

**Verfahren zur  
alphaspektrometrischen Bestimmung  
der mittleren Aktivitätskonzentrationen  
von aerosolpartikelgetragenen Radionukliden  
in der Fortluft kerntechnischer Anlagen  
nach radiochemischer Trennung**

J- $\alpha$ -SPEKT-ALUFT-02

Bearbeiter:

K. Vogl  
A. Heckel

Leitstelle für Fortluft aus kerntechnischen Anlagen

# **Verfahren zur alphaspektrometrischen Bestimmung der mittleren Aktivitätskonzentrationen von aerosolpartikelgetragenen Radionukliden in der Fortluft kerntechnischer Anlagen nach radiochemischer Trennung**

## **1 Anwendbarkeit**

Das hier beschriebene Verfahren dient zur Bestimmung der mittleren Aktivitätskonzentrationen von alphastrahlenden Uran-, Plutonium-, Americium- und Curiumisotopen in der Fortluft kerntechnischer Anlagen. Diese Methode erfordert im Vergleich mit dem Verfahren J- $\alpha$ -SPEKT-ALUFT-01 eine radiochemische Trennung der Radionuklide und ist um eine Größenordnung empfindlicher. Bei dem Verfahren fallen Fraktionen an, die zur Bestimmung der mittleren Aktivitätskonzentrationen von Eisen-, Nickel- und Technetiumisotopen verwendet werden können (1).

## **2 Probeentnahme**

Aus der Fortluft der kerntechnischen Anlage wird mittels eines Probeentnahmesystems ein repräsentativer Teilluftstrom entnommen (2). Die aerosolpartikelgetragenen alphastrahlenden Radionuklide werden kontinuierlich auf einem Schwebstofffilter mit einem Abscheidegrad über 0,995, z. B. Typ H12 nach DIN EN 1822 Teil 1, abgeschieden (2, 3). Der Volumenstrom durch den Schwebstofffilter beträgt einige Kubikmeter pro Stunde.

Als Schwebstofffilter werden sowohl Glasfaser- als auch Membranfilter mit einem Porendurchmesser von 4  $\mu\text{m}$  bis 8  $\mu\text{m}$  eingesetzt (3, 4, 5). Glasfaserfilter weisen einen geringen Strömungswiderstand auf. Die Aerosolpartikel gehen mit dem inerten Fasermaterial kaum Verbindungen ein und lassen sich leicht lösen (5). Bei Cellulosemembranfiltern kann die Filtermatrix durch Zugabe von organischen Lösungsmitteln wie Aceton leicht aufgelöst werden. Falls eine Plasmaveraschungsanlage zur Probenvorbereitung benutzt wird, sollten Cellulosenitratfilter nicht verwendet werden, da sie leicht verpuffen können.

Angaben zur Halterung des Schwebstofffilters und zum Aufbau des Probeentnahmesystems sind (6) und dem Verfahren J- $\gamma$ -SPEKT-ALUFT-03 zu entnehmen.

## 3 Analyse

### 3.1 Prinzip des Verfahrens

Eine Vorveraschung der bestaubten Schwebstofffilter oder von Teilen davon ist nicht erforderlich, aber von Vorteil. Besonders dafür geeignet ist eine Plasmaveraschungsanlage, bei der die Schwebstofffilter kalt verascht werden.

Aus dem Schwebstofffilter oder der verbleibenden Filtermatrix werden die Radionuklide mit Salpetersäure ausgelaugt. Die salpetersaure Lösung wird über eine Anionenaustauschersäule 1 gegeben und das Uran aus der durchgelaufenen Lösung mit Tributylphosphat (TBP) extrahiert. Die in der wässrigen Phase verbleibenden Elemente Americium und Curium werden aus einer Mischung von Methanol und Salpetersäure auf einer Anionenaustauschersäule 2 adsorbiert und mit verdünnter Salpetersäure eluiert. Plutonium wird mit einer Mischung aus verdünnter Salzsäure und Flusssäure von der Anionenaustauschersäule 1 eluiert. Alle erhaltenen Fraktionen werden mittels Flüssig-Flüssig-Extraktionen weiter gereinigt. Zur Herstellung von Messpräparaten werden die Uran- und Plutoniumisotope auf Edelstahlplättchen elektrochemisch abgeschieden. Americium- und Curiumisotope werden mit Lanthan mitgefällt und auf Membranfiltern abgeschieden. Die Aktivität der Radionuklide wird mit ionenimplantierten Detektoren nuklidspezifisch bestimmt.

Detaillierte Beschreibungen zum Verfahren bzw. zu einzelnen Verfahrensschritten finden sich in der Literatur (1, 7).

### 3.2 Probenvorbereitung

**3.2.1** Falls eine Plasmaveraschungsanlage zur Verfügung steht, werden die Schwebstofffilter (Glasfaser- oder Membranfilter) oder Teile davon im Sauerstoffstrom in Quarzschalen etwa fünf Stunden kalt verascht (siehe Verfahren J- $\alpha$ -SPEKT-ALUFT-01).

**3.2.2** Die unbehandelten Glasfaserfilter oder die nach der Veraschung verbleibende Filtermatrix werden in dünne Streifen geschnitten. Membranfilter bzw. der nach der Veraschung verbleibende Rückstand werden von den Quarzschalen gelöst und in ein 200 ml-Becherglas gegeben.

**3.2.3** In das Becherglas werden jeweils eine genau bekannte Aktivität von ca. 50 mBq der radioaktiven Tracer Pu-236 oder Pu-242, U-232 und Am-243 sowie 0,1 ml Lanthanlösung 1 zugefügt. Da die zu erwartende Aktivität der zu messenden Nuklide etwa der des Tracers entsprechen soll, sollte bei Proben mit erwarteter hoher Aktivität die Probenmenge entsprechend reduziert werden.

**3.2.4** Die Filterstreifen bzw. Veraschungsrückstände werden in 100 ml bis 150 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) etwa zwei Stunden bei 80 °C unter ständigem Rühren ausgelaugt.

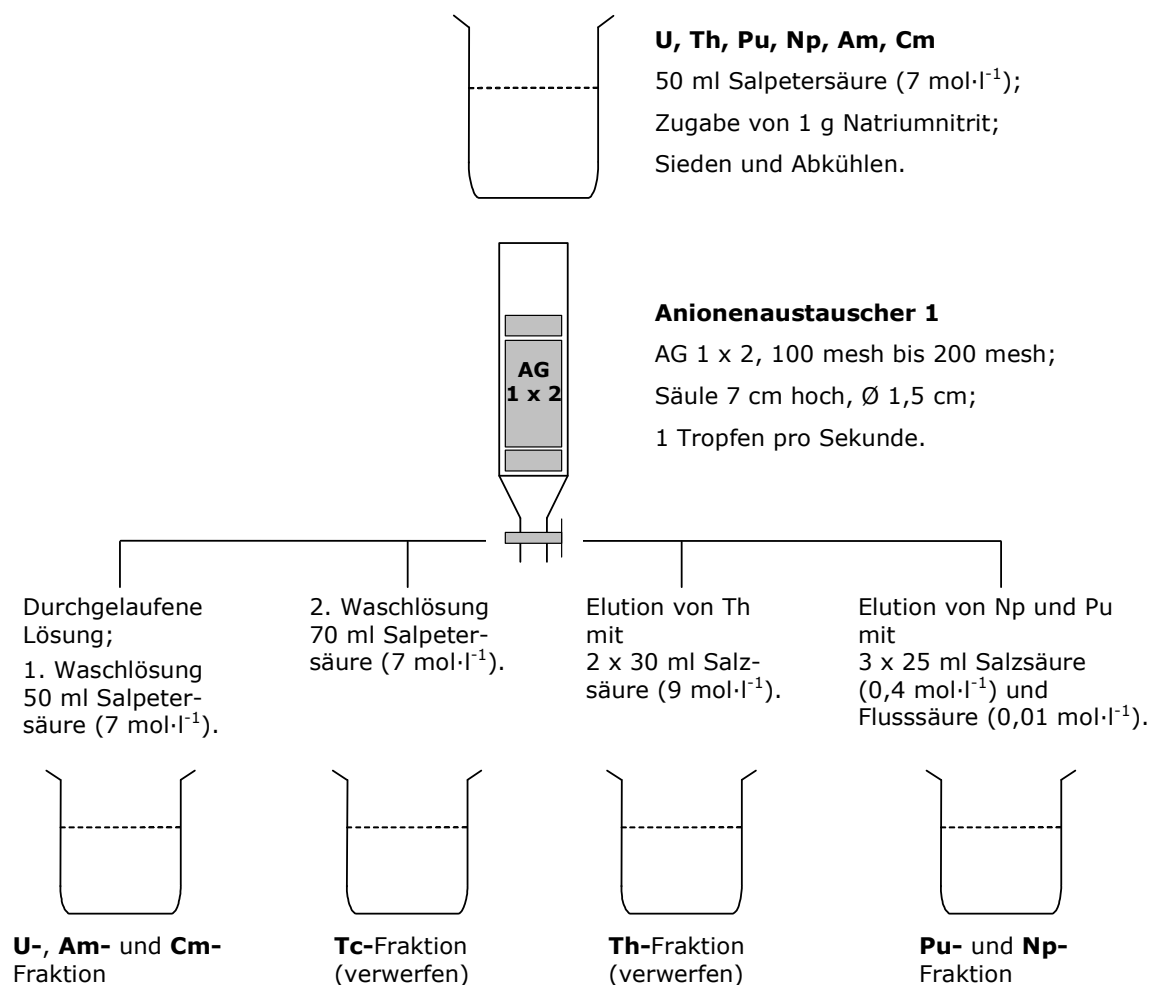
**3.2.5** Die Lösung wird durch eine grobe Glasfritte (Porosität 1) gesaugt, diese mit etwa 50 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gespült und der Filtrerrückstand verworfen. Das Filtrat wird nochmals durch ein Membranfilter mit einer Porenweite von 0,45  $\mu\text{m}$  filtriert und zur Trockne eingedampft. Der Rückstand wird mit 50 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) aufgenommen.

### 3.3 Radiochemische Trennung

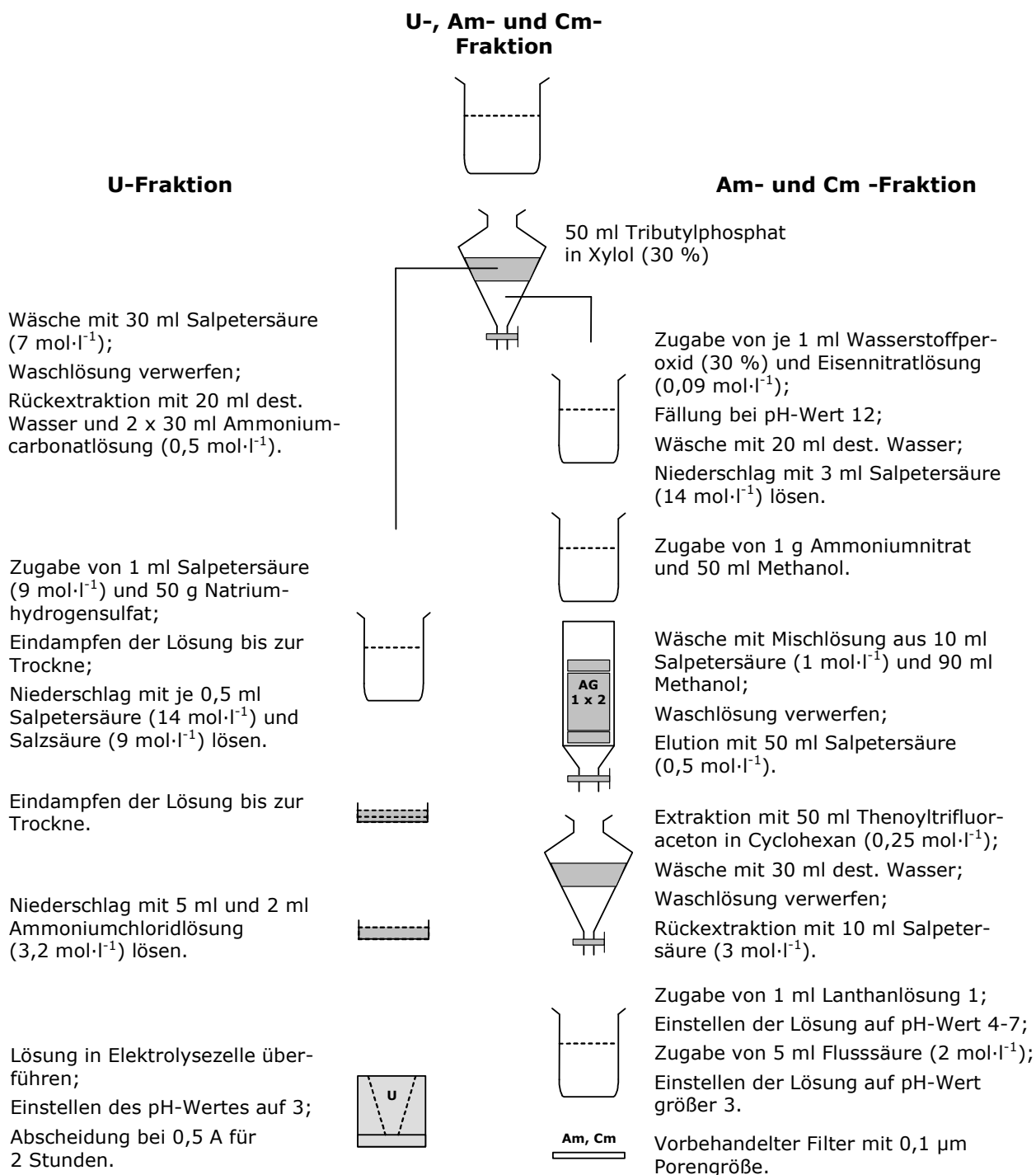
Zur Vorbereitung sind folgende Schritte erforderlich:

- Abtrennung der Elemente von der Matrix;
- Trennung der einzelnen Elemente voneinander;
- Reinigung der einzelnen Elemente;
- Herstellen der Messpräparate.

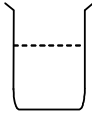
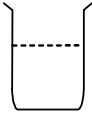



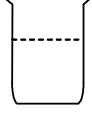


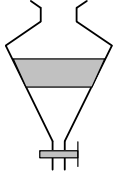
Das Schema des radiochemischen Trennungsganges ist in Abbildung 1 bis Abbildung 3 dargestellt.



**Abb. 1:** Abtrennung der Elemente von der Matrix



**Abb. 2:** Radiochemische Trennung und Reinigung sowie Herstellung von U-, Am- und Cm-Messpräparaten

<b>Th-Fraktion</b>		<b>Pu- und Np-Fraktion</b>
Eindampfen der Lösung bis zur Trockne; Niederschlag mit 0,5 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) lösen.		
Eindampfen der Lösung bis zur Trockne; Niederschlag mit 0,5 ml Salzsäure ( $9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) lösen.		
Eindampfen der Lösung bis zur Trockne; Niederschlag mit 5 ml und 2 ml Ammoniumchloridlösung ( $3,2 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) lösen.		
Lösung in Elektrolysezelle überführen; Einstellen des pH-Wertes auf 3; Abscheidung bei 0,5 A für 2 Stunden.		
		
		Zugabe von 50 g Natriumhydrogensulfat; Eindampfen der Lösung bis zur Trockne.
		Niederschlag mit 30 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) lösen; Zugabe von 0,5 g Natriumnitrit; Lösung zum Sieden erhitzen.
		Extraktion mit 50 ml Tributylphosphat in Xylol (30 %); Wäsche mit 30 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ); Waschlösung verwerfen;
		Rückextraktion mit 20 ml dest. Wasser und 2 x 30 ml Ammoniumcarbonatlösung ( $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ).
		Zugabe von 1 ml Salpetersäure ( $9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und 50 g Natriumhydrogensulfat; Eindampfen der Lösung bis zur Trockne; Niederschlag mit 0,5 ml Salzsäure ( $9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) lösen.
		Lösung in Elektrolysezelle mit 3 ml Ammoniumoxalatlösung ( $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) überführen; Einstellen des pH-Wertes auf 3; Abscheidung bei 0,5 A für 2 Stunden.

**Abb. 3:** Radiochemische Trennung und Reinigung sowie Herstellung von Th-, Pu- und Np-Messpräparaten

### 3.3.1 Abtrennung der Elemente von der Matrix

**3.3.1.1** Die salpetersaure Lösung nach Abschnitt 3.2.4 wird im Abzug mit etwa 1 g Natriumnitrit versetzt und zum Sieden erhitzt (*Vorsicht: Es entstehen nitrose Gase!*). Nach Abdampfen der nitrosen Gase wird die Lösung von der Heizplatte genommen und im Eisbad gekühlt.

**3.3.1.2** Anschließend wird sie über eine vorbehandelte Anionenaustauschersäule 1 (siehe Abschnitt 7.3.1) mit einer Fließgeschwindigkeit von einem Tropfen pro Sekunde gegeben. Danach wird der Anionenaustauscher mit 50 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gewaschen. Die durchgelaufene Lösung sowie die Waschlösung enthalten Americium, Curium und etwa 80 % bis 90 % des Uran sowie Eisen und Nickel.

**3.3.1.3** Der Anionenaustauscher wird mit weiteren 70 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gewaschen. Die Waschlösung wird verworfen oder kann für die Technetiumbestimmung verwendet werden (siehe Verfahren J-Tc-99-ALUFT-01). Eventuell vorhandenes Thorium wird anschließend mit zweimal 30 ml Salzsäure ( $9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) vom Anionenaustauscher eluiert. Das Eluat wird ebenfalls verworfen oder zur Thoriumbestimmung verwendet (1, 7).

**3.3.1.4** Das auf der Säule verbliebene Plutonium und Neptunium sowie Reste von einigen Prozent Uran werden mit dreimal 25 ml der Elutionslösung Salzsäure/Flussäure ( $\text{HCl } 0,36 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ,  $\text{HF } 0,01 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) eluiert.

### 3.3.2 Radiochemische Trennung und Reinigung der einzelnen Elemente sowie Herstellung von Messpräparaten

#### 3.3.2.1 Uranisotope

**3.3.2.1.1** Die durchgelaufene Lösung und die Waschlösung aus Abschnitt 3.3.1.2 werden in einem 250 ml-Scheidetrichter mit 50 ml Tributylphosphat in Xylol (siehe Abschnitt 7.3.3) 15 Minuten geschüttelt. Nach der Phasentrennung wird die wässrige Phase abgelassen und für die Bestimmung von Americium und Curium weiter verwendet (siehe Abschnitt 3.3.2.3).

**3.3.2.1.2** Die organische Phase wird mit 30 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gewaschen und die Waschlösung verworfen.

**3.3.2.1.3** Anschließend wird mit 20 ml destilliertem Wasser eine Minute geschüttelt, das Wasser in ein 100 ml-Becherglas abgelassen und 1 ml Salzsäure ( $9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) zugegeben. Das Uran wird durch zweimaliges, 15minütiges Schütteln mit je 30 ml Ammoniumcarbonatlösung ( $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) aus der organischen Phase rückextrahiert (*Vorsicht: Gasbildung!*). Die wässrigen Phasen werden ebenfalls in das Becherglas gegeben. Der pH-Wert der wässrigen Phase bei der zweiten Rückextraktion ist zu messen und gegebenenfalls mit weiterer Zugabe von Ammoniumcarbonatlösung ( $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) auf einen Wert im neutralen Bereich einzustellen.

#### Anmerkung:

Die Zugabe von 20 ml Wasser soll die teilweise mitextrahierte Salpetersäure verdünnen und so die bisweilen heftige Reaktion der Salpetersäure mit dem Ammoniumcarbonat vermindern.

**3.3.2.1.4** Die Lösung im Becherglas wird mit etwa 50 mg Natriumhydrogensulfat versetzt und vorsichtig eingedampft. Der Rückstand wird mit jeweils 0,5 ml Salpetersäure ( $14 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und Salzsäure ( $9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gelöst und zur Trockne eingedampft.

**Anmerkung:**

Das Natriumhydrogensulfat verhindert als Komplexbildner beim Eindampfen der Lösung die Bildung schwerlöslicher Hydroxide, die zu hohen Ausbeuteverlusten führen würden.

**3.3.2.1.5** Der verbliebene Rückstand wird mit 5 ml Ammoniumchloridlösung ( $3,2 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gelöst und in eine Elektrolysezelle (siehe Abschnitt 7.3.5) überführt. Man spült mit weiteren 2 ml Ammoniumchloridlösung ( $3,2 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) nach und stellt einen pH-Wert von ca. 3 mit verdünnter Salzsäure und ein.

**3.3.2.1.6** Die elektrochemische Abscheidung erfolgt bei einer Stromstärke von 0,5 A über einen Zeitraum von 2 Stunden. Am Ende der Abscheidezeit wird ca. 1 ml Ammoniaklösung ( $13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) in die Elektrolysezelle gegeben und etwa eine Minute weiter abgeschieden. Nach Abschalten des Stroms wird die überstehende Lösung sofort abgegossen, das Edelstahlplättchen gründlich mit verdünnter Ammoniaklösung ( $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und mit Ethanol gespült und anschließend auf einer mit Aluminiumfolie bedeckten Heizplatte bei etwa 80 °C getrocknet.

**3.3.2.1.7** Die Ausbeute an Uran beträgt etwa 80 % (1).

**3.3.2.2 Plutoniumisotope**

**3.3.2.2.1** Das Plutonium enthaltende Eluat (siehe Abschnitt 3.3.1.4) wird nach Zugabe von ca. 50 mg Natriumhydrogensulfat vorsichtig eingedampft und der Rückstand mit 30 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) aufgenommen. Die Lösung wird unter dem Abzug mit 0,5 g Natriumnitrit (*Vorsicht: Nitrose Gase!*) versetzt und zum Sieden erhitzt. Nach Abdampfen der nitrosen Gase wird die Lösung von der Heizplatte genommen und im Eisbad gekühlt.

**3.3.2.2.2** Anschließend wird die Plutonium enthaltende Lösung in einen 250 ml-Scheidetrichter gegeben und mit 50 ml Tributylphosphat in Xylol (siehe Abschnitt 7.3.3) etwa 15 Minuten geschüttelt. Nach der Phasentrennung wird die wässrige Phase abgelassen und verworfen.

**3.3.2.2.3** Die das Plutonium enthaltende organische Phase wird mit 30 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gewaschen und die Waschlösung ebenfalls verworfen.

**3.3.2.2.4** Die organische Phase wird mit 20 ml destilliertem Wasser eine Minute geschüttelt, das Wasser in ein 100 ml-Becherglas abgelassen und 1 ml Salzsäure ( $9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) in das Becherglas zugegeben. Das Plutonium wird zweimal mit jeweils 20 ml Ammoniumcarbonatlösung ( $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) durch 15minütiges Schütteln aus der organischen Phase rückextrahiert (*Vorsicht: Gasbildung!*). Die wässrigen Phasen werden in das Becherglas gegeben. Der pH-Wert der wässrigen Phase bei der zweiten Rückextraktion ist zu messen und gegebenenfalls mit weiterer Zugabe von Ammoniumcarbonatlösung ( $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) auf einen Wert im neutralen Bereich einzustellen.

**3.3.2.2.5** Nach Zugabe von etwa 50 mg Natriumhydrogensulfat wird die Lösung im Becherglas vorsichtig zur Trockne eingedampft.

**3.3.2.2.6** Der Rückstand wird mit 0,5 ml Salzsäure ( $9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gelöst und mit 3 ml Ammoniumoxalatlösung ( $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und 1 ml destilliertem Wasser in die Elektrolysezelle überführt. Mit verdünnter Salzsäure und Ammoniaklösung wird ein pH-Wert von etwa 3 eingestellt.



**3.3.2.2.7** Das Plutonium wird bei einer Stromstärke von 0,5 A zwei Stunden abgeschieden. Gegen Ende der Abscheidezeit wird ca. 1 ml Ammoniaklösung ( $13 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) in die Elektrolysezelle gegeben und eine Minute weiter abgeschieden. Nach Abschalten des Stromes wird die überstehende Lösung sofort abgegossen, das Edelstahlplättchen mit verdünnter Ammoniaklösung ( $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und mit Ethanol gespült und anschließend auf einer mit Aluminiumfolie bedeckten Heizplatte bei etwa  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  getrocknet.

**3.3.2.2.8** Die chemische Ausbeute für Plutonium beträgt etwa 50 % bis 60 % (1). Bei diesem Verfahren wird eventuell vorhandenes Neptunium ebenfalls abgetrennt und auf dem Edelstahlplättchen abgeschieden.

### **3.3.2.3 Americium- und Curiumisotope**

**3.3.2.3.1** Die nach der Abtrennung von Uran noch verbleibende Lösung (siehe Abschnitt 3.3.2.1.1) wird mit 1 ml Wasserstoffperoxid ( $9,9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und 1 ml Eisennitratlösung ( $0,09 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) versetzt. Der pH-Wert wird mit Natronlauge ( $11 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) auf ca. 12 eingestellt. Americium und Curium werden mit dem Eisenhydroxid mitgefällt. Anschließend wird zentrifugiert und der Überstand verworfen. Der Niederschlag wird im Zentrifugenglas mit etwa 20 ml warmem destilliertem Wasser verrührt und nochmals zentrifugiert.

**3.3.2.3.2** Der das Americium und Curium enthaltende Niederschlag wird mit 3 ml Salpetersäure ( $14 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gelöst und die Lösung in ein Becherglas überführt. Etwa 1 g Ammoniumnitrat, das in 2 ml destilliertem Wasser gelöst wurde, und 50 ml Methanol werden zur Lösung hinzugefügt.

**3.3.2.3.3** Diese Mischlösung wird mit einer Fließgeschwindigkeit von einem Tropfen pro Sekunde über eine vorbehandelte Anionenaustauschersäule 2 (siehe Abschnitt 7.3.2) gegeben. Die durchgelaufene Lösung wird verworfen oder kann gemäß der Verfahren J-Fe-55-ALUFT-01 und J-Ni-63-ALUFT-01 zur Bestimmung von Eisen- und Nickelisotopen weiterverwendet werden. Der Anionenaustauscher 2 wird mit 100 ml einer Mischlösung aus 10 ml Salpetersäure ( $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und 90 ml Methanol gewaschen und die Waschlösung verworfen. Americium und Curium werden anschließend mit 50 ml Salpetersäure ( $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) vom Anionenaustauscher in ein Becherglas eluiert.

**3.3.2.3.4** Americium und Curium werden im 250 ml-Scheidetrichter aus der Lösung von Abschnitt 3.3.2.3.2 mit 50 ml einer Mischung von Thenoyltrifluoraceton in Cyclohexan ( $0,25 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) durch 15minütiges Schütteln extrahiert. Nach der Phasentrennung wird die wässrige Phase abgelassen und verworfen. Die organische Phase wird mit 30 ml destilliertem Wasser gewaschen und die Waschlösung verworfen. Americium und Curium werden durch fünfminütiges Schütteln mit 10 ml Salpetersäure ( $3 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) rückextrahiert.

**3.3.2.3.5** Die wässrige Lösung wird in ein 100 ml-Becherglas gegeben und 0,1 ml der Lanthanlösung 1 zugefügt. Die Lösung wird mit Ammoniaklösung auf einen pH-Wert von etwa 4 bis 7 eingestellt und mit 5 ml Flusssäure ( $2 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) zur Mitfällung als Fluorid versetzt. Der pH-Wert ist zu messen und soll zwischen 3 und 3,5 betragen, ansonsten muss mit Ammoniaklösung eingestellt werden.

**3.3.2.3.6** Die Lösung wird unter Rühren auf  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  erhitzt und anschließend eine halbe Stunde abgekühlt. Eine Behandlung im Ultraschallbad ist für die Koagulation des gebildeten Niederschlags förderlich und entfernt zudem Partikel von der Becherglaswand. Die Lösung wird über ein Membranfilter mit einer Poren-

größe von 0,1  $\mu\text{m}$ , das im Filtriergerät fest eingespannt ist und durch das zuvor 5 ml Lanthanlösung 2 gelaufen sind, gegeben. Der Lanthanfluoridniederschlag, mit dem Americium und Curium mitgefällt wurden, wird auf dem Filter abgeschieden. Der Filter wird anschließend mit 20 ml wässriger Ethanollösung ( $2 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gewaschen, vorsichtig auf einer mit Aluminiumfolie bedeckten Heizplatte getrocknet und plan auf ein Edelstahlplättchen geklebt.

**3.3.2.3.7** Die chemische Ausbeute an Americium und Curium beträgt etwa 50 % bis 60 % (1).

## 4 Messung der Aktivität

Im Kapitel IV.2 dieser Messanleitungen ist das Verfahren der Aktivitätsmessung mit einem ionenimplantierten Detektor ausführlich dargestellt. Bei den Messungen beträgt der Abstand zwischen Messpräparat und Detektor etwa 3 mm. Der Durchmesser des auf den Edelstahlplättchen abgeschiedenen Hydroxides sollte kleiner sein als der Durchmesser des Detektors. Typische Messzeiten sind etwa 20 Stunden. Die Werte für die Ansprechwahrscheinlichkeit  $\varepsilon$ , die zur Berechnung der Nachweisgrenze erforderlich sind, werden mittels geeigneter Kalibrierstandards gemäß Kapitel IV.2 dieser Messanleitungen ermittelt.

## 5 Berechnung der Analyseergebnisse

Da die Elemente radiochemisch getrennt wurden, enthalten die Spektren meist nur wenige, deutlich voneinander getrennte Linien bzw. Liniengruppen, wobei eine Linie bzw. eine Liniengruppe dem für die Fraktion verwendeten Tracer zugeordnet werden kann. Die Nettoimpulsanzahlen der einzelnen Linien werden mit dem in Kapitel IV.2 dieser Messanleitungen beschriebenen Verfahren ermittelt.

### 5.1 Gleichungen zur Berechnung

Die Aktivität  $A_r$  des alphastrahlenden Radionuklides  $r$  zum Zeitpunkt der Messung wird nach Gleichung (1) berechnet:

$$A_r = A_{\text{Tr}} \cdot \frac{N_{n,r} \cdot p_{\alpha,\text{Tr}}}{N_{n,\text{Tr}} \cdot p_{\alpha,r}} \quad (1)$$

Die nuklidspezifische Aktivitätskonzentration  $c_r$  bezogen auf das Ende der Probenentnahme wird nach Gleichung (2) berechnet, wobei von den nach KTA 1503.1 zu messenden Radionukliden (siehe Verfahren J- $\alpha$ -SPEKT-ALUFT-01, Tabelle 1) nur bei Cm-242 wegen seiner geringen Halbwertszeit von 163 Tagen die Korrektur des Abklingens der Aktivität berücksichtigt werden muss (8).

$$c_r = \frac{A_r \cdot e^{\lambda_r \cdot t_A}}{V} \quad (2)$$

Wenn die Nettozählrate im Vergleich zu den Nulleffektzählraten groß ist, wird die relative Standardmessunsicherheit  $s(A_r) \cdot A_r^{-1}$  der Aktivität bzw. die relative Standardmessunsicherheit  $s(c_r) \cdot c_r^{-1}$  der Aktivitätskonzentration nach Gleichung (3) gemäß der Gleichung 4.53b des Kapitels IV.5 dieser Messanleitungen berechnet:

$$\frac{s(A_r)}{A_r} = \frac{s(c_r)}{c_r} = \sqrt{\frac{1}{N_{n,r}} + \frac{1}{N_{n,Tr}} + \left(\frac{s(A_{Tr})}{A_{Tr}}\right)^2} \quad (3)$$

In den Gleichungen (1), (2) und (3) bedeuten:

- $A_r$  Aktivität des Radionuklids r in Bq;
- $A_{Tr}$  Aktivität des zugegebenen Tracers in Bq;
- $N_{n,r}$  Nettoimpulsanzahl für das Radionuklid r;
- $N_{n,Tr}$  Nettoimpulsanzahl für den Tracer der jeweiligen Elementfraktion;
- $\rho_{\alpha,r}$  Alphaemissionswahrscheinlichkeit des Radionuklids r bei der Energie  $E_{\alpha,r}$ ;
- $\rho_{\alpha,Tr}$  Alphaemissionswahrscheinlichkeit des Tracers bei der Energie  $E_{\alpha,Tr}$ ;
- $c_r$  Aktivitätskonzentration des Radionuklids r in  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ;
- $s(A_{Tr})$  Standardmessunsicherheit der Aktivität des zugegebenen Tracers in Bq;
- $s(c_r)$  Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration des Radionuklids r in  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ;
- $\lambda_r$  Zerfallskonstante des Radionuklids r in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $t_A$  Zeitraum zwischen dem Ende der Probeentnahme und dem Messbeginn in s;
- $V$  durchgesetztes Volumen in  $\text{m}^3$ .

## 5.2 Rechenbeispiel

Zu einer Mischprobe vereinigte Teile von vier während eines Monats gesammelten Schwebstofffilterproben wurden radiochemisch aufgearbeitet und zwei Monate nach der Probeentnahme Messpräparate der Uran-, Plutonium- und Americium-/Curium-Fractionen hergestellt. Alle Fraktionen wurden mit einem ionenimplantierten Detektor in 3 mm Abstand vom Messpräparat 70000 Sekunden gemessen. Beispielhaft wird hier die Berechnung der Aktivitäten und Aktivitätskonzentrationen der Americium- und Curiumisotope dargestellt, wobei Am-243 als Tracer verwendet wurde. Nach dem Ende der Messung liegen für die Berechnung der Aktivitätskonzentration folgende Werte vor:

$N_{n,Am-241} = 5;$	$\rho_{Am-241} = 0,98;$
$N_{n,Cm-242} = 105;$	$\rho_{Cm-242} = 0,99;$
$N_{n,Cm-244} = 35;$	$\rho_{Cm-244} = 1;$
$N_{n,Am-243} = 875;$	$\rho_{Am-243} = 0,99;$
$A_{Am-243} = 50 \text{ mBq};$	$t_A = 5,2 \cdot 10^6 \text{ s};$
$\lambda_{Cm-242} = 4,9 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1};$	$V = 1440 \text{ m}^3.$

Die Werte der Aktivitäten und Aktivitätskonzentrationen der einzelnen Nuklide betragen:

$$A_{\text{Am-241}} = 50 \cdot \frac{5 \cdot 0,99}{875 \cdot 0,98} \text{ mBq} = 0,3 \text{ mBq}$$

$$A_{\text{Cm-242}} = 50 \cdot \frac{105 \cdot 0,99}{875 \cdot 0,99} \text{ mBq} = 6 \text{ mBq}$$

$$A_{\text{Cm-244}} = 50 \cdot \frac{35 \cdot 0,99}{875 \cdot 1} \text{ mBq} = 2 \text{ mBq}$$

$$c_{\text{Am-241}} = \frac{0,3}{1440} \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3} = 0,2 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$c_{\text{Cm-242}} = \frac{6 \cdot e^{4,9 \cdot 10^{-8}} \cdot 5,2 \cdot 10^6}{1440} \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3} = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3} = 5,4 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$c_{\text{Cm-244}} = \frac{2}{1440} \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3} = 1,4 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

Mit den obigen Werten betragen die relativen Standardmessunsicherheiten der Aktivitäten der Radionuklide bei einer relativen Standardmessunsicherheit der Traceraktivität von 5 %:

$$\frac{s(A_{\text{Am-241}})}{A_{\text{Am-241}}} = \sqrt{0,20 + 1,14 \cdot 10^{-3} + 0,05^2} = 0,45$$

$$\frac{s(A_{\text{Cm-242}})}{A_{\text{Cm-242}}} = \sqrt{9,5 \cdot 10^{-4} + 1,14 \cdot 10^{-3} + 0,05^2} = 0,07$$

$$\frac{s(A_{\text{Cm-244}})}{A_{\text{Cm-244}}} = \sqrt{0,03 + 1,14 \cdot 10^{-3} + 0,05^2} = 0,18$$

Die berechnete Aktivität von Am-241 liegt unterhalb der Erkennungsgrenze (siehe Abschnitt 6), so dass in diesem Fall die Nachweisgrenze angegeben wird. Die zu dokumentierenden Aktivitätskonzentrationen sind:

$$c_{\text{Am-241}} < 0,8 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$c_{\text{Cm-242}} = (5,4 \pm 0,4) \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$c_{\text{Cm-244}} = (1,4 \pm 0,3) \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

### 5.3 Unsicherheiten der Analyseergebnisse

Hauptbeiträge zur kombinierten Standardmessunsicherheit bei der Bestimmung der Aktivitätskonzentration sind die zählstatistischen Messunsicherheiten der Nettoimpulsanzahlen. In geringerem Maß trägt die relative Messunsicherheit der Traceraktivität mit einem Wert von etwa 3 % bis 5 % bei. Die Messunsicherheiten des Volumens und der Abklingzeit können demgegenüber vernachlässigt werden. Bei den üblichen Messungen liegt die relative kombinierte Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration meist zwischen 10 % und 20 %.

## 6 Nachweisgrenzen des Verfahrens

### 6.1 Gleichungen zur Berechnung

Die Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration wird gemäß Kapitel IV.5, Abschnitt 2.1 und 2.3 dieser Messanleitungen nach Gleichung (4) berechnet, wobei man die auf die Zeit normierte Impulsanzahl in der Linie der Zählrate  $R_{0,r}$  bei einem Einkanalanalysator gleichsetzt.

$$\varepsilon \cdot \eta = \frac{R_{n,Tr}}{A_{Tr}}$$

$$g_r = \frac{1}{\varepsilon \cdot \eta \cdot p_{\alpha,r} \cdot V} \cdot \left[ (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \cdot \sqrt{R_{0,r} \cdot \left( \frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_m} \right)} + \frac{(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta})^2}{4} \cdot \left( \frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_m} \right) \right] \quad (4)$$

### 6.2 Rechenbeispiel

Für das vorher genannte Rechenbeispiel ergibt sich als Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration unter Berücksichtigung der nachstehenden Daten folgender Wert:

$$\begin{array}{ll} k_{1-\alpha} & = 3; & k_{1-\beta} & = 1,645; \\ t_0 & = 70000 \text{ s}; & t_m & = 70000 \text{ s}; \\ R_{0, Am-234} & = 0,00001 \text{ s}^{-1}; & R_{n, Am-234} & = 0,01 \text{ s}. \end{array}$$

$$\varepsilon \cdot \eta = \frac{0,01}{0,05} = 0,2$$

$$\begin{aligned} g_r &= \frac{1}{0,2 \cdot 0,99 \cdot 1440} \cdot \left[ 4,645 \cdot \sqrt{0,00001 \cdot \left( \frac{1}{70000} + \frac{1}{70000} \right)} + \frac{21,6}{4} \cdot \left( \frac{1}{70000} + \frac{1}{70000} \right) \right] \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = \\ &= 0,00351 \cdot [4,645 \cdot 1,7 \cdot 10^{-5} + 5,4 \cdot 2,86 \cdot 10^{-5}] \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 0,00351 \cdot 0,00023 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = \\ &= 8,2 \cdot 10^{-7} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 0,8 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \end{aligned}$$

## 7 Verzeichnis der erforderlichen Chemikalien und Geräte

### 7.1 Chemikalien

Die verwendeten Chemikalien sollten analysenrein sein.

- Ammoniaklösung,  $\text{NH}_3$ : 1 mol·l<sup>-1</sup>, 13 mol·l<sup>-1</sup>;
- Ammoniumcarbonatlösung,  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ : 0,5 mol·l<sup>-1</sup>;
- Ammoniumchloridlösung,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ : 3,2 mol·l<sup>-1</sup>;
- Ammoniumnitrat,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ;
- Ammoniumoxalatlösung: 0,1 mol·l<sup>-1</sup>;
- Anionenaustauscher 1: Dowex 1 x 2, 100 mesh bis 200 mesh;
- Anionenaustauscher 2: Dowex 1 x 2, 200 mesh bis 400 mesh;
- Elutionslösung: Salzsäure (0,36 mol·l<sup>-1</sup>) und Flusssäure (0,01 mol·l<sup>-1</sup>);
- Flusssäure, HF : 2 mol·l<sup>-1</sup>;
- Glaswolle, silyliert;
- Eisennitratlösung,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ : 0,09 mol·l<sup>-1</sup>;
- Ethanollösung: 2 mol·l<sup>-1</sup>;
- Lanthanlösung 1,  $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ : 0,036 mol·l<sup>-1</sup>;
- Lanthanlösung 2,  $\text{LaF}_3$ : 0,014 mmol Lanthannitrat in 40 ml Flusssäure (22,6 mol·l<sup>-1</sup>) und 960 ml destilliertem Wasser;
- Methanol;
- Natriumnitrit,  $\text{NaNO}_2$ ;
- Natriumhydrogensulfat,  $\text{NaHSO}_4$ ;
- Natronlauge,  $\text{NaOH}$ : 11 mol·l<sup>-1</sup>;
- Quarzsand, hochgeglüht;
- Reinigungsprodukte (Detergentien);
- Reinigungslösung: Salpetersäure (2,1 mol·l<sup>-1</sup>) und Flusssäure (0,9 mol·l<sup>-1</sup>);
- Salpetersäure,  $\text{HNO}_3$ : 0,5 mol·l<sup>-1</sup>, 1 mol·l<sup>-1</sup>, 3 mol·l<sup>-1</sup>, 7 mol·l<sup>-1</sup>, 14 mol·l<sup>-1</sup>;
- Salpetersäure-Methanol-Lösung: 0,7 mol·l<sup>-1</sup>, 1 mol·l<sup>-1</sup>;
- Salzsäure,  $\text{HCl}$ : 1 mol·l<sup>-1</sup>, 9 mol·l<sup>-1</sup>;
- 1-(2-Thenoyl)-3,3,3-trifluoraceton (TTA) in Cyclohexan: 0,25 mol·l<sup>-1</sup>;
- Tributylphosphat (TBP) in Xylol: 1,1 mol·l<sup>-1</sup>;

- Wasserstoffperoxid, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 9,9 mol·l<sup>-1</sup>;
- Uran-232-Standard: ca. 50 mBq·ml<sup>-1</sup> in Salpetersäure (3,5 mol·l<sup>-1</sup>);
- Pu-236- bzw. Pu-242-Standard: ca. 50 mBq·ml<sup>-1</sup> in Salpetersäure (2 mol·l<sup>-1</sup>);
- Am-243-Standard: ca. 50 mBq·ml<sup>-1</sup> in Salpetersäure (2 mol·l<sup>-1</sup>).

**Anmerkung:**

Die Lanthanlösungen sowie die Verdünnung der Flusssäure sind mit bidestilliertem Wasser anzusetzen und über ein Filter mit einem Porendurchmesser von 0,45  $\mu$ m abzusaugen.

**7.2 Geräte**

- Schwebstofffilter mit Abscheidegrad besser als 0,995, z. B. Membranfilter oder Glasfaserfilter;
- Halter für Schwebstofffilter;
- Probeentnahmesystem mit Luftfördereinrichtung und Luftdurchsatzmeter (z. B. Gasuhr in Trockenbauweise);
- Quarzschalen, z. B. mit 50 mm Durchmesser;
- Edelstahlschalen, z. B. mit 50 mm Durchmesser;
- Plasmaveraschungsanlage, wenn vorhanden;
- Ausrüstung eines radiochemischen Labors;
- Glassäule für Ionenaustauscher 1,5 cm Durchmesser, ca. 10 cm Höhe, mit Vorratsgefäß;
- Edelstahlplättchen, Edelstahl 1.4301.6 poliert mit 2,54 cm Durchmesser und 0,5 mm Dicke;
- Elektrolysezelle;
- Alphaspektrometriemessplatz mit ionenimplantiertem Detektor, Fläche von 300 mm<sup>2</sup> bis 450 mm<sup>2</sup>.

**7.3 Vorbereitende Arbeiten****7.3.1 Vorbereitung der Anionenaustauschersäule 1**

Der Anionenaustauscher 1 wird in Salpetersäure (7 mol·l<sup>-1</sup>) in die Nitratform überführt, mindestens 24 Stunden in der Salpetersäure gelagert und anschließend in eine Glassäule mit einem Innendurchmesser von ca. 1,5 cm bis zu einer Höhe von etwa 7 cm eingeschlämmt. Damit der Ionenaustauscher nicht aufgewirbelt wird, bedeckt man ihn zweckmäßigerweise mit wenig Glaswolle oder feinkörnigem, gewaschenem und geglühtem Quarzsand. Vor jeder Verwendung wird der Ionenaustauscher mit 150 ml Salpetersäure (7 mol·l<sup>-1</sup>) gespült. Nach jeder Trennung wird die Säule mit 50 ml Salpetersäure (0,5 mol·l<sup>-1</sup>) gewaschen.

### 7.3.2 Vorbereitung der Anionenaustauschersäule 2

Der Anionenaustauscher 2 wird mit Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) in die Nitratform überführt, 24 Stunden in einer Salpetersäure-Methanol-Waschlösung gelagert und in eine Glassäule bis zu einer Höhe von etwa 7 cm eingeschlämmt. Damit der Ionenaustauscher nicht aufgewirbelt wird, bedeckt man ihn zweckmäßigerweise mit wenig Glaswolle oder feinkörnigem, gewaschenem und geglühtem Quarzsand. Vor der ersten und jeder weiteren Separation wird der Ionenaustauscher mit 150 ml der Salpetersäure-Methanol-Waschlösung gespült.

#### **Anmerkung:**

Es sollte keine Salpetersäure-Ethanol-Lösung verwendet werden, da diese schon nach kurzer Zeit, insbesondere beim Erwärmen im Wasserbad, explodieren kann. Ungefährlicher ist es, mit Methanol zu arbeiten.

### 7.3.3 Vorbereitung der Scheidetrichter und Extraktionsmittel

Für die Extraktion wird jeweils ein mit Detergentien gründlich gereinigter und entfetteter 250 ml-Scheidetrichter mit Teflonhahn verwendet. Der Scheidetrichter wird mit 50 ml Tributylphosphat (TBP) in Xylol gefüllt und mit 30 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) eine Minute geschüttelt. Nach der Phasentrennung wird die wässrige Phase abgelassen und verworfen.

### 7.3.4 Vorbereitung der Edelstahlplättchen

Bis zu 10 Edelstahlplättchen, die vorher mit Aceton, Trichlorethylen oder Methanol entfettet wurden, werden in einem Becherglas mit etwa 50 ml Reinigungslösung (siehe Abschnitt 7.1) etwa 10 Minuten auf  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  erwärmt und die Oberfläche der Plättchen dabei leicht angeätzt, bis die Lösung bläulich wird. Die Plättchen werden mit destilliertem Wasser gespült und unter Methanol aufbewahrt. Durch die aufgeraute Oberfläche wird die Ablagerung und Haftung der abgeschiedenen Schicht erhöht und die Energieauflösung nur unwesentlich verschlechtert.

### 7.3.5 Vorbereitung der Elektrolysezelle

Wie in Kapitel IV, Abschnitt 2.2.3.1 dieser Messanleitungen beschrieben, werden der Teflonteil der Elektrolysezelle und die Dichtungsringe vor jeder Abscheidung kurz in die Reinigungslösung getaucht und mit destilliertem Wasser gespült. Die Platinelektrode wird etwa 10 Minuten in heißer Reinigungslösung gesäubert. Die vorbehandelten Edelstahlplättchen werden mit destilliertem Wasser gründlich gespült und in die Elektrolysezelle eingelegt (siehe Verfahren H- $\alpha$ -SPEKT-AWASS-03). Als Dichtung der Edelstahlplättchen gegen den Teflonkörper werden Silicon- oder Polyethylen-O-Ringe verwendet. Es sollten auf keinen Fall Ringe aus Viton<sup>®</sup> als Dichtungen benutzt werden, da diese schnell altern und so eine Verschleppung der Aktivität durch Ablagerung in feinen Rissen auftreten kann. Am besten ist es, stets neue Dichtungsringe einzusetzen.



### 7.3.6 Vorbehandlung der Uran-232-Standardlösung

In Abständen von etwa 6 Monaten müssen die Tochternuklide Th-228, Ra-224, Rn-220 und Po-216 von dem als Tracer verwendeten U-232 abgetrennt werden.

**7.3.6.1** 1 ml Uran-232-Lösung (z. B. 50 Bq) wird in 50 ml Salzsäure ( $9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gegeben, eingedampft und mit 50 ml Salzsäure ( $9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) aufgenommen. Die Lösung wird auf eine mit Salzsäure ( $9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) in Chloridform überführte, 5 cm hohe Anionenaustauschersäule 1 gegeben und die Säule nacheinander mit 100 ml Salzsäure ( $9 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und weiteren 100 ml Salzsäure ( $6 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) bei einer Durchflusssgeschwindigkeit von einem Tropfen pro Sekunde gewaschen. Die Waschlösung wird verworfen.

**7.3.6.2** Das Uran wird mit 75 ml Salzsäure ( $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) eluiert, anschließend zur Trockne eingedampft und mit 50 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) aufgenommen.

**7.3.6.3** Die Lösung wird in einem 250 ml-Scheidetrichter mit 50 ml Tributylphosphat in Xylol (siehe Abschnitt 7.3.3) 15 Minuten geschüttelt. Die wässrige Phase wird verworfen. Die organische Phase wird mit 30 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gewaschen und die Waschlösung ebenfalls verworfen. Anschließend wird mit 20 ml destilliertem Wasser etwa 1 Minute geschüttelt, die wässrige Phase in ein 100 ml-Becherglas abgelassen und 1 ml konzentrierte Salzsäure in das Becherglas dazugegeben. Das Uran wird mit zweimal 30 ml Ammoniumcarbonatlösung ( $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) jeweils durch 15minütiges Schütteln aus der organischen Phase rückextrahiert und die wässrigen Phasen ebenfalls in das Becherglas gegeben. Der pH-Wert der wässrigen Phase bei der zweiten Rückextraktion ist zu messen und gegebenenfalls mit weiterer Zugabe von Ammoniumcarbonatlösung ( $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) auf einen Wert im neutralen Bereich einzustellen.

**7.3.6.4** Die Lösung im Becherglas wird mit 100 mg Natriumhydrogensulfat versetzt und vorsichtig eingedampft. Der Rückstand wird mit 200 ml Salpetersäure ( $7 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gelöst und im Verhältnis 1:1 mit destilliertem Wasser verdünnt. Die Uran-232-Standardlösung wird in einer Polyethylenflasche aufbewahrt.

### Literatur

- (1) Vogl, K., Winkler, S.: Entwicklung eines Verfahrens zur Abtrennung von Aktiniden aus Filterproben der Abluftüberwachung von kerntechnischen Betrieben. Bericht des Institutes für Strahlenhygiene, 1987, ABE-179
- (2) Norm DIN 25423 Teil 3 Probenahme bei der Radioaktivitätsüberwachung der Luft: Probenahmeverfahren. 1987-03  
*Hinweis:* Diese Norm wird voraussichtlich durch die Norm DIN ISO 2889 ersetzt.
- (3) Norm DIN EN 1822 Teil 1 Schwebstofffilter (HEPA und ULPA); Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung. 1998-07
- (4) VDI 2066 Staubmessungen in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. In: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI-Handbuch: Reinhaltung der Luft. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1975
- (5) Gesewsky, P.: Die Eignung von Membranfiltern zur Aerosolüberwachung in kerntechnischen Anlagen in Gegenüberstellung zu Glasfaserfiltern. Bericht des Institutes für Strahlenhygiene, 1985, ABE-139

- (6) Vogl, K.: Rechnerische Abschätzung der Aerosolpartikelverluste in Probeentnahmesystemen bei kerntechnischen Anlagen: Physikalische Modelle, Vorgehensweise, Ergebnisse und weitere Ausblicke. Fachbereich Strahlenschutz des Bundesamtes für Strahlenschutz, 1992, ST 2-32/1992
- (7) Vogl, K.: Literaturübersicht über Separationsverfahren für Aktinoidenelemente. Bericht des Institutes für Strahlenhygiene, 1987, ABE-328
- (8) Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschusses KTA 1503.1 Überwachung der Ableitung gasförmiger und an Schwebstoffe gebundener radioaktiver Stoffe; Überwachung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Kaminabluft bei bestimmungsgemäßem Betrieb. Köln: Carl Heymanns Verlag. 2002-06