

Verfahren zur alphaspektrometrischen Bestimmung von aerosolpartikelgetragennem Uran und Plutonium in der bodennahen Luft

A- α -SPEKT-AEROS-01

Bearbeiter:

W. Kiesewetter

H. Diedrich

W. Dyck

T. Steinkopff

H. Ulbricht

Leitstelle für Luft und Niederschlag

13 Verfahren zur alphaspektrometrischen Bestimmung von aerosolpartikelgetragendem Uran und Plutonium in der bodennahen Luft

1 Anwendbarkeit

Das hier beschriebene Verfahren eignet sich zur Bestimmung von aerosolpartikelgetragendem Uran und Plutonium in der bodennahen Luft gemäß den Vorgaben der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Integrierten Meß- und Informationssystem nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz (AVV-IMIS) vom 27. September 1995 (1).

2 Probeentnahme

Die Probeentnahme erfolgt wie im Verfahren A- γ -SPEKT-AEROS-01 dieser Meßanleitungen beschrieben.

3 Analytik

3.1 Prinzip der Methode

Das Prinzip der Methode ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Nach der Aufbereitung des Luwa-Gelb-Filtermaterials (siehe A- γ -SPEKT-AEROS-01) werden Uran und Plutonium aus salzsaurer Lösung mit Tris-(2-ethylhexyl)-amin extrahiert. Durch Rückextraktion mit Ammoniumiodid in salzsaurer Lösung wird die Plutoniumfraktion von der Uranfraktion getrennt. Die Plutoniumfraktion wird mittels eines Ionenaustauschers gereinigt. Aus der Uranfraktion wird das Uran rückextrahiert und durch Extraktion mit Tri-n-octylphosphinoxid gereinigt. Zur Herstellung eines Meßpräparates, das aufgrund der dünnen Uran- bzw. Plutoniumschicht für eine alphaspektrometrische Messung geeignet ist, wird das Uran ebenso wie das Plutonium elektrolitisch abgeschieden.

Zur Bestimmung der chemischen Ausbeute an Uran bzw. Plutonium werden die Radionuklide U-232 bzw. Pu-236 mit bekannter Aktivität als Tracer zugesetzt.

3.2 Probenvorbereitung

Die beaufschlagten Filter werden gepreßt und in einem Porzellantiegel 5 Stunden bei langsam bis ca. 450°C ansteigender Temperatur verascht.

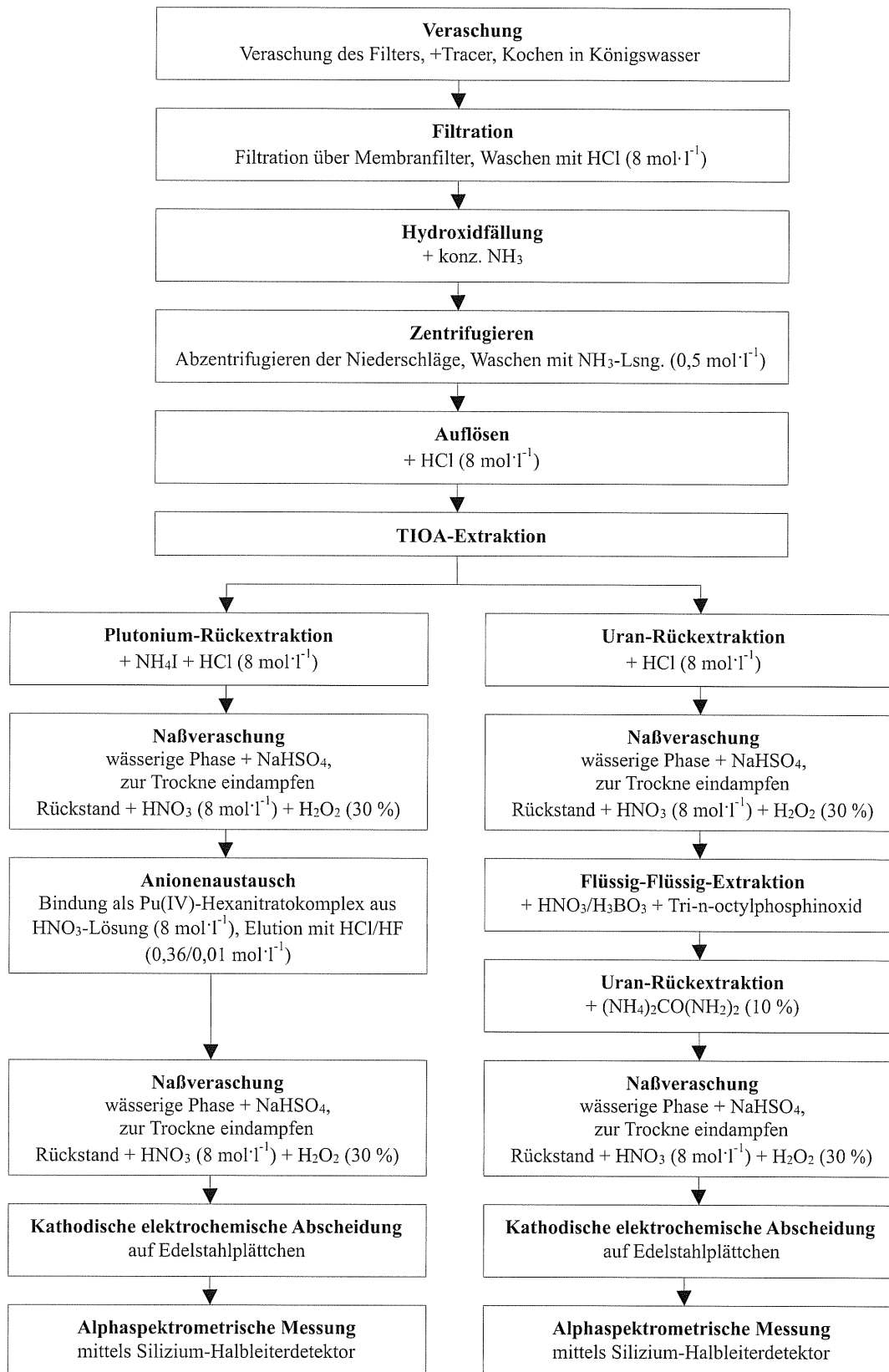


Abb. 1: Schema der Uran-Plutonium-Trennung

3.3 Radiochemische Trennung

3.3.1 Aufschluß der Asche

3.3.1.1 Die veraschten Filter werden in einem Becherglas mit der Tracerlösung und mit frisch hergestelltem Königswasser versetzt (abdecken). Anschließend wird eine Stunde bei schwachem Sieden gerührt.

3.3.1.2 Die Lösung wird über einen Membranfilter (Nr. 11301) abfiltriert und der Filter anschließend mit Salzsäure ($8 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) königswasserfrei gewaschen.

3.3.1.3 Das Filtrat wird mit 3 ml 30%iger Wasserstoffperoxid-Lösung versetzt und das Wasserstoffperoxid anschließend auf dem Sandbad verkocht.

3.3.1.4 Die Lösung wird in ein Becherglas überführt und mit destilliertem Wasser auf ca. 300 ml verdünnt. Unter Rühren und Erhitzen wird durch tropfenweise Zugabe von konzentrierter Ammoniaklösung der pH-Wert auf 7 bis 8 eingestellt. Anschließend wird ein Überschuß von 30 ml Ammoniaklösung zugegeben.

3.3.1.5 Die ausgefällten Hydroxide läßt man über Nacht (ca. 12 Stunden) altern.

3.3.1.6 Die Hydroxide werden abzentrifugiert und mit Ammoniaklösung ($0,5 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) gewaschen. Die überstehende Lösung wird verworfen.

3.3.2 Plutonium- und Uran-Extraktion mit Tris-(2-ethylhexyl)-amin

Als Bezeichnung für das Tris-(2-ethylhexyl)-amin ist der Name Triisooctylamin gebräuchlich. Im weiteren Text wird daher die Abkürzung TIOA verwendet.

3.3.2.1 Der Hydroxid-Rückstand wird unter Erwärmen in Salzsäure ($8 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) gelöst und nach dem Abkühlen mit 3 ml Wasserstoffperoxid-Lösung (30%) versetzt. Zur Zerstörung des überschüssigen Wasserstoffperoxids wird die Lösung auf dem Sandbad erwärmt (abdecken). Anschließend wird die Lösung im Wasserbad abgekühlt und aufbewahrt.

3.3.2.2 Vorbehandlung der TIOA-Lösung (2,6 g $\hat{=}$ 3,2 ml TIOA in 23,4 g $\hat{=}$ 27 ml Xylol):

- a) Die TIOA-Lösung wird mit 30 ml destilliertem Wasser 5 Minuten geschüttelt und
- b) anschließend mit 30 ml Salzsäure ($8 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) 5 Minuten geschüttelt.
- c) Die Vorgänge a) und b) werden wiederholt.

3.3.2.3 Die HCl-Lösung aus 3.3.2.1 wird in einen Scheidetrichter überführt und mit 30 ml der vorbereiteten TIOA-Lösung 1 Minute geschüttelt. Die wässrige Phase wird verworfen.

3.3.3 Plutonium-Rückextraktion

3.3.3.1 Die TIOA-Phase wird zweimal mit je 30 ml frisch angesetzter, heißer Ammoniumiodid-Lösung (0,42 g NH_4I in 60 ml HCl, $8 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) je 2 Minuten geschüttelt. Die organische Phase wird jeweils aufbewahrt.

3.3.3.2 Die wässrigen Phasen werden in einer Abdampfschale gesammelt und nach Zugabe von 1 ml Natriumhydrogensulfat-Lösung ($1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) zur Trockne eingedampft.

3.3.3.3 Der Rückstand wird mit konzentrierter Salpetersäure ($14 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) befeuchtet und durch Zugabe von 5 bis 10 Tropfen Wasserstoffperoxid (30%) naßverascht. Der Vorgang wird so oft wiederholt, bis der Rückstand frei von organischen Rückständen (TIOA) und Iod ist (gelblich-weiße Färbung des Rückstandes).

3.3.4 Uran-Rückextraktion

3.3.4.1 Die aufbewahrte TIOA-Phase wird zur Reinigung mit 30 ml Salzsäure ($8 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) 5 Minuten geschüttelt. Die wässrige Phase wird verworfen.

3.3.4.2 Die TIOA-Phase wird anschließend zweimal mit je 30 ml Salzsäure ($0,1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) je 5 Minuten geschüttelt. Die TIOA-Phase wird anschließend verworfen.

3.3.4.3 Die wässrigen Phasen werden in einer Abdampfschale gesammelt, mit 1 ml Natriumhydrogensulfat-Lösung ($1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) versetzt und zur Trockne eingedampft.

3.3.4.4 Der Rückstand wird mit konzentrierter Salpetersäure ($14 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) befeuchtet und durch Zugabe von 5 bis 10 Tropfen Wasserstoffperoxid (30%) naßverascht. Der Vorgang ist so oft zu wiederholen, bis der Rückstand frei von organischen Rückständen ist (siehe Punkt 3.3.3.3).

3.3.5 Reinigung der Plutoniumfraktion

3.3.5.1 Eine Ionenaustauschersäule (siehe Abbildung 2) wird mit einem Glaswollpfropfen, ca. 5 ml Austauscherharz (Dowex 1×4 , 50–100 mesh, in destilliertem Wasser aufgeschlämmt) und einem weiteren Glaswollpfropfen gefüllt. Die Säule wird mit 30 ml Salpetersäure ($8 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) konditioniert.

3.3.5.2 Der Plutonium-Rückstand wird in 10 ml Salpetersäure ($8 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) unter Erwärmen gelöst, mit 0,1 ml frisch angesetzter Natriumnitrit-Lösung (1 g Natriumnitrit in 5 ml Wasser) versetzt und 20 Minuten in der Wärme stehen gelassen.

3.3.5.3 Die gelöste Plutoniumfraktion wird auf die Säule gegeben. Die Durchlaufgeschwindigkeit sollte ca. 1 ml pro Minute betragen.

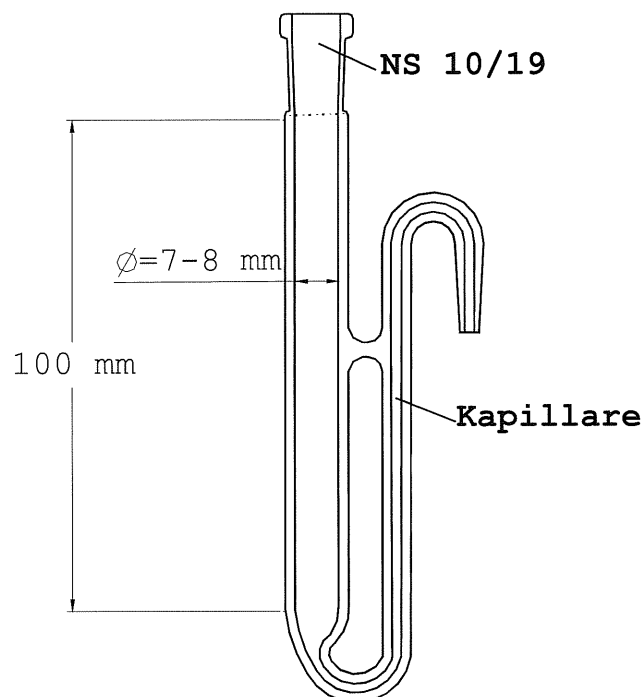


Abb. 2: Ionenaustauschersäule

3.3.5.4 Die Säule wird mit 30 ml Salpetersäure ($8 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) und mit 50 ml Salzsäure ($10 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) gespült.

3.3.5.5 Die Elution erfolgt mit 30 ml einer Lösung aus Salzsäure ($0,36 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) und Flußsäure ($0,01 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ HF), entsprechend 35 ml 32%ige HCl und 0,5 ml 40%ige HF auf 1 Liter Wasser.

3.3.5.6 Das Eluat wird in einer Abdampfschale gesammelt, mit 1 ml Natriumhydrogensulfat-Lösung ($0,1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) versetzt und zur Trockne eingedampft.

3.3.5.7 Der Rückstand wird mit konzentrierter Salpetersäure und Wasserstoffperoxid naßverascht (siehe Punkt 3.3.3.3).

3.3.6 Reinigung der Uranfraktion

3.3.6.1 Eine Tri-n-octylphosphinoxid (TOPO)-Lösung wird wie folgt vorbereitet (immer frisch ansetzen):

- a) 2,3 g TOPO werden in 20 ml n-Heptan gelöst ($0,3 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$), dann
- b) mit 20 ml 10%iger Ammoniumcarbammat-Lösung ($1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) 5 Minuten geschüttelt,
- c) zweimal mit je 20 ml Salpetersäure ($2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) 5 Minuten geschüttelt und
- d) mit 20 ml der Salpetersäure/Borsäure-Mischung ($2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ HNO₃, mit 25 g H₃BO₃ pro Liter) 5 Minuten geschüttelt.

3.3.6.2 Der Uranrückstand aus 3.3.4.4 wird in 20 ml der Salpetersäure-Borsäure-Mischung (siehe Punkt 3.3.6.1 d) warm gelöst und zur vorbereiteten TOPO-Lösung gegeben. Die Lösung wird 10 Minuten geschüttelt und anschließend die wässrige Phase verworfen.

3.3.6.3. Die organische Phase wird 3 mal mit je 20 ml der Salpetersäure/Borsäure-Mischung (siehe Punkt 3.3.6.1 d) je 5 Minuten und danach noch einmal 5 Minuten mit 20 ml Salpetersäure ($2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) geschüttelt.

3.3.6.4 Die organische Phase wird über Nacht (ca. 12 Stunden) verschlossen stehen gelassen.

3.3.6.5 Zur Rückextraktion des Uran aus der TOPO-Lösung wird die Lösung 4 mal mit je 5 ml 10%iger Ammoniumcarbammat-Lösung je 5 Minuten geschüttelt.

3.3.6.6 Die wässrigen Lösungen werden in einem frischen Scheidetrichter gesammelt und zur Reinigung mit 20 ml n-Heptan 5 Minuten lang geschüttelt.

3.3.6.7 Die wässrige Phase wird in einer Abdampfschale gesammelt, mit 1 ml Natriumhydrogensulfat-Lösung ($0,1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) versetzt und zur Trockne eingedampft. Die organische Phase wird verworfen.

3.3.6.8 Der Rückstand wird mit Salpetersäure/Wasserstoffperoxid naßverascht (siehe Punkt 3.3.3.3).

3.3.7 Vorbereitung der Elektrolyse

3.3.7.1 Der Zellkörper aus Teflon wird in einer 10%igen Extran-Lösung gereinigt.

3.3.7.2 Die Dichtungsringe aus Silikonkautschuk werden in 10%iger Extran-Lösung ausgekocht, anschließend kurz in 1%ige Schwefelsäure-Lösung eingetaucht, mit destilliertem Wasser abgespült und getrocknet. So vorbereitete Dichtungsringe können trocken aufbewahrt werden.

3.3.7.3 Die Edelstahlplättchen werden im Ultraschallbad in einer 5%igen Labosol-Lösung gereinigt und mit destilliertem Wasser abgespült. Die vorbereiteten Edelstahlplättchen werden in Ethanol (p. a.) aufbewahrt und vor der Montage mit destilliertem Wasser abgespült.

3.3.8 Elektrolyse für Uran und Plutonium

3.3.8.1 Der Zellkörper wird montiert (siehe Abbildung 3) und mit destilliertem Wasser auf Dichtigkeit geprüft.

3.3.8.2 Der trockene Rückstand von Plutonium oder Uran wird mit 2 ml konzentrierter Salpetersäure ($14 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) und 0,5 ml konzentrierter Schwefelsäure ($18 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$) versetzt und auf dem Sandbad bis zum Entweichen der SO_3 -Dämpfe abgeraucht.

3.3.8.3 Der Rückstand wird abgekühlt und anschließend mit 3 ml destilliertem Wasser und 2 Tropfen 0,02%igem Thymolblau-Indikator versetzt.

3.3.8.4 Die Lösung wird mit 6 ml 1%iger Schwefelsäure in die Elektrolysezelle überführt.

3.3.8.5 Mit Ammoniakgas wird der pH-Wert auf 2,5 eingestellt (Indikator nimmt lachsfarbenen Ton an).

3.3.8.6 Die Elektrolysezelle wird an eine Konstantstromquelle angeschlossen.

3.3.8.7 Der Zellkörper wird mit einem eisgekühlten Rundkolben abgedeckt und auf einen tiefgekühlten Metallblock gestellt.

3.3.8.8 Durch die Zelle wird ein Strom von 1,5 A über einen Zeitraum von 1,5 Stunden geleitet. Abweichungen bis 10% bei Zeit und Stromstärke sind zulässig.

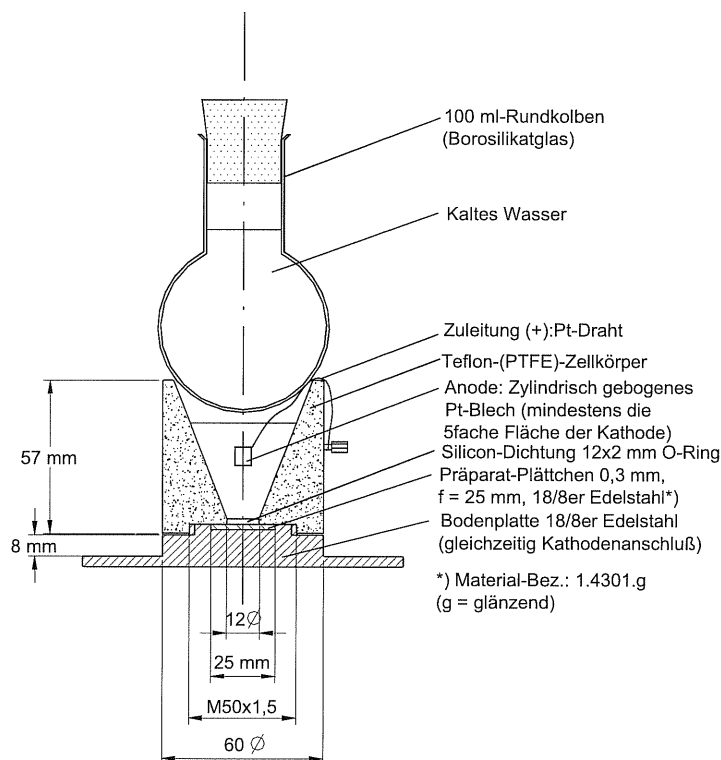


Abb. 3: Elektrolysezelle

3.3.8.9 Nach Beendigung der Elektrodeposition werden 10 ml 2,5%ige Ammoniaklösung in den Zellkörper gefüllt und zum Durchmischen 1 Minute darin stehen gelassen.

3.3.8.10 Der Zellinhalt wird abgegossen und die Kathode von der Stromquelle getrennt.

3.3.8.11 Die Zelle wird mit einer Lösung von 1 % Ammoniumnitrat in einer 1%igen Ammoniaklösung gespült. Danach kann man die Anode lösen und den Strom abschalten.

3.3.8.12 Das Edelstahlplättchen wird aus der Zelle entnommen, mit ammoniakalischem Ethanol (pH-Wert 8) abgespült und durch kurzes, aber starkes Erhitzen auf einer Heizplatte getrocknet.

4 Messung der Aktivität

Zur alphaspektrometrischen Messung werden Silizium-Halbleiterdetektoren eingesetzt. Nähere Angaben zur Alphaspektrometrie sind Kapitel IV.2 dieser Meßanleitungen zu entnehmen.

5 Berechnung der Analyseergebnisse

Die Berechnung der Aktivitätskonzentration c_r des zu bestimmenden Radionuklids r in der Luft erfolgt in Anlehnung an Gleichung (4.51b) des Kapitels IV.5 dieser Meßanleitungen nach Gleichung (1):

$$c_r = \frac{A_{Tr} \cdot (N_P - q \cdot N_{P,0})}{V \cdot (N_{Tr} - q \cdot N_{Tr,0})} \quad (1)$$

mit:

- A_{Tr} = Aktivität des zugesetzten Tracers in Bq
- V = durchgesetztes Luftvolumen der Probe in m^3
- t_m = Meßzeit der Probe in s
- t_0 = Meßzeit des Nulleffekts in s
- q = Verhältnis t_m/t_0
- N_P = Bruttoimpulsanzahl im Bereich der Linie des Radionuklids r
- $N_{P,0}$ = Nulleffektimpulsanzahl im Bereich der Linie des Radionuklids r
- N_{Tr} = Bruttoimpulsanzahl im Bereich der Linie des Tracers
- $N_{Tr,0}$ = Nulleffektimpulsanzahl im Bereich der Linie des Tracers

Hierbei wird davon ausgegangen, daß der Auswertebereich für die einzelnen Radionuklide so gewählt wird, daß alle Linien eines Radionuklids erfaßt werden und die Summe der Emissionswahrscheinlichkeiten der betreffenden Linien gleich 1 ist.

Die Standardabweichung $s(c_r)$ der Aktivitätskonzentration wird in Anlehnung an Gleichung (4.53b) des Kapitels IV.5 dieser Meßanleitungen nach Gleichung (2) berechnet:

$$s(c_r) = c_r \cdot \sqrt{\frac{N_P + q^2 \cdot N_{P,0}}{(N_P - q \cdot N_{P,0})^2} + \frac{N_{Tr} + q^2 \cdot N_{Tr,0}}{(N_{Tr} - q \cdot N_{Tr,0})^2} + \frac{s^2(A_{Tr})}{A_{Tr}^2}} \quad (2)$$

mit:

$s(A_{Tr})$ = Standardabweichung der Aktivität des Tracers in Bq

5.1 Beispielrechnung

Nachfolgend sind beispielhaft die Daten für eine Uranbestimmung angegeben:

durchgesetztes Luftvolumen	= 50042,0 m ³
Meßdauer der Probe	= 150000 s
Meßdauer des Nulleffekts	= 150000 s
Aktivität des zugesetzten U-232-Tracers	= $2,44 \cdot 10^{-2} \pm 0,077 \cdot 10^{-2}$ Bq
Bruttoimpulsanzahl im Bereich der U-238-Linie	= 3365
Nulleffektimpulsanzahl im Bereich der U-238-Linie	= 2
Bruttoimpulsanzahl im Bereich der U-232-Linie	= 5838
Nulleffektimpulsanzahl im Bereich der U-232-Linie	= 7

Damit ergeben sich für die Aktivitätskonzentration des U-238 und deren Standardabweichung:

$$c_r = \frac{2,44 \cdot 10^{-2} \cdot (3365 - 1 \cdot 2)}{50042 \cdot (5838 - 1 \cdot 7)} = 2,81 \cdot 10^{-7} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$s(c_r) = 2,81 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{\frac{3365 + 1^2 \cdot 2}{(3365 - 1 \cdot 2)^2} + \frac{5838 + 1^2 \cdot 7}{(5838 - 1 \cdot 7)^2} + \frac{(0,077 \cdot 10^{-2})^2}{(2,44 \cdot 10^{-2})^2}} = 1,08 \cdot 10^{-8} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

Somit ist als Ergebnis anzugeben:

$$c_r = (2,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-7} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

5.3 Fehlerbetrachtung

Der Hauptbeitrag bei der Bestimmung der Unsicherheit der Aktivitätskonzentration resultiert aus der zählstatistischen Unsicherheit der Nettoimpulsanzahlen. In geringerem Maß tragen die Unsicherheit der Traceraktivität (3%) und die Unsicherheit bei der Bestimmung des Luftdurchsatzes (ca. 2%) bei. Demgegenüber kann die Unsicherheit bei der Bestimmung der Abklingzeit vernachlässigt werden.

6 Nachweis- und Erkennungsgrenzen

Zur Bestimmung der Nachweisgrenze des Verfahrens ist die Herstellung und Messung eines Blindpräparats unter den gleichen Bedingungen wie bei einem Meßpräparat erforderlich. Die Zählrate eines Blindpräparats kann durchaus höher sein als die eines Leerpräparats, z. B. eines unbehandelten Stahlplättchens.

Der Ansatz zur Berechnung der Nachweisgrenze ist in Kapitel IV.5 Abschnitt 4.8 dieser Meßanleitungen beschrieben. Die Auswertung einer α -Linie mit einer definierten Linienfußbreite wird als integrale Messung mit einem Einkanalanalysator aufgefaßt.

Im Falle eines Einsatzes von Tracernukliden ist der aktivitätsbezogene Kalibrierfaktor φ_A nicht explizit bekannt. Durch die formale Einführung der (fiktiven) chemischen Ausbeute η nach Gleichung (3):

$$\eta = \frac{N_{\text{Tr}} - q \cdot N_{\text{Tr},0}}{t_m \cdot \varepsilon \cdot A_{\text{Tr}}} \quad (3)$$

mit:

$$\varepsilon = \text{Nachweiswahrscheinlichkeit der Meßanordnung in } \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

erhält man den für die Berechnung der Nachweisgrenze nach Kapitel IV.5 Abschnitt 2.1 erforderlichen Ausdruck für den aktivitätsbezogenen Kalibrierfaktor φ_A nach Gleichung (4):

$$\varphi_A = \frac{t_m \cdot A_{\text{Tr}}}{N_{\text{Tr}} - q \cdot N_{\text{Tr},0}} \quad (4)$$

Mit den Zahlenwerten aus dem Rechenbeispiel in Kapitel 5.1 und $k_{1-\alpha} + k_{1-\beta} = 4,645$ erhält man die Nachweisgrenze G der Aktivität von U-238:

$$G_{\text{U-238}} = 8,41 \cdot 10^{-5} \text{ Bq}$$

Mit dem durchgesetzten Luftvolumen von 50042 m^3 beträgt die Nachweisgrenze g der Aktivitätskonzentration von U-238:

$$g_{\text{U-238}} = 1,68 \cdot 10^{-9} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

7 Verzeichnis der erforderlichen Geräte und Chemikalien

7.1 Chemikalien

Alle Chemikalien sollten soweit möglich mit dem Reinheitsgrad analysenrein verwendet werden.

- Ammoniakgas (99,8%)
- Ammoniaklösung ($13 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$)
- Ammoniaklösung ($0,5 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$)
- Ammoniumcarbamat
- Ammoniumnitrat
- Ammoniumiodid
- Borsäure
- Ethanol (96%)
- Reinigungslösung (z. B. Extran MA 01, alkalisch der Firma Merck)
- Flußsäure ($20 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$)
- Glaswolle
- Ionenaustauscherharz (Dowex 1×4 , 50–100 mesh)

- Reinigungslösung für Ultraschallbad (z. B. Labosol S der Firma neoLab)
- Membranfilter (Sartorius Nr. 11301)
- n-Heptan
- Natriumhydrogensulfat
- Natriumnitrit
- Salpetersäure, konzentriert ($14 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$)
- Salpetersäure ($8 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$)
- Salzsäure ($8 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$)
- Salzsäure ($10 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$)
- Schwefelsäure, konzentriert ($18 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$)
- Thymolblau-Indikator
- Tris-(2-ethylhexyl)-amin (Triisooctylamin, abgekürzt als TIOA)
- Tri-n-octylphosphinoxid (TOPO)
- Wasserstoffperoxid (30 %)
- Xylol (Isomerengemisch)

7.2 Geräte

Alpha-Spektrometrie:

- Alphaspektrometriemeßplatz mit Oberflächensperrschichtzähler oder ionenimplantiertem Detektor und Vielkanalanalysator

Elektrolyse:

- Edelstahlplättchen: V2A-Stahl, austhenitisch, $\varnothing = 25 \text{ mm}$, Dicke = 0,5 mm, poliert
- Gleichstromquelle mit Konstanthaltung der Stromstärke bis 3 A
- Silikon-Dichtungsringe

sonstiges:

- Abdampfschale
- Muffelofen
- Porzellantiegel
- Sandbad
- Schütteltrichter
- Ultraschallbad
- übliche Ausstattung eines radiochemischen Labors

Literaturverzeichnis

- (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