Die chemische Ausbeute wird nach zweistündiger Veraschung des Yttriumoxalates zu Yttriumoxid bei  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  gravimetrisch bestimmt.

### Anmerkung

Folgende Schwierigkeiten können während der radiochemischen Trennung auftreten und müssen vermieden werden:

- Der Niederschlag der Carbonate nach dem Sodauszug (siehe Abschnitt 3.3.2) muss unbedingt gewaschen werden, da beim Auflösen der Carbonate mit Säuren durch noch anwesende Sulfationen erneut Erdalkalisulfate ausfallen.
- Damit die Eisenhydroxid-Fällung (siehe Abschnitt 3.3.3) über das gesamte Volumen im Zentrifugenglas erfolgt und die Dekontamination somit vollständig ist, muss die Lösung im Zentrifugenglas gerührt werden.
- Bei der Bariumchromat-Fällung in Abschnitt 3.3.4 wird der Niederschlag oft erst nach dem Zentrifugieren als gelber Bodensatz sichtbar.
- Der Strontiumsulfat-Niederschlag (siehe Abschnitt 3.3.7) darf nicht länger als eine Stunde in der Lösung altern (auf keinen Fall über Nacht), da die freie EDTA auskristallisieren und die chemische Ausbeute verfälschen kann.
- Beim Absaugen des Yttriumoxalat-Niederschlags (siehe Abschnitt 3.3.11) sollte zu Beginn kein hohes Vakuum angelegt werden, da der sehr feine Niederschlag leicht durch das Filter gesaugt werden kann.
- Die Fällungen nach den Abschnitten 3.3.3, 3.3.9 und 3.3.10 müssen mit carbonatfreiem Ammoniak durchgeführt werden, um eine Mitfällung des Strontiums als Carbonat zu vermeiden.
- Es ist darauf zu achten, dass beim Absaugen des Strontiumsulfat- oder Yttriumoxalat-Niederschlags keine unnötigen Mengen an Luft durchgesaugt werden, da insbesondere bei niedrigen Sr-90-Gehalten durch kurzlebige Rn-222-Folgeprodukte eine zu hohe Zählrate vorgetäuscht werden kann. Es ist zu empfehlen, mindestens eine Stunde bis zur Messung zu warten.
- Der Yttriumoxalat-Niederschlag kann je nach Fällungs- und Trocknungsbedingungen unterschiedliche Mengen Kristallwasser enthalten. Aus diesem Grund wird die gravimetrische Ausbeutebestimmung über Yttriumoxid empfohlen.

<p>Veraschen der Teflonmembranfilter und lösen in 150 ml Salzsäure (<math>7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>) nach Zugabe von 10 ml Strontiumträgerlösung (200 mg Sr) bzw.          Auslaugen der Glasfaserfilter mit 300 ml Salzsäure (<math>7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>) nach Zugabe von 10 ml Strontiumträgerlösung (200 mg Sr) bzw.          Auflösen der Membranfilter mit 150 ml Königswasser nach Zugabe von 10 ml Strontiumträgerlösung (200 mg Sr).</p>
<p>Zugabe von 5 g Ammoniumsulfat pro 100 ml Filtrat;          Nach 30 Minuten Rühren Abzentrifugieren des Niederschlags;          Niederschlag mit wenig destilliertem Wasser in ein Becherglas überführen.</p>
<p>Zugabe von 100 ml destilliertem Wasser, 3 Natriumhydroxid-Plätzchen und ca. 3 g Natriumcarbonat (pH-Wert größer als 7);          In der Siedehitze mindestens 30 Minuten Rühren, dann abkühlen lassen;          Niederschlag abzentrifugieren und mit destilliertem Wasser dreimal waschen.</p>
<p>Aufnehmen des Rückstands mit einigen Tropfen Salzsäure (<math>7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>);          Zugabe von 60 ml destilliertem Wasser und 1 ml Eisenträgerlösung (20 mg Fe);          Eisenhydroxid-Fällung durch tropfenweise Zugabe von Ammoniaklösung (<math>13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>);          Abzentrifugieren des Niederschlages und Verwerfen des Niederschlags.</p>
<p>Zum Überstand einige Tropfen Methylrot und Salzsäure (<math>7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>) geben (pH-Wert ca. 4);          Zugabe von 2 ml Essigsäure (<math>6 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>), 2 ml Ammoniumacetatlösung (<math>3,25 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>) und 2 ml Bariumträgerlösung (40 mg Ba);          Fällung des Bariumchromats durch Zugabe von Ammoniumchromatlösung (kaltgesättigt);          Abzentrifugieren des Niederschlages und Verwerfen des Niederschlags.</p>
<p>Einstellen des pH-Wertes des Überstands auf 11 mit Ammoniaklösung (<math>13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>);          Fällung der Carbonate durch Zugabe von 2 g Ammoniumcarbamat;          Abzentrifugieren des Niederschlages, Waschen mit destilliertem Wasser.</p>
<p>Aufnehmen des Rückstands mit einigen Tropfen Salzsäure (<math>7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>);          Zugabe von 0,5 ml Yttriumträgerlösung (20 mg Y), 10 ml Titriplex-III-Lösung (<math>0,1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>), einigen Tropfen Phenolphthalein und Ammoniaklösung (<math>13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>) bis Farbumschlag nach rot;          Zugabe von 40 ml Ammoniumsulfatlösung (<math>0,75 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>) und Methylrot;          Einstellen des pH-Wertes auf 4 mit Schwefelsäure (<math>8 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}</math>);          Zeitpunkt der Strontiumsulfatfällung notieren.</p>
<p>Absaugen des Niederschlags nach 20 Minuten mit einer Hahnschen Nutsche;          Waschen mit destilliertem Wasser und wenig Aceton;          Trocknen bei <math>110 \text{ }^\circ\text{C}</math>;          Messung der Aktivität mit Low-level-Antikoinzidenz-Proportionalzähler.</p>

**Abb. 1:** Schema des radiochemischen Trennungsgangs (Strontiumsulfat-Fällung)

Überführen des Strontiumsulfatniederschlags in ein Becherglas mit destilliertem Wasser nach 10 bis 20 Tagen;

Zugabe von 100 ml destilliertem Wasser, 3 Natriumhydroxid-Plätzchen, 1 ml Yttriumträgerlösung (40 mg Y) und 3 g Natriumcarbonat;

30 Minuten bis zum Sieden erhitzen;

Abzentrifugieren des Niederschlags nach dem Abkühlen

Dreimal Waschen mit destilliertem Wasser.

Aufnehmen des Niederschlags mit einigen Tropfen Salzsäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ );

Zugabe von 60 ml destilliertem Wasser;

Fällung des Yttriumhydroxids mit Ammoniaklösung ( $13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) (pH-Wert größer als 7); Zeitpunkt der Fällung notieren.

Abzentrifugieren des Niederschlags.

Aufnehmen des Niederschlags mit einigen Tropfen Salzsäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ );

Zugabe von 60 ml destilliertem Wasser und 5 ml Strontiumträgerlösung (100 mg Sr);

Einstellen des pH-Werts auf 8 bis 9 mit Ammoniaklösung ( $13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ );

Abzentrifugieren des Niederschlags;

Dreimal Waschen mit destilliertem Wasser, dem einige Tropfen Ammoniaklösung ( $13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) zugefügt sind.

Aufnehmen des Niederschlags mit einigen Tropfen Salzsäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ );

Zugabe von 60 ml destilliertem Wasser und 5 ml Ammoniumacetatlösung ( $3,25 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ );

Einstellen des pH-Werts auf 4,5 mit 5 ml Essigsäure ( $6 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ );

Fällung des Yttriumoxalates mit 2 ml Ammoniumoxalatlösung (kaltgesättigt);

Filtrieren der Lösung mit dem Niederschlags mit Hahnscher Nutsche;

Dreimal Waschen mit destilliertem Wasser und anschließend mit wenig Aceton.

Trocknen bei  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Auswägen des Niederschlags;

Messung mit Low-level-Antikoinzidenz-Proportionalzähler;

Gravimetrische Bestimmung der chemischen Ausbeute nach Veraschung des Yttriumoxalates zu Yttriumoxid bei  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Abb. 2:** Schema des radiochemischen Trennungsgangs (Yttriumoxalat-Fällung)

## 4 Messung der Aktivität

Sowohl die Messung des Strontiumsulfat-Messpräparates (Messpräparat 1) als auch des Yttriumoxalat-Messpräparates (Messpräparat 2) erfolgt mit einer Low-level-Antikoinzidenz-Messeinrichtung, bestehend aus einem Durchflussproportionalzählrohr und einem Schirmzählrohr. Die Nulleffektzählrate beträgt bei dieser Messanordnung ca.  $0,008 \text{ s}^{-1}$ . Die Messzeiträume liegen in der Regel bei 1000 Minuten.

Zwei bis drei Wochen nach Abtrennung des Y-90 und der ersten Messung hat sich das Gleichgewicht zwischen den Aktivitäten von Sr-90 und Y-90 eingestellt, so dass nach Herstellung des Yttriumoxalat-Messpräparates (siehe Abschnitte 3.3.8 bis 3.3.11) eine erneute Messung zur Bestimmung der Y-90-Aktivität durchgeführt werden kann. Aus der erhaltenen Y-90-Aktivität kann nun auf die Sr-90-Aktivität zurückgerechnet werden. Das Ergebnis dieser Berechnung wird auch zur Bestimmung der Sr-89-Aktivität durch Differenzbildung der Sr-90-Aktivität mit der gemessenen Sr-89/Sr-90-Summenaktivität herangezogen.

### 4.1 Kalibrierung

Zur Kalibrierung werden aus Sr-89- und Sr-90-Lösungen bekannter Aktivität unter Zusatz unterschiedlicher Strontiumträgermengen Kalibrierpräparate mit Massenbelegungen zwischen 100 mg und 400 mg Strontiumsulfat nach Abschnitt 3.3.7 hergestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Sr-90-Kalibrierpräparate spätestens eine Stunde nach Abtrennung des Y-90 gemessen werden müssen, da andernfalls die Aktivität des nachgebildeten Y-90 nicht vernachlässigt werden kann. Die Radiostrontiumaktivitäten der Kalibrierpräparate ergeben sich aus der Aktivitätskonzentration der eingesetzten Lösungen, der eingesetzten Masse und der chemischen Strontiumausbeute. Die Nachweisvermögen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  lassen sich aus den Aktivitäten der Kalibrierpräparate und den Nettozählraten bestimmen.

Wegen der geringen Energie der Betastrahlung des Sr-90 lässt sich das Nachweisvermögen  $\varepsilon_2$  als lineare Funktion der Masse an Strontiumsulfat  $m_{\text{SrSO}_4}$  nach Gleichung (1) mit den Regressionsparametern  $a_0$  und  $a_1$  in den Einheiten  $\text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $\text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$  darstellen.

$$\varepsilon_2 = a_1 \cdot m_{\text{SrSO}_4} + a_0 \quad (1)$$

Die Sr-90-Kalibrierpräparate werden nach etwa drei Tagen erneut einer Messung unterzogen und aus der Differenz der Zählraten dieser und der ersten Messung unter Berücksichtigung des Aufbaus der Aktivität der Sr-90-Tochter Y-90 das Nachweisvermögen  $\varepsilon_3$  berechnet.

Das Nachweisvermögen  $\varepsilon_4$  wird ermittelt, indem aus einer Sr-90-Lösung bekannter Aktivität das im radioaktiven Gleichgewicht befindliche Y-90, wie im Abschnitt 3.3.11 angegeben, abgetrennt, seine Aktivität gemessen und die chemische Ausbeute bestimmt wird. Das Nachweisvermögen wird unter Berücksichtigung des Y-90-Zerfalls berechnet; es werden drei bis fünf Parallelbestimmungen durchgeführt.



## 5 Berechnung der Analyseergebnisse

### 5.1 Gleichungen zur Berechnung

Die Berechnung der Sr-89- und Sr-90-Aktivitätskonzentrationen erfolgt nach den Gleichungen (2) bis (9):

$$\eta_{\text{Sr}} = \frac{m_{\text{Su}}}{m_{\text{Sr}} \cdot 2,096} \quad (2)$$

$$\eta_{\text{Y}} = \frac{m_{\text{Ox}}}{m_{\text{Y}} \cdot 3,2} \quad (3)$$

$$R_{n,1} = R_{b,1} - R_{0,1} \quad (4)$$

$$R_{n,2} = R_{b,2} - R_{0,2} \quad (5)$$

$$R_{n,3} = R_{n,1} - \omega \cdot R_{n,2} \quad (6)$$

$$\omega = \left[ \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{\text{Sr}}}) \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{m,1}})}{\lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{m,1}} \right] \cdot \frac{\lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{m,2} \cdot e^{\lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{\text{Y}}}}{\eta_{\text{Y}} \cdot \varepsilon_4 \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{m,2}}) \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{\text{G}}})} \quad (7)$$

$$c_{\text{Sr-89}} = \frac{R_{n,3} \cdot q \cdot \lambda_{\text{Sr-89}} \cdot t_{m,1} \cdot e^{\lambda_{\text{Sr-89}} \cdot (t_{\text{A}} + t_{\text{E}} + t_{\text{Sr}})}}{V \cdot \eta_{\text{Sr}} \cdot \varepsilon_1 \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{Sr-89}} \cdot t_{m,1}})} \quad (8)$$

$$c_{\text{Sr-90}} = \frac{R_{n,2} \cdot q \cdot \lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{m,2} \cdot e^{\lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{\text{Y}}} \cdot e^{\lambda_{\text{Sr-90}} \cdot (t_{\text{A}} + t_{\text{E}} + t_{\text{Sr}})}}{V \cdot \eta_{\text{Sr}} \cdot \eta_{\text{Y}} \cdot \varepsilon_4 \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{m,2}}) \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{\text{G}}})} \quad (9)$$

Die relative Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration von Sr-89  $s(c_{\text{Sr-89}}) \cdot c_{\text{Sr-89}}^{-1}$  wird nach Gleichung (10) berechnet, wobei die relativen Standardmessunsicherheiten der chemischen Ausbeute  $\eta_{\text{Y}}$  und der Nachweisvermögen  $\varepsilon_2$  und  $\varepsilon_3$  vernachlässigt werden. Die relative Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration von Sr-90  $s(c_{\text{Sr-90}}) \cdot c_{\text{Sr-90}}^{-1}$  kann mit Gleichung (11) bestimmt werden.

$$\frac{s(c_{\text{Sr-89}})}{c_{\text{Sr-89}}} = \sqrt{\frac{\frac{R_{b,1}}{t_{m,1}} + \frac{R_{0,1}}{t_{0,1}}}{R_{n,3}^2} + \frac{\omega^2 \cdot \left( \frac{R_{b,2}}{t_{m,2}} + \frac{R_{0,2}}{t_{0,2}} \right)}{R_{n,3}^2} + \frac{s^2(\varepsilon_1)}{\varepsilon_1^2} + \frac{s^2(\eta_{\text{Sr}})}{\eta_{\text{Sr}}^2}} \quad (10)$$

$$\frac{s(c_{\text{Sr-90}})}{c_{\text{Sr-90}}} = \sqrt{\frac{\frac{R_{b,2}}{t_{m,2}} + \frac{R_{0,2}}{t_{0,2}}}{R_{n,2}^2} + \frac{s^2(\varepsilon_4)}{\varepsilon_4^2} + \frac{s^2(\eta_{\text{Sr}})}{\eta_{\text{Sr}}^2} + \frac{s^2(\eta_{\text{Y}})}{\eta_{\text{Y}}^2}} \quad (11)$$

In den Gleichungen (2) bis (11) bedeuten:

- $c_r$  Aktivitätskonzentration des Radionuklids  $r$  in  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
- $s(c_r)$  Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration des Radionuklids  $r$  in  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
- $R_{b,1}$  Bruttozählrate der Aktivitätsmessung des Strontiumsulfat-Niederschlages in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $R_{b,2}$  Bruttozählrate der Aktivitätsmessung des Yttriumoxalat-Niederschlages in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $R_{0,1}$  Nulleffektzählrate für den Strontiumsulfat-Niederschlag in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $R_{0,2}$  Nulleffektzählrate für den Yttriumoxalat-Niederschlag in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $R_{n,1}$  Nettozählrate der Aktivitätsmessung des Strontiumsulfat-Niederschlages in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $R_{n,2}$  Nettozählrate der Aktivitätsmessung des Yttriumoxalat-Niederschlages in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $R_{n,3}$  Nettozählrate der Aktivitätsmessung des Sr-89 in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $\eta_{\text{Sr}}$  chemische Ausbeute des Elementes Strontium;
- $\eta_{\text{Y}}$  chemische Ausbeute des Elementes Yttrium;
- $q$  Gesamtverlustfaktor (siehe J- $\gamma$ -SPEKT-ALUFT-03);
- $V$  Luftdurchsatz in  $\text{m}^3$ ;
- $\varepsilon_1$  Nachweisvermögen für die Aktivität des Sr-89 im Strontiumsulfat-Niederschlag in  $\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- $\varepsilon_2$  Nachweisvermögen für die Aktivität des Sr-90 im Strontiumsulfat-Niederschlag in  $\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- $\varepsilon_3$  Nachweisvermögen für die Aktivität des Y-90 im Strontiumsulfat-Niederschlag in  $\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- $\varepsilon_4$  Nachweisvermögen für die Aktivität des Y-90 im Yttriumoxalat-Niederschlag in  $\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- $\lambda_r$  Zerfallskonstante des Radionuklids  $r$  in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $m_{\text{Sr}}$  Masse des als Träger eingesetzten Strontium in mg;
- $m_{\text{Y}}$  Masse des als Träger eingesetzten Yttrium in mg;
- $m_{\text{Su}}$  Masse des Strontiumsulfat-Niederschlages in mg;
- $m_{\text{Ox}}$  Masse des Yttriumoxalat-Niederschlages in mg;
- $t_A$  Zeitspanne von Ende der Probeentnahme bis zum Beginn der Probenaufbereitung in s;
- $t_E$  Zeitspanne von Beginn der Probenaufbereitung bis zur Fällung des Strontiumsulfat-Niederschlages in s;
- $t_G$  Zeitspanne von der Fällung des Strontiumsulfat-Niederschlages bis zur Fällung des Yttriumoxalat-Niederschlages in s;
- $t_{\text{Sr}}$  Zeitspanne von der Fällung des Strontiumsulfat-Niederschlages bis zur Messung der Aktivität des Strontiumsulfat-Messpräparates in s;
- $t_{\text{Y}}$  Zeitspanne von der Fällung des Yttriumoxalat-Niederschlages bis zur Messung der Aktivität des Yttriumoxalat-Messpräparates in s;
- $t_{m,1}$  Messdauer der Aktivität des Strontiumsulfat-Messpräparates in s;
- $t_{m,2}$  Messdauer der Aktivität des Yttriumoxalat-Messpräparates in s;
- $t_{0,1}$  Messdauer der Nulleffektmessung für den Strontiumsulfat-Niederschlag in s;
- $t_{0,2}$  Messdauer der Nulleffektmessung für den Yttriumoxalat-Niederschlag in s.

## 5.2 Rechenbeispiel

Die während eines Quartals gesammelten zwölf Schwebstofffilterproben wurden radiochemisch aufgearbeitet und die Aktivitäten von Sr-89, Sr-90 und Y-90 gemessen. Nach der Messung liegen für die Berechnung der Aktivitäten folgende Daten vor:

$$\begin{array}{ll}
 m_{\text{Sr}} = 200 \text{ mg}; & m_{\text{Y}} = 40 \text{ mg}; \\
 m_{\text{Su}} = 376,1 \text{ mg}; & m_{\text{Ox}} = 107,6 \text{ mg}; \\
 \varepsilon_1 = 0,348 \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}; & \varepsilon_3 = 0,409 \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}; \\
 \varepsilon_4 = 0,388 \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}; & q = 1,2; \\
 a_1 = -3,0506 \cdot 10^{-4} \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}; & a_0 = 0,329 \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}; \\
 R_{\text{b},1} = 0,173 \text{ s}^{-1}; & R_{\text{b},2} = 0,0474 \text{ s}^{-1}; \\
 R_{0,1} = 0,006 \text{ s}^{-1}; & R_{0,2} = 0,0071 \text{ s}^{-1}; \\
 t_{\text{A}} = 10368000 \text{ s}; & t_{\text{Sr}} = 39600 \text{ s}; \\
 t_{\text{Y}} = 41100 \text{ s}; & t_{\text{G}} = 864000 \text{ s}; \\
 t_{\text{E}} = 259200 \text{ s}; & \\
 t_{\text{m},1} = 60000 \text{ s}; & t_{\text{m},2} = 60000 \text{ s}; \\
 t_{0,1} = 60000 \text{ s}; & t_{0,2} = 60000 \text{ s}; \\
 \lambda_{\text{Sr-89}} = 1,59 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}; & \lambda_{\text{Y-90}} = 3,00 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}; \\
 \lambda_{\text{Sr-90}} = 7,67 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}; & V = 2000 \text{ m}^3.
 \end{array}$$

Mit den oben genannten Werten betragen die Aktivitätskonzentrationen von Sr-89 und Sr-90 gemäß Gleichung (8) bzw. Gleichung (9):

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_2 &= -3,0506 \cdot 10^{-4} \cdot 376,1 + 0,329 \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 0,214 \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \\
 \omega &= \left[ 0,214 + 0,409 \cdot (1 - e^{-3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 39600}) \cdot \frac{(1 - e^{-3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 60000})}{3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 60000} \right] \cdot \\
 &\quad \cdot \frac{3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 60000 \cdot e^{3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 41100}}{0,841 \cdot 0,388 \cdot (1 - e^{-3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 60000}) \cdot (1 - e^{-3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 864000})} = \\
 &= [0,214 + 0,409 \cdot 0,112 \cdot 0,915] \cdot \frac{0,18 \cdot 1,1312}{0,3263 \cdot 0,1647 \cdot 0,925} = \\
 &= 0,256 \cdot \frac{0,2036}{0,0497} = 1,048 \\
 \eta_{\text{Sr}} &= \frac{376,1}{200 \cdot 2,096} = 0,897
 \end{aligned}$$

$$\eta_Y = \frac{107,6}{40 \cdot 3,2} = 0,841$$

$$R_{n,1} = 0,173 - 0,006 \text{ s}^{-1} = 0,167 \text{ s}^{-1}$$

$$R_{n,2} = 0,0474 - 0,0071 \text{ s}^{-1} = 0,0403 \text{ s}^{-1}$$

$$R_{n,3} = 0,167 - 1,048 \cdot 0,0403 \text{ s}^{-1} = 0,167 - 0,042 \text{ s}^{-1} = 0,125 \text{ s}^{-1}$$

$$c_{\text{Sr-89}} = \frac{125 \cdot 1,2 \cdot 1,59 \cdot 10^{-7} \cdot 6,00 \cdot 10^4}{2000 \cdot 0,897 \cdot 0,348} \cdot \frac{e^{1,59 \cdot 10^{-7} \cdot (1,037 \cdot 10^7 + 2,592 \cdot 10^5 + 3,96 \cdot 10^4)}}{(1 - e^{-1,59 \cdot 10^{-7} \cdot 6,00 \cdot 10^4})} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} =$$

$$= 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 1,3 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$c_{\text{Sr-90}} = \frac{0,0403 \cdot 1,2 \cdot 3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 6,00 \cdot 10^4}{2000 \cdot 0,897 \cdot 0,841 \cdot 0,388} \cdot \frac{e^{3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 41100} \cdot e^{7,67 \cdot 10^{-10} \cdot (1,037 \cdot 10^7 + 2,592 \cdot 10^5 + 3,96 \cdot 10^4)}}{(1 - e^{-3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 6,00 \cdot 10^4}) \cdot (1 - e^{-3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 8,64 \cdot 10^5})} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} =$$

$$= 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 110 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

Bei einer relativen Standardmessunsicherheit der Nachweisvermögen von 5 % und einer relativen Standardmessunsicherheit der chemischen Ausbeuten von 10 % betragen die Werte der relativen Standardmessunsicherheiten der Aktivitätskonzentrationen von Sr-89 und Sr-90 gemäß dem Gleichungen (10) und (11):

$$\frac{s(c_{\text{Sr-89}})}{c_{\text{Sr-89}}} = \sqrt{\frac{\frac{0,173}{60000} + \frac{0,006}{60000}}{0,125^2} + \frac{1,048^2 \cdot \left(\frac{0,0474}{60000} + \frac{0,0071}{60000}\right)}{0,125^2} + 0,05^2 + 0,1^2} = 0,113$$

$$\frac{s(c_{\text{Sr-90}})}{c_{\text{Sr-90}}} = \sqrt{\frac{\frac{0,0474}{60000} + \frac{0,0071}{60000}}{0,0403^2} + 0,05 + 0,1^2 + 0,1^2} = 0,152$$

Damit ergeben sich folgende, zu dokumentierende Aktivitätskonzentrationen:

$$c_{\text{Sr-89}} = (1,3 \pm 0,1) \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$c_{\text{Sr-90}} = (110 \pm 16) \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

### 5.3 Unsicherheiten der Analyseergebnisse

Die Hauptquellen der Standardmessunsicherheiten bei der Bestimmung sind die zählstatistischen Standardmessunsicherheiten der Nettoimpulszahlen, die Standardmessunsicherheiten der chemischen Ausbeute sowie die Standardmessunsicherheiten der Kalibrierfaktoren.

## 6 Nachweisgrenzen des Verfahrens

### 6.1 Gleichungen zur Berechnung

Die Nachweisgrenzen  $g_{\text{Sr-89}}$  und  $g_{\text{Sr-90}}$  der Aktivitätskonzentrationen werden gemäß Kapitel IV.5 dieser Messanleitungen nach den Gleichungen (12) und (13) berechnet:

$$g_{\text{Sr-89}} = \frac{(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \cdot k_{1-\alpha} \cdot q \cdot \lambda_{\text{Sr-89}} \cdot e^{\lambda_{\text{Sr-89}} \cdot (t_A + t_E + t_{\text{Sr}})}}{2 \cdot V \cdot \eta_{\text{Sr}} \cdot \varepsilon_1 \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{Sr-89}} \cdot t_{m,1}})} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \left[ \frac{R_{0,1}}{t_{m,1}} + \frac{R_{0,1}}{t_{0,1}} + \frac{\omega \cdot R_{n,2}}{t_{m,1}} + \omega^2 \cdot \left( \frac{R_{b,2}}{t_{m,2}} + \frac{R_{0,2}}{t_{0,2}} \right) \right]}{\frac{k_{1-\alpha}^2}{t_{m,1}^2}}} \right] \quad (12)$$

$$g_{\text{Sr-90}} = \frac{(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \cdot q \cdot \lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{m,2} \cdot e^{\lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_Y} \cdot e^{\lambda_{\text{Sr-90}} \cdot (t_A + t_E + t_{\text{Sr}})}}{V \cdot \eta_{\text{Sr}} \cdot \eta_Y \cdot \varepsilon_4 \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{Y-90}} \cdot t_{m,2}}) \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{Sr-90}} \cdot t_G})} \cdot \left[ \sqrt{\frac{R_{0,2}}{t_{m,2}} + \frac{R_{0,2}}{t_{0,2}}} + \frac{(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta})}{4} \cdot \left( \frac{1}{t_{m,2}} + \frac{1}{t_{0,2}} \right) \right] \quad (13)$$

## 6.2 Rechenbeispiel

Die Werte der Nachweisgrenzen der Aktivitätskonzentrationen von Sr-89 und Sr-90 betragen bei dem Beispiel aus Abschnitt 5.1 gemäß den Gleichungen (12) und (13) mit den Werten für die Quantilen  $k_{1-\alpha} = 3$  und  $k_{1-\beta} = 1,645$ , sowie  $\omega = 1,048$ :

$$\begin{aligned}
 g_{\text{Sr-89}} &= \frac{4,645 \cdot 3 \cdot 1,2 \cdot 1,59 \cdot 10^{-7} \cdot e^{1,59 \cdot 10^{-7} \cdot (1,037 \cdot 10^7 + 2,592 \cdot 10^5 + 3,96 \cdot 10^4)}}{2 \cdot 2000 \cdot 0,897 \cdot 0,348 \cdot (1 - e^{-1,59 \cdot 10^{-7} \cdot 6,00 \cdot 10^4})} \\
 &\cdot \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \left[ \frac{0,006}{60000} + \frac{0,006}{60000} + \frac{1,048 \cdot 0,0403}{60000} + 1,048^2 \cdot \left( \frac{0,0474}{60000} + \frac{0,0071}{60000} \right) \right]}{9}} \right] \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} = \\
 &= \frac{1,368 \cdot 10^{-5}}{11,857} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot (2 \cdot 10^{-7} + 7,039 \cdot 10^{-7} + 9,976 \cdot 10^{-7})}{2,5 \cdot 10^{-9}}} \right] \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} = \\
 &= 1,154 \cdot 10^{-6} \cdot [1 + \sqrt{1 + 3042,4}] \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 6,48 \cdot 10^{-5} \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 64,8 \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \\
 g_{\text{Sr-90}} &= \frac{4,645 \cdot 1,2 \cdot 3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 60000 \cdot e^{3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 41100} \cdot e^{7,67 \cdot 10^{-10} \cdot (1,037 \cdot 10^7 + 2,592 \cdot 10^5 + 3,96 \cdot 10^4)}}{2000 \cdot 0,897 \cdot 0,841 \cdot 0,388 \cdot (1 - e^{-3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 60000}) \cdot (1 - e^{-3,00 \cdot 10^{-6} \cdot 8,64 \cdot 10^5})} \\
 &\cdot \left[ \sqrt{\frac{0,0071}{60000} + \frac{0,0071}{60000}} + \frac{4645}{4} \cdot \left( \frac{1}{60000} + \frac{1}{60000} \right) \right] \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} = \\
 &= \frac{1,143}{89,196} \cdot [0,00048 + 1,161 \cdot 0,00003] \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 6,7 \cdot 10^{-6} \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 6,7 \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}
 \end{aligned}$$

## 7 Verzeichnis der erforderlichen Chemikalien und Geräte

### 7.1 Chemikalien

Es sollten nach Möglichkeiten analysenreine Chemikalien verwendet werden.

- Aceton;
- Ammoniaklösung,  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ : 13  $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ , carbonatfrei, [+ ca. 1 g  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ];
- Ammoniumacetatlösung: 3,25  $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ;
- Ammoniumcarbamat;
- Ammoniumchromatlösung,  $(\text{NH}_4)_2\text{CrO}_4$ : kaltgesättigt;
- Ammoniumsulfatlösung,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ : 0,75  $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ;
- Ammoniumoxalatlösung: kaltgesättigt;
- Bariumträgerlösung,  $\text{BaCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ : 20 mg  $\text{Ba}^{2+}$  pro ml wässriger Lösung;
- Eisenträgerlösung,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ : 20 mg  $\text{Fe}^{3+}$  pro ml wässriger Lösung;
- Essigsäure: 6  $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ;
- Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA), Dinatriumsalz: 0,1  $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ;
- Methylrot;
- Natriumcarbonat,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ;
- Natriumhydroxid-Plätzchen,  $\text{NaOH}$ ;
- Phenolphthalein;
- Salpetersäure,  $\text{HNO}_3$ : 14  $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ;
- Salzsäure,  $\text{HCl}$ : 7  $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ , 14  $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ;
- Schwefelsäure,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ : 8  $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ;
- Strontiumträgerlösung,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ : 20 mg  $\text{Sr}^{2+}$  pro ml wässriger Lösung;
- Yttriumträgerlösung,  $\text{YCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ : 40 mg  $\text{Y}^{3+}$  pro ml wässriger Lösung.

### 7.2 Geräte

- Schwebstofffilter mit Abscheidegrad besser als 0,995  
z. B. TE 38 Schleicher & Schüll, Porengröße 5  $\mu\text{m}$ ;
- Halter für Schwebstofffilter;
- Probeentnahmesystem mit Luftfördereinrichtung und Luftdurchsatzmeter;
- Ausrüstung eines radiochemischen Labors;
- Low-level-Messeinrichtung mit Durchflussproportionalzählrohr und Schirmzählrohr in Antikoinzidenzanordnung.

## Literatur

- (1) Norm DIN EN 1822 Teil 1 Schwebstofffilter (HEPA und ULPA); Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung. 1998-07
- (2) Norm DIN 25423 Teil 3 Probenahme bei der Radioaktivitätsüberwachung der Luft: Probenahmeverfahren. 1987-03  
*Hinweis:* Diese Norm wird voraussichtlich im Jahre 2009 durch die Norm DIN ISO 2889 ersetzt.
- (3) Gesewsky, P.: Untersuchung zur Eignung von Membranfiltern für die Alpha-spektrometrie. Bericht des Instituts für Strahlenhygiene, 1986, ISH-Bericht 82
- (4) Vogl, K.: Rechnerische Abschätzung der Aerosolpartikelverluste in Probeentnahmesystemen bei kerntechnischen Anlagen: Physikalische Modelle, Vorgehensweise, Ergebnisse und weitere Ausblicke. Bericht der Fachbereiches Strahlenschutz des BfS, 1992, ST2-32/1992
- (5) Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschusses KTA 1503.1 Messung und Überwachung der Ableitung gasförmiger und aerosolgebundener radioaktiver Stoffe; Messung und Überwachung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Kaminabluft bei bestimmungsmäßigem Betrieb. Köln: Carl Heymanns Verlag. 2002-06