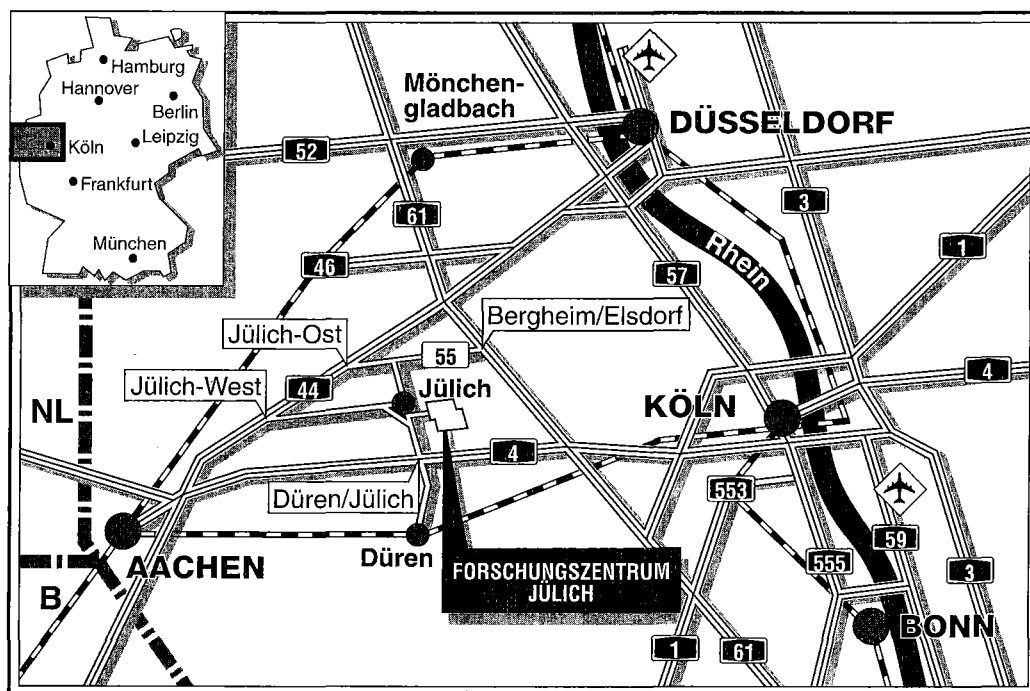


Zentralabteilung für Chemische Analysen

Zur Bestimmung langlebiger Radionuklide in radioaktiven Abfällen für die Endlagerung

Gerhard Erdtmann



Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 3207

ISSN 0944-2952

Zentralabteilung für Chemische Analysen Jül-3207

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek
D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland

Telefon: 02461/61-61 02 · Telefax: 02461/61-61 03 · Telex: 833 556-70 kfa d

Zur Bestimmung langlebiger Radionuklide in radioaktiven Abfällen für die Endlagerung

Gerhard Erdtmann

Inhaltsverzeichnis

1.0 Einleitung	1
2.0 Welche Radionuklide müssen bestimmt werden und wie niedrig müssen die Nachweisgrenzen sein?	3
2.1 Die Radionuklide	3
2.2 Die erforderlichen Nachweisgrenzen	3
3.0 Die Analysen- und Meßmethoden	5
3.1 α -Spektrometrie	5
3.2 β -Messung, speziell Flüssigkeitsszintillationszählung (LSC)	6
3.3 Elektronenspektrometrie	9
3.4 γ -Spektrometrie	10
3.5 Niederenergie- γ -Spektrometrie	11
3.6 Massenspektrometrie mit Anregung durch ein induktiv gekoppeltes Plasma (ICP-MS)	12
3.7 Neutronenaktivierungsanalyse	13
3.8 Fluorimetrie	14
4.0 Darstellung der Ergebnisse.	15
5.0 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	21
5.1 Erforderliche Entwicklungsarbeiten	23
5.1.1 Radiochemische Trennverfahren	23
5.1.2 Verfahren zur α -Spektrometrie	25
5.1.3 Verfahren zur Messung von β -Strahlern und von Atomelektronen im LSC	27
5.1.4 LEP-Spektrometrie	27
5.1.5 ICP-MS	27
5.1.6 Weitere Analysenverfahren	28
5.2 Erforderliche Investitionen	29
5.2.1 Radiochemische Trennverfahren	29
5.2.2 α -Spektrometrie	29
5.2.3 LSC	30
5.2.4 LEP-Spektrometrie	30
5.2.5 Elektronenspektrometrie	30
5.2.6 ICP-MS	30
6.0 Literatur	31
Anhang A. Angaben zu den einzelnen Nukliden	33
A.1 Erläuterungen	35
A.2 Angaben zu den einzelnen Nukliden	39

Vorwort

Der vorliegende Bericht wurde 1993 als Vorbereitung für ein Arbeitsprogramm der Zentralabteilung für Chemische Analysen (ZCH) zur Entwicklung von Analysenverfahren für die Bestimmung von Radionukliden in radioaktiven Abfällen geschrieben. Die hier zusammengetragenen Daten und Überlegungen sollten eine Hilfe bei der Planung von Arbeiten und Investitionen sein. Es hat sich herausgestellt, daß auch bei anderen Instituten, die auf diesem Gebiet arbeiten, Interesse an dem Bericht besteht und er soll deshalb als Jül-Bericht veröffentlicht werden. Für diese Ausgabe wurde der Bericht weitgehend unverändert übernommen. Nur einige Fußnoten wurden hinzugefügt, in denen neuere Erkenntnisse berücksichtigt und insbesondere auf inzwischen ausgeführte Arbeiten in der ZCH hingewiesen wird. Hieraus sind hervorzuheben:

- Die Anschaffung und Inbetriebnahme eines hochauflösenden Massenspektrometers mit induktiv gekoppelter Plasma-Ionenquelle (HR-ICP-MS "ELEMENT" der Fa. Fisons, vgl. Ref.^[2])
- Die Herstellung eines Labor-Standardmaterials für die Bestimmung von Radionukliden in der Matrix Beton.^[3]

In der im Anhang angefügten Tabelle mit Angaben zu den einzelnen Nukliden wurden die spezifischen Aktivitäten (Bq/1 g) der Radionuklide und das aktivitätsspezifische Gewicht (g/1 Bq) neu aufgenommen. Diese Angaben sind nützlich bei der Umrechnung von Analyseergebnissen der Massenspektrometrie in die üblicherweise geforderte Angabe der Aktivitäten.

Kurzdarstellung

Unter den langlebigen Radionukliden, die in kerntechnischen Abfällen gemessen werden müssen, befinden sich viele, deren Zerfallseigenschaften eine Bestimmung sehr schwierig machen, schwierig jedenfalls im Vergleich zur Bestimmung der Radionuklide, die bei der NAA anfallen und die zum großen Teil mit geringem Aufwand und simultan per γ -Spektrometrie bestimmt werden können.¹ Um Analysen von Proben mit langlebigen Radionukliden in größerem Umfang ausführen zu können, müssen in der ZCH Entwicklungsarbeiten geleistet und eventuell Investitionen getätigt werden. Um eine Entscheidungsgrundlage zu schaffen, welche Entwicklungsarbeiten und welche Investitionen aussichtsreich und vordringlich sind, wurden Überlegungen angestellt, welche Meßmethoden für welche der Radionuklide infrage kommen könnten. Dabei wurden radiometrische Methoden in Betracht gezogen (α -Spektrometrie, LSC, Elektronenspektrometrie, γ -Spektrometrie, und LEP-Spektrometrie) und auch isotopenspezifische Elementaranalyseverfahren (ICP-MS und NAA). Für jedes Nuklid wurden geforderte Nachweisgrenzen zugrundegelegt, und daran wurden die betrachteten Analysemethoden gemessen. Als geforderte Nachweisgrenze wurde jeweils der 10^{-8} te Teil der in Abfallgebinden maximal zulässigen Aktivität angenommen. Weitere Aspekte, vor allem Arbeitsaufwand und Zeitbedarf, wurden auch mit berücksichtigt. Wichtige Schlußfolgerungen sind:

- α -Spektrometrie, LSC und γ -Spektrometrie einschließlich LEP-Spektrometrie werden auf alle Fälle gebraucht, um alle gefragten Nuklide zu bestimmen.
- Die Entwicklung radiochemischer Trennverfahren wird den umfangreichsten Teil der erforderlichen Arbeiten einnehmen.
- Wenn die Analysen in großem Umfang ausgeführt werden sollen, müssen automatische Trennverfahren entwickelt werden. Wenn das nicht gelingt, werden die Analysen sehr aufwendig.
- Weitere Entwicklungsarbeiten werden für die LEP-Spektrometrie und für die α -Spektrometrie erforderlich sein.
- ICP-MS ist voraussichtlich für einen Teil der Nuklide gut geeignet, die allerdings alle auch mit radiometrischen Methoden bestimmt werden können. Der Vorteil der ICP-MS kann darin liegen, daß sie relativ schnell mehrere Nuklide gleichzeitig zu bestimmen gestattet. Darin ist sie der γ -Spektrometrie vergleichbar. Im Anwendungsbereich der beiden Methoden, d.h. im jeweils zugänglichen Sortiment an Nukliden, gibt es wenig Überschneidungen, so daß sich die beiden Methoden im wesentlichen ergänzen. Aber um den ganzen Bereich an Nukliden abzudecken, kann

¹ Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: Der Begriff "difficult-to-measure radionuclides" ist inzwischen in der Analytik kerntechnischer Abfälle ein *terminus technicus* geworden. (vgl. Raymond et al.^[1])

man auf α -Spektrometrie und LSC nicht verzichten und wahrscheinlich wird auch die LEP-Spektrometrie gebraucht.

1.0 Einleitung

Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle sind für eine große Zahl radioaktiver Nuklide nur bestimmte Mengen pro Abfallgebinde zugelassen. Um die Einhaltung dieser Vorschriften kontrollieren zu können, müssen radioanalytische Verfahren bestehen, die die Bestimmung dieser Radionuklide mit den erforderlichen niedrigen Nachweisgrenzen gestatten. Nur wenige dieser Radionuklide lassen sich mit der instrumentellen γ -Spektrometrie erfassen; für die meisten sind Probenaufschluß- und radiochemische Trennverfahren erforderlich, an die sich dann die eigentlichen Nachweisverfahren anschließen. Im wesentlichen kommen zur Aktivitätsbestimmung folgende Meßverfahren in Betracht:

1. α -Spektrometrie
2. β -Messung
3. Elektronenspektrometrie
4. γ -Spektrometrie
5. Niederenergie-Photonenspektrometrie (LEP-Spektrometrie)

Weil viele der gesuchten Radionuklide lange Halbwertszeiten haben, sind ihre Gewichtsmengen so hoch, daß sie evtl. schon mit empfindlichen Spurenelementanalysenmethoden nachgewiesen werden können. Weil es um den Nachweis bestimmter Nuklide und nicht der in den natürlichen Elementen vorkommenden Isotopengemische geht, ist es erforderlich, daß die Methoden mit isotopenspezifischen und nicht, wie die meisten Spurenelementmethoden, mit elementspezifischen Nachweisreaktionen arbeiten. Deshalb kommen hier vor allem infrage:

1. Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) und
2. Neutronenaktivierungsanalyse (NAA)

Der weitaus schwierigste und problematischste Schritt bei der Analyse des Inhalts von radioaktiven Abfallgebinden ist, wie fast immer bei der chemischen Analyse, die Entnahme repräsentativer Proben, weil in den Abfallbehältern die Radionuklide nicht homogen verteilt sind. Aber auch bei relativ homogenem Probenmaterial und selbst bei absolut homogenen Lösungen kommen verschiedene Laboratorien zu sehr unterschiedlichen Resultaten, die sich bei einigen schwierig zu bestimmenden Radionukliden sogar um Größenordnungen unterscheiden. Falsche Analysenergebnisse können einerseits dazu führen, daß zu hohe Aktivitätsmengen eingelagert werden und damit ein Sicherheitsrisiko entsteht und andererseits kann es dazu führen, daß die zulässigen Aktivitätsmengen vorsichtshalber nicht ausgeschöpft werden und damit knapper und teurer Deponieraum verschwendet wird. Zuverlässige Analysenverfahren sind hier also von großer volkswirtschaftlicher Bedeutung. Die Abteilung Radioanalytik der ZCH will hierzu einen Beitrag leisten. Als Vorbereitung hierzu sind in diesem Bericht Überlegungen angestellt, welche Meß- und Analysenmethoden für welche Radionuklide geeignet sein könnten. Diese Überlegungen resultieren aus der Kenntnis der Zerfallseigenschaften und der chemischen Eigenschaften der Nuklide und basieren bisher nur zu einem geringen Teil auf praktischen Erfahrungen und auch nicht auf einem umfassenden Literaturstudium. Sie sollen eine Entscheidungshilfe dazu sein, welche Entwicklungs-

arbeiten vordringlich in Angriff genommen werden müssen und welche Prioritäten bei der apparativen Ausstattung der Abteilung Radioanalytik gesetzt werden sollen.

2.0 Welche Radionuklide müssen bestimmt werden und wie niedrig müssen die Nachweisgrenzen sein?

2.1 Die Radionuklide

In einem Bericht des Bundesamts für Strahlenschutz ^[4] sind in den Tabellen 2 bis 6 einige hundert Radionuklide aufgeführt, die in den für die Endlagerung vorgesehenen Abfallbinden vorkommen können und für die Grenzwerte festgelegt sind. Es handelt sich fast ausschließlich um langlebige Radionuklide; einige kurzlebige sind dabei, die als Folgeprodukte von langlebigen Nukliden deren Bestimmung manchmal auf einfachere Weise erlauben. Die weitaus meisten der aufgeführten Nuklide entstehen beim Betrieb von Kernreaktoren: Spaltprodukte, Transurane und einige Aktivierungsprodukte. Andere Nuklide, die für bestimmte technische oder medizinische Anwendungen hergestellt werden, spielen fast keine Rolle. Alle in diesen Tabellen erwähnten Radionuklide wurden bei den Überlegungen berücksichtigt. Um welche es sich handelt, kann man in der Tabelle 2 des vorliegenden Berichtes sehen. Obwohl die Endlagerung in der Schachanlage Konrad vorerst nicht stattfinden wird und somit Ref.^[4] zur Zeit nicht mehr relevant ist, werden ähnliche Überlegungen auch für die derzeit vorgesehene Endlagerung in Morsleben gelten und insofern die hier getroffenen Überlegungen - innerhalb der ohnehin vorhandenen Unsicherheiten über Nachweisgrenzen, Probenahme usw. - nicht grundsätzlich falsch sein. Es kann allerdings sein, daß für langlebige α -Strahler noch strengere Kriterien festgelegt werden.

Zur Absicherung der Analysenergebnisse, die bisher in Forschungs-, Überwachungs- und Industrielaboratorien gemessen wurden und in Zukunft gemessen werden sollen, ist für 1994 ein internationaler Ringversuch an typischen Abfallproben geplant. Dabei sollen nur einige besonders wichtige Abfallnuklide bestimmt werden, die auch später bei entsprechenden Analysenaufträgen im Vordergrund stehen werden. Auf diese Ringversuch-Nuklide wird hier besonderes Augenmerk gerichtet und sie werden in den Ergebnistabellen hervorgehoben.²

2.2 Die erforderlichen Nachweisgrenzen

Eine Abschätzung der erforderlichen Nachweisgrenzen ist sehr schwierig und muß, nach unserem derzeitigen Kenntnisstand, sehr willkürlich sein. Wichtig war es aber vor allem, für den Vergleich der verschiedenen Analysemethoden eine einheitliche Basis zu erhalten. Für jedes Nuklid ist eine andere Nachweisgrenze erforderlich und sie ist jeweils

² Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: Dieser Ringversuch wurde inzwischen ausgeführt und die ZCH hat daran teilgenommen und gute Analysen geliefert. In den beteiligten Laboratorien konnten jedoch nicht alle gesuchten Radionuklide bestimmt werden. Eine abschließende Auswertung wurde vom Koordinator des Ringversuchs bisher noch nicht veröffentlicht.

das wichtigste Kriterium zur Beurteilung der Brauchbarkeit einer Analysenmethode für dieses spezielle Nuklid. Die erforderlichen Nachweisgrenzen wurden wie folgt ermittelt:

In den Tabellen von Ref.^[4] stehen, unterschieden nach Art des Abfalls und des Behältertyps, für jedes Nuklid die höchstzulässigen Aktivitäten pro Abfallgebinde. Von diesen Werten wurden die jeweils niedrigsten herausgezogen, z.B. für ^{90}Sr 6×10^9 Bq pro Behälter aus Tabelle 3, Spalte 1. Nun wurde angenommen, daß für die Untersuchung des Behälterinhalts, z.B. 500 kg, der 10^{-6} te Teil der Gesamtmenge entnommen wird, d.h. 0.5 g. Wenn man eine homogene Verteilung annimmt, dürften darin maximal 6000 Bq ^{90}Sr enthalten sein. Um sie sicher bestimmen zu können, sollte die Nachweisgrenze eine Größenordnung niedriger sein. Um das Nuklid auch dort finden zu können, wo es aufgrund inhomogener Verteilung in geringerer Konzentration vorliegt, wurde die erforderliche Nachweisgrenze noch einmal um den Faktor 10 herabgesetzt; d.h:

Die geforderte Nachweisgrenze ist hier definiert als der 10^{-8} te Teil der höchstens in einem Abfallgebinde zulässigen Aktivität eines Nuklids, wobei jeweils der niedrigste Wert aus den Tabellen im BfS-Bericht ^[4] genommen wurde.

3.0 Die Analysen- und Meßmethoden

3.1 α -Spektrometrie

Die Methode wurde in der Abteilung Radioanalytik bisher nur mit Halbleiterdetektoren (Sperrschichtzählern) betrieben und vor allem zur Bestimmung von Transuranen in Schwerwasser aus dem DIDO gebraucht. Bei Ringversuchen des Bundesgesundheitsamts an KKW-Abwässern wurden gute, d.h. im Rahmen der Streuung der Ergebnisse aller beteiligten Laboratorien richtige Ergebnisse erzielt. Außerdem hat die Abteilung Radioanalytik inzwischen α - Meßgeräte aus einer aufgelösten Gruppe der ZCH übernommen: vier Sperrschichtzähler mit den dazugehörigen Vakuummeßkammern und eine Gitterionisationskammer. Bei sehr niedrigen Aktivitäten sind die letzteren vorzuziehen. Außerdem ist ein Methandurchflußzählrohr vorhanden, das für Gesamt- α - Messungen verwendet werden könnte, aber nicht zur Spektrometrie geeignet ist.

Für die α -Spektrometrie, unabhängig davon ob ein Sperrschichtzähler oder eine Gitterionisationskammer verwendet wird, muß die Analysenprobe in jedem Fall aufgelöst und ein massearmes Meßpräparat daraus hergestellt werden. In der Regel ist das nur durch eine radiochemische Abtrennung der α -emittierenden Nuklide zu erreichen, manchmal müssen die infragekommenden Elemente noch einmal voneinander getrennt werden. Ein Vorteil der α -Spektrometrie ist es, daß der Meßuntergrund sehr gering ist, daß also sehr niedrige Nachweisgrenzen erreicht werden. Das ist allerdings auch notwendig, weil die höchstzulässigen Mengen bei α -Strahlern wegen der relativ starken Wärmeentwicklung sehr niedrig sind. Mit Sperrschichtzählern wurden bei uns Nachweisgrenzen von etwa 0.001 Bq erreicht, mit Gitterionisationskammern können sie noch niedriger sein. Da aber oft nur Aliquote der Proben für eine Messung zur Verfügung stehen und weil radiochemische Trennungen erforderlich sind, bei denen nicht immer 100% Ausbeute erreicht werden, und um auch andere unvorhersehbare Schwierigkeiten mit zu berücksichtigen, wird eine ungünstigere Nachweisgrenze als die bisher erreichte eingesetzt.³

Die mit α -Spektrometrie erreichbare Nachweisgrenze wurde für alle Nuklide mit 0.01 Emissionen/sec der jeweils intensivsten α -Linie angenommen

³ Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: Die Gitterionisationskammer (GIK-800, Münchner Apparatebau) wurde 1994 nach einigen technischen Verbesserungen, mit denen die Proben schneller gewechselt werden können und die Spektren stabiler sind, in Betrieb genommen. Die erreichten Nachweisgrenzen liegen bei 0.005 Bq.

3.2 β -Messung, speziell Flüssigkeitsszintillationszählung (LSC)

Zur β -Zählung werden u.a. Geiger-Müller-Zählrohre, Proportionalzählrohre und Szintillationszähler verwendet. Für analytische Messungen der β -Strahlung sind Flüssigkeitsszintillationszähler (im folgenden mit LSC, Liquid Szintillation Counter abgekürzt) meistens am besten geeignet. Die zu messende Probe wird mit einem Szintillations-Cocktail vermischt. Das ist ein Gemisch organischer Lösungsmittel mit Szintillatoren, d.h. Stoffen, die Licht aussenden wenn ein β -Teilchen im Cocktail absorbiert wird. Die Intensität der Lichtblitze ist der β -Energie proportional, d.h. man kann mit dem LSC ein β -Spektrum aufnehmen. Der flüssige Szintillator reagiert auch auf alle anderen Elektronen, die beim radioaktiven Zerfall emittiert werden, d.h. auf Auger- und Konversionselektronen, sowie auf Röntgen- und γ -Strahlung (die über Compton- und Photoprozesse Elektronen liefern) und auf α -Strahlung. Ein Gemisch von Radionukliden liefert also ein sehr komplexes Impulshöhenspektrum, das in der Regel mit numerischen oder mit anderen Methoden nicht zufriedenstellend in seine Komponenten zerlegt werden kann. Die Gründe dafür sind:

1. Die kontinuierlichen Spektren der β -Strahler liefern keine diskreten Linien und sie sind alle weitgehend überlagert. Schon ein einzelnes Nuklid hat meistens mehrere β -Zerfallszweige mit unterschiedlichen $E_{\beta, \max}$ -Werten.
2. α -Strahler erzeugen etwa zehnfach geringere Impulshöhen als β -Strahler, d.h. ein α -Impuls bei 5 MeV entspricht etwa einem β -Impuls bei 500 keV. Die α -Teilchen sind zwar monoenergetisch, erzeugen aber sehr breite Peaks, die evtl. auf dem β -Kontinuum aufsitzen und schlecht auswertbar sind.
3. Das Energieauflösungsvermögen des LSC liegt bei 10 - 15 %, ist also sehr gering.
4. Auger-Elektronen und Röntgen-Photonen, die bei diskreten Energien emittiert werden, sind nicht charakteristisch für bestimmte Radionuklide, weil alle Nuklide ähnlicher Ordnungszahl ähnliche Auger-Elektronen- bzw. Röntgenspektren liefern. Das gilt jedenfalls bei dem geringen Energieauflösungsvermögen der Szintillatoren.

Der Messung mit einem LSC muß also immer eine radiochemische Trennung vorausgehen. Dieser Arbeitsaufwand ist aber für alle anderen Meßverfahren ebenfalls erforderlich und kann insofern nicht als methodenspezifischer Nachteil gesehen werden.

Sehr niederenergetische Elektronen und Photonen lassen sich mit dem LSC nicht oder nur schlecht messen, weil in diesem Energiebereich auch Störimpulse durch Lumineszenzeffekte oder durch das thermische Rauschen der Photomultiplier auftreten. Bei modernen Geräten sind diese Störeffekte weitgehend reduziert, aber im Energiebereich unter 3 keV sind Messungen kaum, und im Bereich von 3 bis 6 keV nur schwierig möglich; d.h. Auger-Elektronen und die Röntgenstrahlung von Elementen mit Ordnungszahlen < 25 lassen sich nicht ohne weiteres messen. LSC-Geräte der jüngsten Generation können α - und β -Teilchen auch an der Impulsform unterscheiden und erlauben eine zuverlässigere Simultanmessung von α - und β -Strahlern als das bei uns vorhandene Gerät.

Besondere Vorteile des LSC sind

- die verhältnismäßig einfache Probenvorbereitung und
- die sehr hohe Zählausbeute.

Da der Zerfall im Szintillator stattfindet, werden die emittierten Teilchen mit "4 π -Geometrie", d.h. zu praktisch 100 % erfaßt. Nur die Teilchen, die unter den wegen der Lumineszenz gesetzten Diskriminator fallen, werden nicht registriert.

Der Einsatz von LSC wird in folgenden Fällen in Betracht gezogen:

1. **Reine β -Strahler.** Hier ist LSC (neben den anderen, oben erwähnten, meistens weniger geeigneten und deshalb hier nicht betrachteten Verfahren) oft die einzige mögliche Meßmethode.
2. **β - γ -Strahler.** Hier ist LSC oft die empfindlichste Meßmethode; γ -Spektrometrie ist aber sehr viel einfacher auszuführen (keine radiochemische Trennung erforderlich) und bietet fast immer ausreichend niedrige Nachweisgrenzen.
3. **Auger- und Konversionselektronen** (oft als "**Atomelektronen**" zusammengefaßt).
 - Atomelektronen können bei **β -Strahlern** zusätzlich zur β -Strahlung auftreten. β -instabile Kerne zerfallen fast immer zu 100% unter β -Emission. Nur bei wenigen Nukliden treten außerdem β^+ -, α - oder IT-Zerfall auf (IT = Internal Transition, bei mesomeren Nukliden). Der β^+ -Zerfall ist hingegen immer, meist zum stark überwiegenden Anteil, von Elektroneneinfang begleitet und gelegentlich können noch die obengenannten Zerfallsarten hinzukommen. Soweit die Atomelektronen koinzident mit den β -Teilchen emittiert werden, geben sie keine zusätzlichen Zählimpulse, d.h. sie haben keinen Einfluß auf die Empfindlichkeit der Messung.
 - Auger-Elektronen treten immer bei Nukliden auf, die per **Elektroneneinfang** zerfallen. Konversionselektronen können auftreten. Wenn der Elektroneneinfang die einzige Zerfallsart ist und keine γ -Strahlung emittiert wird, dann kann die Messung der Atomelektronen die optimale Methode zur Nuklidbestimmung sein. Wenn aber zusätzlich noch γ -Strahlung mit Linien ausreichender Intensität emittiert wird, dann ist die γ -Spektrometrie meistens vorzuziehen, weil sie ohne aufwendige Probenvorbereitung ausgeführt werden kann.
 - Atomelektronen beobachtet man immer beim **IT-Zerfall**. Diese Zerfallsart tritt bei langlebigen angeregten Zuständen von Radio- oder von stabilen Nukliden auf. Diese angeregten Zustände - auch als mesomere Nuklide bezeichnet - sind so langlebig, weil die möglichen γ -Übergänge zum Grundzustand wegen der Gesetze zur Erhaltung von Spin und Parität "verboten" sind. Der Übergang in den Grundzustand erfolgt dann vorwiegend durch Emission von Konversionselektronen, die aus den inneren Elektronenschalen der Atomhüllen "herausgeschlagen" werden. Die entstehenden Löcher werden aufgefüllt und dabei werden Röntgenstrahlen und Auger-Elektronen emittiert. Bei manchen mesomeren

Nukliden ist die Messung der Konversionselektronen und, wenn sie genügend energiereich sind, der Auger-Elektronen und der Röntgenstrahlung, mit einem LSC das optimale Verfahren. Häufig folgt dem verbotenen, stark konvertierten γ -Übergang jedoch noch eine Kaskade von nicht oder wenig konvertierten γ -Übergängen, oder das Nuklid kann neben dem IT-Prozeß auch über einen β -Prozeß zerfallen und dann hinreichend intensive γ -Linien haben, die eine einfache Bestimmung per γ -Spektrometrie ermöglichen.

4. α -Strahlung. Für die Messung von α -Strahlern mit dem LSC sind keine Nachweisgrenzen berechnet worden. Wir gehen davon aus, daß die α -Spektrometrie selektiver und empfindlicher ist. Es ist allerdings denkbar, daß - nach der in jedem Fall erforderlichen radiochemischen Trennung - die Herstellung der Meßpräparate für LSC einfacher ist als für α -Spektrometrie. Und wenn die Nachweisgrenze dann ausreicht, wäre die LSC bei der Messung größerer Serien vorzuziehen.⁴

5. γ -Strahlung und niederenergetische Photonen. Sie werden im flüssigen Szintillator über Photo- und Compton-Prozesse, bei denen sekundär Elektronen "entstehen" (sie entstehen nicht, sondern werden aus den Atomhüllen der Bestandteile des Szintillators herausgeschlagen), nachgewiesen. Für energiereiche γ -Quanten sind die Wechselwirkungsquerschnitte sehr klein; in einem Szintillatorvolumen von 20 ml werden nur 3 - 10 % der Quanten nachgewiesen, je nach Energie. Für Niederenergie-Photonen ist die Zähl Ausbeute hingegen beachtlich. In der folgenden Tabelle 1 ist dargestellt, wie hoch der Anteil der durch photoelektrische Prozesse absorbierten Photonen in einem der üblichen 20-ml Zählfläschchen für den LSC ist.

Die Messung der Röntgenstrahlung kann also recht effektiv sein. Im übrigen gilt ähnliches wie bei der Messung der Atomelektronen (siehe oben), die ja im wesentlichen bei den gleichen Zerfallsprozessen gebildet werden und im gleichen Energiebereich liegen.

In der ZCH werden einige Radionuklide - meist reine β -Strahler - mit LSC routinemäßig gemessen, wobei Tritium das Nuklid mit der niedrigsten β -Energie ist. Dafür werden Nachweisgrenzen von 0.05 Bq und niedriger erreicht. Für energiereichere Nuklide sind die Nachweisgrenzen im allgemeinen noch niedriger. Andererseits rechnen wir damit, daß für viele der hier zu messenden Nuklide eine absolut saubere Trennung von anderen Nukliden recht schwierig sein wird, so daß die Ausbeuten bei den chemischen Trennungen nicht immer 100% sind. Außerdem wird oft nicht die gesamte Probe für die Messung eines Nuklids zur Verfügung stehen. Deshalb wurde bei der Bewertung des Analysenverfahrens eine etwas höhere Nachweisgrenze angesetzt. Aber auch mit dieser Nachweisgrenze wäre die β - und die Elektronenmessung per LSC bei sehr vielen Nukliden die empfindlichste Meßmethode.

⁴ Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: Inzwischen wurde die LSC, neben der Messung von β -Strahlern, auch zur Bestimmung der Gesamt- α -Aktivität eingesetzt. Die Nachweisgrenze liegt bei 0.01 Bq. Für die Bestimmung der einzelnen Nuklide ist aber die Gitterionisationskammer besser geeignet.

Tabelle 1 - Zählausbeuten für Niederenergie-Photonen in einem flüssigen Szintillator.

Photonenenergie	Anteil der absorbierten Photonen
5 keV	100 %
10 keV	85 - 99%
15 keV	40 - 72%
20 keV	20 - 40%

Die Absorption hängt von der Zusammensetzung des Szintillator-Cocktails ab; wenn er viel Wasser oder andere sauerstoffreiche Verbindungen enthält, dann ist die Ausbeute höher. Die Werte wurden aus den Massenabsorptionskoeffizienten für eine Schicht der Dicke 1 g/cm² berechnet.

Die erreichbare Nachweisgrenze bei der LSC-Messung wird mit 0.1 Emissionen/s angenommen, wobei mit Emissionen entweder β -Teilchen oder Atomelektronen gemeint sind.

Aus dieser Nachweisgrenze in Emissionen/s wird die Nachweisgrenze in Bq für das betreffende Nuklid erhalten, indem man durch die Emissionshäufigkeit dividiert. Die meisten β -Strahler emittieren pro Zerfall ein β -Teilchen, d.h. die Emissionshäufigkeit ist 1 und die o.a. Nachweisgrenze entspricht 0.1 Bq. Wenn keine β -Emission auftritt aber Auger- oder Konversionselektronen emittiert werden, so kann die Anzahl der pro Zerfall emittierten Teilchen kleiner oder größer als eins sein. Wenn mehrere Elektronen pro Zerfall emittiert werden, dann werden sie in der Regel gleichzeitig emittiert, d.h. sie erzeugen im Szintillator alle zusammen nur einen Lichtblitz und auch in diesen Fällen kann die Zählausbeute maximal 100% sein. Für die grobe Abschätzung der Nachweisgrenzen in diesem Bericht wurden die Elektron-Elektron-Koinzidenzen nicht berücksichtigt.

3.3 Elektronenspektrometrie

Mit Elektronenspektrometrie ist hier die Messung der beim radioaktiven Zerfall emittierten, durch sekundäre Prozesse freigesetzten Elektronen (Konversions- und Atomelektronen) gemeint. Die meist unter dem Begriff Elektronenspektroskopie zusammengefaßten Verfahren der chemischen Analyse, bei denen Elektronen zur Anregung oder zur Detektion verwendet werden, um Energieniveaus in Molekülen oder Festkörpern zu messen, sind hier nicht gemeint.

Bei Elektronenspektrometrie ist hier vor allem an die Verwendung von Halbleiterdetektoren gedacht, die ein besseres Auflösungs-, aber ein geringeres Ansprechvermögen als der LSC haben. Magnetspektrometer, die ein noch besseres Auflösungsvermögen haben, wurden hier nicht berücksichtigt, weil sie zu aufwendig sind. In der ZCH existiert kein Halbleiterdetektor für die Elektronenspektrometrie, und deshalb sind Aussagen über Nachweisgrenzen wie überhaupt über die Verwendbarkeit und den Einsatzbereich sehr unsicher.

Die erreichbare Nachweisgrenze bei der Elektronenspektrometrie wird mit 2 Emissionen/s angenommen.

Die Elektronenspektrometrie erfordert in jedem Fall eine radiochemische Abtrennung des gesuchten Nuklids und eine spezielle Probenvorbereitung, die der bei der α -Spektrometrie vergleichbar ist.

Elektronenspektrometrie läßt sich am besten bei Radionukliden anwenden, die nur durch Elektroneneinfang zerfallen. Sie emittieren die beim Auffüllen der Elektronenlöcher entstehenden Röntgenstrahlen und Auger-Elektronen. Außerdem können sie, wenn dem Elektroneneinfang noch eine γ -Kaskade mit teilweiser oder vollständiger innerer Konversion folgt, auch Konversionselektronen emittieren. Wenn β -Zerfall vorliegt (β^+ oder β^-), dann sitzen die Linien der Elektronenstrahlung auf dem intensiven kontinuierlichen β -Spektrum und lassen sich schlecht auswerten. Entsprechend hoch ist der statistische Fehler.

Elektronenspektrometrie scheint bisher in der KFA noch nicht für die hier angesprochenen Aufgaben der Radionuklidanalytik eingesetzt worden zu sein. Es ist uns auch kaum ein Nuklid aufgefallen, wo seine Anwendung besondere Vorteile verspricht; ein Beispiel wäre ^{242m}Am .

3.4 γ -Spektrometrie

γ -Spektrometrie ist die am einfachsten auszuführende Meßmethode. Viele Radionuklide emittieren γ -Strahlung bei diskreten, für die Nuklide charakteristischen Energien. Das Energie-Auflösungsvermögen von Ge-Detektoren erlaubt es, die meisten Radionuklide ohne radiochemische Vortrennung zu identifizieren und zu messen. Auch unter den in den radioaktiven Abfällen gesuchten Radionukliden gehören einige zu dieser Gruppe. Leider ist aber gerade unter den bei den Abfällen relevanten Nukliden der Anteil derer, die keine geeignete γ -Strahlung emittieren, sehr viel höher als im Durchschnitt. Häufig ist die Zerfallsenergie klein, so daß allenfalls niederenergetische γ -Quanten emittiert werden. Sie werden erstens stärker von Materie absorbiert, d.h. in den Proben liegt eine starke Selbstabsorption vor, die eine quantitative Auswertung der Linienintensität erschwert, und zweitens emittieren im unteren Energiebereich sehr viel mehr Nuklide als im hohen Energiebereich und deshalb sind hier wechselseitige Störungen besonders

häufig. Unter den hier relevanten Nukliden sind auch viele β -Strahler, die keine oder nur sehr schwache γ -Strahlung emittieren. Das gilt auch für fast alle α -Strahler. Der Einsatz der instrumentellen γ -Spektrometrie ist hier also auf etwa ein Drittel der über hundert relevanten Radionuklide beschränkt.

Die Nachweisgrenze in einem γ -Spektrum wird einerseits durch den hohen Untergrund im niederenergetischen Bereich (Compton- und Rückstreu-Strahlung) und andererseits durch die niedrige Ansprechwahrscheinlichkeit der Detektoren im oberen Energiebereich bestimmt. Insgesamt ändert sie sich also über den gesamten Energiebereich nicht sehr stark, vielleicht um den Faktor zwei bis drei. Deshalb wurde hier für die γ -Spektrometrie eine energieunabhängige Nachweisgrenze angenommen. Außerdem hängt sie sehr stark von der Meßzeit ab. Bei Meßzeiten von 24 h und länger können Linien mit einer Emission von <0.01 γ -Quanten/s noch bestimmt werden. Weil so lange Meßzeiten für Routinemessungen nicht akzeptabel sind, wurde ein weniger günstiger Wert angesetzt.

Die Nachweisgrenze für die γ -Spektrometrie wird mit 2 γ -Quanten/s für die jeweils intensivste, gut meßbare γ -Linie angenommen.

Die Nachweisgrenze in Bq erhält man daraus durch Division durch die Emissionswahrscheinlichkeit der γ - oder der Röntgen-Linie. Sie entspricht Meßzeiten von 10 bis 30 min, abhängig von der Gesamtaktivität des Meßpräparates. Niedrigere Nachweisgrenzen können bei Bedarf durch längere Meßzeiten oder durch Verwendung des Low-Level- γ -Spektrometers der ZCH erreicht werden, das bei den geplanten Arbeiten mit verwendet werden soll, hier aber nicht gesondert betrachtet wird.

3.5 Niederenergie- γ -Spektrometrie

Für die Messung von Röntgen- und γ -Photonen im unteren Energiebereich (≈ 5 bis 100 keV) ist LEP-Spektrometrie (LEP = Low Energy Photon) vorzuziehen. LEP-Detektoren haben ein geringeres Ansprechvermögen für energiereiche γ -Strahlung und somit einen niedrigeren Comptonuntergrund und sie haben ein besseres Energieauflösungsvermögen als die für die normale γ -Spektrometrie üblichen HPGe-Detektoren. Weil die Röntgenlinien nicht unbedingt nuklidspezifisch sind - Nuklide mit ähnlichen Ordnungszahlen emittieren Röntgenlinien ähnlicher Energie - und weil im unteren Energiebereich ohnehin sehr viele Nuklide auch γ -Strahlung emittieren, und weil schließlich die niederenergetischen Photonen relativ stark in den Proben absorbiert werden (Selbstabsorption) ist eine radiochemische Abtrennung und die Herstellung eines möglichst massearmen Meßpräparats häufig zu empfehlen. Insofern ist der Aufwand für die Probenvorbereitung ähnlich, aber nicht ganz so hoch wie bei der α - und der Elektronenspektrometrie. Die LEP-Spektrometrie ist für den hier vorgesehenen Zweck unseres Wissens in der KFA noch nicht eingesetzt worden, sollte aber bei einigen Nukliden ausprobiert werden, weil sie entweder möglicherweise die empfindlichste Methode oder zumindest eine brauch-

bare Alternativmethode darstellt. Es wäre sowieso gut, wenn für jedes Nuklid nicht nur eine Analysenmethode zur Verfügung stünde, damit gelegentlich, vor allem in Zweifelsfällen, Vergleichsanalysen mit unabhängigen Verfahren ausgeführt werden können.

Ein LEP-Detektor ist in der ZCH vorhanden. Entwicklungsarbeit ist zur Anpassung der automatischen Spektrenauswertung an das neue Sortiment von Nukliden und die spezifischen Erfordernisse der LEP-Spektrometrie erforderlich. Die Nachweisgrenze kann nur grob geschätzt werden und wird mit der bei der γ -Spektrometrie gleichgesetzt, wobei hier aber, im Gegensatz zur γ -Spektrometrie, eine radiochemische Abtrennung des Nuklids vorausgesetzt wird.

Die Nachweisgrenze für die LEP-Spektrometrie wird mit 2 Photonen/s für die jeweils intensivste, gut meßbare Liniengruppe angenommen.

Die Nachweisgrenze in Bq erhält man daraus durch Division durch die Emissionswahrscheinlichkeit der Liniengruppe.

3.6 Massenspektrometrie mit Anregung durch ein induktiv gekoppeltes Plasma (ICP-MS)

Spurenelementanalysemethoden sind schon verschiedentlich zur Bestimmung langlebiger Radionuklide eingesetzt worden. Es kommen jedoch nur solche Methoden infrage, die auf isotopenspezifischen Reaktionen beruhen, während die elementspezifischen Methoden, die voraussetzen, daß das gesuchte Element in der natürlichen Isotopenzusammensetzung vorhanden ist, hier nicht geeignet sind. Eine geeignete Methode wäre die Massenspektrometrie. Um besonders niedrige Nachweisgrenzen zu erreichen, wurde z.B. die Beschleuniger-MS verwendet. Für Transurane wurde auch die Laser-Resonanz-Photoionisation mit einem Flugzeit-Massenspektrometer eingesetzt, wobei Nachweisgrenzen von 10^{-15} bis 10^{-16} mol erreicht wurden. Diese Verfahren erscheinen hier aber zu aufwendig. Die Massenspektrometrie mit einem induktiv gekoppelten Plasma als Ionenquelle (ICP-MS) ist nicht so extrem empfindlich, aber für einige der hier infrage kommenden Nuklide ausreichend. Dabei muß noch untersucht werden, wie weit stabile Nuklide von den Radionukliden mit der gleichen Massenzahl unterschieden werden können. Das gleiche gilt natürlich auch für die bei allen massenspektrometrischen Verfahren zu berücksichtigenden Überlagerungen mit ionisierten Molekülen und Atomclustern. Neuerdings werden ICP-MS-Geräte mit besonders hoher Auflösung angeboten, die diese Störungen vielleicht vermeiden können. Interessant für die Radionuklidanalytik wäre die ICP-MS vor allem dann, wenn sie ohne chemische Vorabtrennungen eingesetzt werden könnte. Ein Probenaufschluß und die Überführung in eine Lösung ist aber in jedem Fall erforderlich. Die erreichbare Nachweisgrenze muß sich, wie bei den radiometrischen Verfahren, auf die Gesamtprobe beziehen.

Als Nachweisgrenze der ICP-MS wird für alle Nuklide einheitlich 1×10^{-9} mol angesetzt.

Durch Multiplikation mit den Massenzahlen der Nuklide erhält man die Nachweisgrenzen in g. Um sie einfacher mit den Nachweisgrenzen der radiometrischen Methoden vergleichen zu können, wurden sie nach der folgenden Gleichung auch in Nachweisgrenzen (Bq) umgerechnet:

$$NWG(Bq) = \frac{N_L \times NWG(g)}{M} \times \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

(NWG = Nachweisgrenze, N_L = Loschmidtsche Zahl, 6.023×10^{23} , $t_{1/2}$ = Halbwertszeit, M = Atomgewicht)

Umgekehrt sind alle Nachweisgrenzen (Bq) der radiometrischen Methoden entsprechend in Nachweisgrenzen (g) umgerechnet worden. Auch für ICP-MS ist die Nachweisgrenze nur eine grobe Abschätzung. Je nachdem, welches Matrixmaterial vorliegt und welche störenden Elemente und Verbindungen auftreten, kann sie deutlich höher sein und andererseits kann in Meßproben, die durch radiochemische Trennverfahren gereinigt sind, die Nachweisgrenzen verbessert sein.

Radionuklide lassen sich mit ICP-MS in erster Näherung um so besser bestimmen, je länger die Halbwertszeit ist, weil dann die Gewichtsmenge pro Aktivitätseinheit groß ist. Man wird aber bei der Durchsicht der Ausführungen zu den einzelnen Nukliden feststellen, daß auch bei Nukliden mit langer Halbwertszeit die ICP-MS nicht immer die geforderten Nachweisgrenzen erreicht. Das liegt daran, daß bei langlebigen Nukliden, besonders bei α -Strahlern, meistens nur sehr niedrige Aktivitätsmengen, d.h. also auch sehr kleine Gewichtsmengen, in den Abfallgebinden zulässig sind, so daß das Verhältnis von erreichbarer zu geforderter Nachweisgrenze auch bei diesen Nukliden für die ICP-MS ungünstig ist.⁵

3.7 Neutronenaktivierungsanalyse

Neben der Massenspektrometrie ist die Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) die einzige Elementbestimmungsmethode, bei der eigentlich die Isotope bestimmt werden. Weil sie in vielen Fällen sehr nachweisstark ist, kann auch sie zur Bestimmung langlebiger Radionuklide eingesetzt werden. Bei der Durchsicht der hier relevanten Nuklide stellt sich

⁵ Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: In der KFA wurde 1994 ein hochauflösendes ICP-MS gekauft, das in der ZCH betrieben wird. Bisher wurde an der Entwicklung von Bestimmungsverfahren für Uran und die Radionuklide ^{79}Se und ^{129}J gearbeitet.

aber heraus, daß nur wenige per NAA bestimmt werden können; oft ist das aus dem gesuchten durch Neutroneneinfang neu gebildete Nuklid entweder stabil oder es hat ungünstige Zerfallseigenschaften (schwache γ -Emission, kurze Halbwertszeit etc.), so daß es schlecht gemessen werden kann. In den Fällen wo NAA bereits erfolgreich zur Bestimmung eines der hier gesuchten Nuklide eingesetzt werden konnte sind die Nachweisgrenzen(g) in etwa bekannt und bei dem jeweiligen Nuklid angegeben.⁶

3.8 Fluorimetrie

Das ist eine einfache und schnelle Methode, um Uran zu bestimmen. Weil Uranisotope auch bei den radioaktiven Abfällen gemessen werden müssen, wird gelegentlich vorgeschlagen, auch diese Methode anzuwenden. Sie ist jedoch nicht geeignet, weil damit keine Isotopenbestimmungen möglich sind.

⁶ Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: NAA wurde inzwischen versuchsweise zur Bestimmung von ^{129}J angewendet. Das ^{129}J war im Institut für Reaktorsicherheit, Abt. Chemische Technologie (ISR/ICT), aus kerntechnischen Abfällen abgetrennt und als Bleijodid präpariert worden. Das wurde im Reaktor bestrahlt und γ -spektrometrisch analysiert. Die Nachweisgrenze betrug etwa 0.0002 Bq, entsprechend 0.02 ng ^{129}J .

4.0 Darstellung der Ergebnisse.

Eine ausführliche Diskussion der einzelnen Nuklide findet man im Anhang, wo für jedes Nuklid und jedes dafür möglicherweise geeignete Analysenverfahren die erreichbare Nachweisgrenze auf der oben beschriebenen Basis berechnet und zu der geforderten Nachweisgrenze ins Verhältnis gesetzt wurde. Zur schnelleren Orientierung ist in der Tabelle 2 eine Übersicht über die Bewertung der Meßmethoden in bezug auf die hier gestellten Anforderungen gegeben. Die Zeichen in Tabelle 2 bedeuten:

- ++** Gut geeignet. Die Methode kann fast immer rein instrumentell, d.h. ohne Aufschluß und Trennverfahren, angewendet werden. Erfahrungen liegen vor. Trifft bisher nur bei γ -Spektrometrie und auch da nicht für alle γ -emittierenden Nuklide zu. Außerdem wurde es bei LSC von ^3H und ^{14}C angegeben, weil deren radiochemische Abtrennung meistens einfach und effizient ist.
- +** Geeignet, aber umständlich (chemische Trennung, komplizierte Interpretation der Spektren) und nicht zur Simultanbestimmung mehrerer Nuklide geeignet. Auf dieser Methode basierende Verfahren sind bekannt, müssen aber in der ZCH in manchen Fällen noch erprobt werden.
- (+)** Geeignet, aber nicht erforderlich, weil andere, einfacher ausführbare Methoden zur Verfügung stehen.
- +?** Vielleicht geeignet, muß aber noch untersucht werden. Das gilt bisher für alle Elektronenspektrometrie-, LEP- und ICP-MS-Verfahren. Im letzten Fall wurde in manchen Fällen das Fragezeichen weggelassen, wenn es sehr wahrscheinlich erschien, daß diese Methode eingesetzt werden kann.
- (+?)** Vielleicht geeignet, aber weil eine andere Methode zur Verfügung steht ist kein Einsatz und deshalb auch keine Entwicklungsarbeit geplant.
- Ungeeignet.
- ?** Wahrscheinlich schlecht geeignet. Wenn aber keine andere Methode zur Verfügung steht, muß eventuell doch darauf zurückgegriffen werden. Entwicklungsarbeiten sind erst sinnvoll, wenn andere Methoden nicht zu dem erwarteten Erfolg führen.
- ja** In der Rubrik "Ringversuch" sind die Nuklide gekennzeichnet, die bei dem für 1994 geplanten Ringversuch bestimmt werden sollen. Das Nuklid ^{55}Fe ist hier ebenfalls markiert, obwohl es in der Liste nicht enthalten ist. Bei der Untersuchung von Materialien aus stillgelegten kerntechnischen Anlagen soll es aber fast immer mit bestimmt werden und deshalb sollte dafür ein geeignetes Analysenverfahren in der ZCH existieren.

Tabelle 2 - Welche Analysenmethoden sind für welche Radionuklide geeignet?
- Kurze Übersicht.

Nuklid	α -Spektrometrie	LSC	Elektronen-spektrometrie	γ -Spektrometrie	LEP-Spektrometrie	ICP-MS	NAA	Ringversuch
³ H	-	++	-	-	-	(+?)		ja
¹⁰ Be	-	+	-	-	-	+?	-	
¹⁴ C	-	++	-	-	-	(+?)	-	ja
²² Na	-	(+)	-	++	-	-	-	
³⁵ S	-	+	-	-	-	-	-	
³⁶ Cl	-	+	-	-	-	+	-	
³⁹ Ar	-	+	-	-	-	?	-	
⁴¹ Ca	-	-	-	-	+?	+	-	
⁴⁵ Ca	-	+	-	-	-	-	-	
⁴⁶ Sc	-	(+)	-	++	-	-	-	
⁴⁹ V	-	+?	+?	-	+?	?	-	
⁵¹ Cr	-	(+)	(+?)	++	(+?)	-	-	
⁵⁶ Mn	-	(+?)	(+?)	++	-	-	-	
⁵⁵ Fe	-	+	+?	-	+?	+?	-	(ja)
⁵⁹ Fe	-	(+)	-	++	-	-	-	
⁵⁷ Co	-	(+)	(+?)	++	(+?)	-	-	
⁵⁸ Co	-	(+)	(+?)	++	(+?)	-	-	
⁶⁰ Co	-	(+)	-	++	-	-	-	ja
⁵⁹ Ni	-	+?	+?	-	+?	+	-	ja
⁶³ Ni	-	+?	-	-	-	?	-	ja
⁶⁵ Zn	-	(+)	-	++	-	-	-	
⁷⁹ Se	-	+	-	-	-	?	-	
⁸⁵ Kr	-	+	-	+?	-	?	-	

Nuklid	α -Spektrometrie	LSC	Elektronen-spektrometrie	γ -Spektrometrie	LEP-Spektrometrie	ICP-MS	NAA	Ringversuch
⁸⁷ Rb	-	+	-	-	-	+	+	
⁸⁹ Sr	-	+	-	-	-	-	-	
⁹⁰ Sr	-	+	-	-	-	-	-	ja
⁹³ Zr	-	+	+	-	+	+	-	ja
⁹⁵ Zr	-	(+)	-	++	-	-	-	
^{93m} Nb	-	+	+	-	+	+	-	
⁹⁴ Nb	-	(+)	-	+	-	-	-	ja
⁹⁵ Nb	-	(+)	-	++	-	-	-	
⁹³ Mo	-	+	+	-	+	+	-	
⁹⁹ Tc	-	+	-	-	-	+	+	ja
¹⁰³ Ru	-	(+)	(+)	++	-	-	-	
¹⁰⁶ Ru	-	(+)	-	++	-	-	-	
¹⁰⁷ Pd	-	+	-	-	-	+	-	
^{108m} Ag	-	+	+	+	-	-	-	
^{110m} Ag	-	(+)	-	++	-	-	-	
¹⁰⁹ Cd	-	?	+	+	+	-	-	
^{113m} Cd	-	+	-	-	-	-	-	
¹²⁶ Sn	-	(+)	(+)	+	(+)	?	-	ja
¹²⁵ Sb	-	(+)	(+)	++	-	-	-	
¹²⁶ Sb	-	(+)	-	++	-	-	-	ja
^{125m} Te	-	+	+	+	+	-	-	
¹²⁵ I	-	+	+	-	+	-	-	
¹²⁹ I	-	+	+	-	+	+	+	ja
¹³⁴ Cs	-	(+)	-	++	-	-	-	
¹³⁵ Cs	-	+	-	-	-	+	-	

Nuklid	α -Spektrometrie	LSC	Elektronenspektrometrie	γ -Spektrometrie	LEP-Spektrometrie	ICP-MS	NAA	Ringversuch
¹³⁷ Cs	-	(+)	-	++	-	-	-	
¹³³ Ba	-	(+)	(+?)	++	-	-	-	
¹⁴⁴ Ce	-	(+)	-	+	-	-	-	
¹⁴⁷ Pm	-	+?	-	-	-	?	-	
¹⁵¹ Sm	-	+?	-	-	-	+?	-	
¹⁵² Eu	-	(+)	(+?)	++	(+?)	-	-	
¹⁵⁴ Eu	-	(+)	(+?)	++	(+?)	-	-	ja
¹⁵⁵ Eu	-	(+)	(+?)	+	(+?)	-	-	
¹⁷⁵ Hf	-	(+)	(+?)	++	(+?)	-	-	
¹⁸¹ Hf	-	(+)	(+?)	++	(+?)	-	-	
¹⁸² Ta	-	(+)	(+?)	++	(+?)	-	-	
²⁰³ Hg	-	(+)	(+?)	++	(+?)	-	-	
²¹⁰ Pb	-	+?	?	-	?	-	-	
²¹⁴ Pb	-	(+)	-	++	-	-	-	
²¹⁰ Bi	-	+?	?	-	?	-	-	
^{210m} Bi	(+)	(+)	(+?)	++	-	+?	-	
²¹⁴ Bi	-	(+)	-	++	-	-	-	
²¹⁰ Po	+	-	-	-	-	-	-	
²²² Rn	+	-	-	-	-	-	-	
²²³ Ra	+	+	+?	+	+?	-	-	
²²⁴ Ra	+	-	-	+	-	-	-	
²²⁶ Ra	+	-	-	+	-	-	-	
²²⁸ Ra	-	-	-	-	+?	-	-	
²²⁷ Ac	?	?	-	-	+?	-	-	
²²⁸ Ac	-	(+)	-	++	-	-	-	

Nuklid	α -Spektrometrie	LSC	Elektronenspektrometrie	γ -Spektrometrie	LEP-Spektrometrie	ICP-MS	NAA	Ringversuch
^{227}Th	(+)	(+)	(+?)	++	-	-	-	
^{228}Th	+	(+?)	(+?)	-	(?)	-	-	
^{230}Th	+	-	-	-	-	+?	-	
^{231}Th	-	+?	+?	+	+?	-	-	
^{232}Th	+	-	-	-	-	+	+	
^{234}Th	-	+?	+?	+?	+?	-	-	
^{231}Pa	+	+?	?	-	?	-	-	
^{233}Pa	-	(+)	-	++	-	-	-	
^{234}Pa	-	(+)	(+?)	++	-	-	-	
^{234m}Pa	-	-	-	+	-	-	-	
^{232}U	+	-	-	-	-	-	-	
^{233}U	+	+?	(+?)	-	-	+?	-	
^{234}U	+	-	-	-	-	+?	-	ja
^{235}U	+	(+?)	(+?)	+	-	+	+	ja
^{236}U	+	(+?)	(+?)	-	-	+	-	
^{238}U	+	(+?)	(+?)	-	-	+	+	ja
^{237}Np	+	(+?)	(+?)	(+?)	(+?)	+	-	ja
^{236}Pu	+	(+?)	(+?)	-	(+?)	-	-	
^{238}Pu	+	(+?)	(+?)	-	(+?)	-	-	ja
^{239}Pu	+	-	-	-	-	?	-	ja
^{240}Pu	+	-	-	-	-	?	-	ja
^{241}Pu	-	+	-	-	-	-	-	ja
^{242}Pu	+	(+?)	(+?)	-	(+?)	+?	-	
^{244}Pu	+	-	-	-	-	+?	?	
^{241}Am	+	(+?)	(+?)	+	+	-	-	ja

Nuklid	α -Spektrometrie	LSC	Elektronenspektrometrie	γ -Spektrometrie	LEP-Spektrometrie	ICP-MS	NAA	Ringversuch
^{242m}Am	-	(+?)	(+?)	-	(+?)	-	-	
^{243}Am	+	-	-	+	+	?	-	ja
^{244}Am	-	(+?)	(+?)	++	(+?)	-	-	
^{242}Cm	+	-	-	-	(+?)	-	-	
^{243}Cm	+	(+?)	(+?)	+	(+?)	-	-	
^{244}Cm	+	-	-	-	(+?)	-	-	
^{245}Cm	+	(+?)	(+?)	+	(+?)	?	-	
^{246}Cm	+	(+?)	(+?)	-	(?)	?	-	
^{247}Cm	+	-	-	+	-	+?	-	
^{248}Cm	+	-	-	+?	-	+?	-	

5.0 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Wenn instrumentelle Multielement- bzw. Multinuklidanalysenverfahren zur Verfügung stehen, dann sind sie mit dem geringsten Arbeitsaufwand verbunden. Wenn die erforderlichen Meßgeräte vorhanden oder in der Anschaffung nicht zu teuer sind, sind das die wirtschaftlichsten Analysenverfahren und sie sollten in erster Linie bei der bevorstehenden Aufgabe eingesetzt werden.

Von den geeigneten Verfahren trifft das in erster Linie für die γ -Spektrometrie zu, für die gute Meßeinrichtungen vorhanden sind und kaum zusätzliche, speziell auf die neuen Aufgaben bezogene Entwicklungsarbeiten geleistet werden müssen.

Von den 108 betrachteten Nukliden können 31 voraussichtlich direkt mit der γ -Spektrometrie bestimmt werden. Das erfordert fast keinen Entwicklungsaufwand und die Methode ist auch zur Analyse größerer Serien gut geeignet. Der Arbeitsaufwand pro Nuklid ist minimal, und wo die Methode anwendbar ist, wird sie auch die Methode der Wahl sein. Leider ist unter den 24 für den Ringversuch vorgesehenen, also als besonders wichtig erachteten Nukliden die Zahl der mit γ -Spektrometrie bestimmbaren Nuklide nur klein: ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{126}Sn (über ^{126}Sb) und ^{154}Eu .

An zweiter Stelle unter den Multielementmethoden ist **ICP-MS** zu nennen. Hierfür ist die Probenvorbereitung aber schon aufwendiger. Es müssen geeignete Aufschlußverfahren vorhanden sein, die man jedoch für die anderen radiometrischen Methoden, mit Ausnahme der γ -Spektrometrie, auch benötigt. Ein ICP-MS-Gerät für radioaktive Proben ist in der ZCH nicht vorhanden und wäre, im Vergleich zu den radiometrischen Meßgeräten, sehr teuer.⁷

Inwieweit ICP-MS ohne chemische Trennungen auskommt, ist noch nicht klar. Unter günstigen Bedingungen können wahrscheinlich 24, vielleicht sogar 33 Nuklide mit ICP-MS auf diesem relativ einfachen Wege bestimmt werden, davon 10 (14?) aus dem Ringversuch: ^3H , ^{14}C , ^{59}Ni , $^{63}\text{Ni}(?)$, ^{93}Zr , $^{94}\text{Nb}(?)$, ^{99}Tc , $^{126}\text{Sn}(?)$, ^{129}I , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np und $^{239}\text{Pu}(?)$.

In eingeschränktem Umfang kann man auch die α -Spektrometrie, und in noch geringerem Umfang auch LEP- und Elektronenspektrometrie zu den Multinuklidverfahren zählen. Aber hier sind meistens doch Trennverfahren erforderlich und in jedem Fall ist die Probenvorbereitung schon ähnlich aufwendig wie ein chemisches Trennverfahren. Wir müssen also davon ausgehen, daß für alle Nuklide, die nicht mit γ -Spektrometrie bestimmt werden können und unabhängig davon, welche Meßmethode angewendet werden soll, eine **chemische Abtrennung der Elemente**, denen die Nuklide angehören,

⁷ Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: Vgl. Fußnote zu Abschnitt 3.6. Bei dem in der ZCH betriebenen Gerät "ELEMENT" reicht das Massenauflösungsvermögen nicht aus, um isobare Nuklide, z.B. ^{93}Zr von ^{93}Nb zu trennen; d.h. die chemische Abtrennung des interessierenden Elements ist unbedingt erforderlich. Das HR-ICP-MS wird zu einem großen Teil auch für andere chemisch-analytische Aufgaben eingesetzt und ist insofern nicht nur im Hinblick auf die Analytik kerntechnischer Abfälle gerechtfertigt.

notwendig ist. Das erfordert nicht nur einen erheblichen Arbeitsaufwand für die Vielzahl einzelner Trennungen, sondern auch einen erheblich höheren Aufwand für die Messungen selbst, denn nun muß für jedes Nuklid ein Meßpräparat hergestellt und eine spezielle Messung ausgeführt werden. Nur in wenigen Fällen dürfte es vielleicht gelingen, einige - vielleicht zwei bis vier - Nuklide simultan zu messen, z.B. mit γ - bzw. LEP-Spektrometrie oder mit α -Spektrometrie.

Für die meisten α -emittierenden Nuklide ist die α -**Spektrometrie** wegen ihrer hohen Nachweisstärke wohl das am besten geeignete Analysenverfahren, obwohl oft auch andere Strahlungsarten emittiert werden und für den Nachweis geeignet sein können. Die Nuklide, für die auch ICP-MS infrage kommt, sind oben mit erwähnt.

LEP-Spektrometrie-Verfahren mit chemischer Trennung sind in manchen Fällen auch gut geeignet und eventuell die optimalen Methoden. Von den Ringversuch-Nukliden könnte das für ^{94}Nb , ^{235}U , ^{241}Am , ^{243}Am und vielleicht auch für ^{129}J gelten.

Die **LSC-Messung nach radiochemischer Trennung** wird für viele Nuklide, vor allem für einen großen Teil der Ringversuch-Nuklide, die optimale Bestimmungsmethode sein. Von den letzteren gilt das für ^{55}Fe , vermutlich für ^{59}Ni , ^{63}Ni und ^{129}J , auf alle Fälle für ^{90}Sr und ^{241}Pu , und sicher auch für ^{93}Zr und ^{99}Tc . Geeignete Trennverfahren gibt es in der ZCH bisher aber noch nicht, mit Ausnahme von ^{90}Sr .

Sehr aussichtsreich ist die Bestimmung von ^3H und ^{14}C mit LSC, und für die Entwicklung eines Verfahrens, mit dem man beide Nuklide gemeinsam abtrennen kann, ist voraussichtlich nicht mehr viel Arbeit notwendig. Auch die Trennung voneinander ist nicht schwierig - andererseits ist die Simultanbestimmung von ^3H und ^{14}C mit LSC ein nach dem Stand der Technik übliches Verfahren, wenn die Aktivitäten nicht zu unterschiedlich sind.

Obwohl vermutlich für alle Nuklide radiometrische Verfahren entwickelt werden können, ist es doch fraglich, wie groß der Entwicklungsaufwand, und wie groß dann der Aufwand für die einzelne Bestimmung sein wird. Die problematischsten unter den wichtigen Nukliden sind, aus heutiger Sicht, ^{59}Ni , ^{63}Ni und ^{93}Zr . Bei den Plutonium-Isotopen ist die getrennte Bestimmung von ^{239}Pu und ^{240}Pu per α -Spektrometrie nicht möglich, weil sich die Energien der Linien zu wenig unterscheiden. Bisher wird meistens die Summe der beiden Nuklide bestimmt und für die Beurteilung der Abfälle akzeptiert.

Da die meisten radiometrischen Verfahren doch recht arbeitsaufwendig sind, richtet sich eine Hoffnung auf die ICP-MS, die zu einfacheren und schnelleren Analysenverfahren führen sollte. Überlegungen und Vorversuche, die eine Entscheidung über das Kosten-Nutzen-Verhältnis gestatten, sollten daher möglichst bald aufgenommen werden.⁸

Da die Liste der Nuklide für das Endlager Schachtanlage Konrad vorerst keine Gültigkeit mehr hat, kann man schlecht voraussagen, welche Nuklide in Zukunft für die Endlagerung in Morsleben oder in einem anderen Endlager gemessen werden sollen. Sehr

⁸ vgl. Fußnoten zu Abschnitt 3.6 und auf der vorigen Seite.

große Abweichungen von der vorhandenen Liste sind nicht zu erwarten, bei den Aktivitäten eher als bei der Auswahl der Nuklide. Langfristig müssen wir uns jedenfalls daraus einstellen, Analysenverfahren auch für diese Nuklide zu entwickeln. Besonders problematisch erscheinen dabei: ^{49}V , $^{93\text{m}}\text{Nb}$, ^{93}Mo , ^{107}Pd , ^{135}Cs , ^{147}Pm und ^{151}Sm .

5.1 Erforderliche Entwicklungsarbeiten

Vorerst wollen wir unsere Arbeit jedoch auf die wichtigen Nuklide konzentrieren, die auch bei dem Ringversuch gemessen werden sollen und die wohl auch für andere Analyseaufgaben der kerntechnischen Entsorgung Priorität haben. In Tabelle 3 sind die Ringversuch-Nuklide noch einmal zusammengestellt. Dazu sind die voraussichtlich optimalen Methoden und, wenn möglich, ein oder zwei Alternativmethoden genannt. Dafür müssen folgende Entwicklungsarbeiten in Angriff genommen werden.

5.1.1 Radiochemische Trennverfahren

Vordringlich werden Trennverfahren für die Nuklide ^3H , ^{14}C , ^{55}Fe , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{93}Zr , ^{94}Nb , ^{99}Tc und ^{129}I , sowie für die Elemente U, Np, Pu und Am gebraucht.⁹

Die Entwicklung von Trennverfahren für jedes einzelne Element erscheint im Moment noch unausweichlich. Über die Anwendung von **automatischen Trennverfahren**, mit denen Element- bzw. Nuklidgemische in Fraktionen bis hin zu einzelnen Elementen zerlegt werden können, war bei uns schon früher nachgedacht und es sind auch praktische Arbeiten in dieser Richtung ausgeführt worden, allerdings im Hinblick auf ihre Anwendung bei der NAA. So war bei uns das von Samsahl entwickelte, teilweise automatisierte, auf einer Kombination von Destillations- und Ionenaustausch-Trennungen beruhende Verfahren angewendet worden. Die gekaufte Apparatur erwies sich aber in der Praxis als sehr störanfällig und wurde wieder aufgegeben. Ein ähnliches Verfahren, aber mit einer sehr viel aufwendigeren, in der ZCH entwickelten Apparatur, sollte im Rahmen des früheren FE-Vorhabens "Spurenanalyse von Radionukliden" von der dafür eingerichteten Arbeitsgruppe entwickelt und betrieben werden. Diese Arbeiten sind jedoch nicht abgeschlossen worden. Es erscheint aussichtslos, die Apparatur zu reaktivieren und die Arbeiten wiederaufzunehmen.

Für die Trennung von gelösten Stoffen in flüssigen Phasen sind vor allem die **Hochdruck-Flüssigkeitschromatographie** (HPLC) und die Ionenchromatographie gebräuchlich. HPLC wird fast ausschließlich zur Trennung organisch-chemischer Stoffe angewendet. Die Trennung von chemischen Elementen ist denkbar und wohl auch gelegentlich experimentell versucht worden, z.B. mithilfe geeigneter Komplexbildner. Ein Problem ist dabei, daß die handelsüblichen Apparaturen nur mit sehr kleinen Lösungsvolumina arbeiten. Das ist für die Mikro- nicht aber für die Spurenanalyse geeignet. In diesem Fall, wie auch bei der Radionuklidanalytik, liegen meistens - in bezug auf die

⁹ Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: In der Abteilung Radioanalytik existieren inzwischen Trennverfahren für ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{99}Tc und für U, Np, Pu und Am und sie werden im Analysendienst eingesetzt.

Tabelle 3
Voraussichtlich optimale Methoden zur Bestimmung der Ringversuch-Nuklide

Nuklid	Methoden		
	1	2	3
³ H	LSC	-	-
¹⁴ C	LSC	-	-
⁵⁵ Fe	LSC	LEP	ICP-MS
⁶⁰ Co	γ-Spektrometrie	-	-
⁵⁹ Ni	ICP-MS	LSC?	LEP?
⁶³ Ni	LSC?	ICP-MS?	-
⁹⁰ Sr	LSC	-	-
⁹³ Zr	LSC?	ICP-MS?	LEP?
⁹⁴ Nb	γ-Spektrometrie	LSC?	-
⁹⁹ Tc	LSC	ICP-MS?	NAA
¹²⁶ Sn/Sb	γ-Spektrometrie	ICP-MS	LSC?
¹²⁹ I	LSC	ICP-MS	LEP?
¹⁵⁴ Eu	γ-Spektrometrie	-	-
²³⁴ U	α-Spektrometrie	ICP-MS?	-
²³⁵ U	α-Spektrometrie	LEP	ICP-MS/NAA
²³⁸ U	α-Spektrometrie	ICP-MS	NAA
²³⁷ Np	α-Spektrometrie	ICP-MS	LEP?
²³⁸ Pu	α-Spektrometrie	LSC?	LEP?
²³⁹ Pu	α-Spektrometrie	ICP-MS?	-
²⁴⁰ Pu	α-Spektrometrie	-	-
²⁴¹ Pu	LSC	-	-
²⁴¹ Am	α-Spektrometrie	LEP	γ-Spektrometrie
²⁴³ Am	α-Spektrometrie	LEP	γ-Spektrometrie

gesuchten Komponenten - hochverdünnte, sonst aber stark säure- oder salzhaltige Lösungen vor. Die in den kleinen Volumina - max. 50 bis 100 µl - vorliegenden Mengen an Elementen oder Radionukliden sind, nach der Trennung (wenn diese überhaupt möglich ist), nicht ausreichend für eine anschließende Messung. Im ICT ist, trotz dieser Probleme, ein HPLC-Gerät für die Ausführung der für die Radionuklidbestimmungen erforderlichen Trennungen gekauft worden. Es ist möglich, daß bei der Analyse sehr hoch aktiver Lösungen die kleinen Volumina ausreichen und das Gerät gute Dienste leistet.¹⁰

¹⁰ Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: Im Rahmen einer Dissertation wird in der ZCH die HPLC für die Entwicklung von Trennverfahren für Radionuklide eingesetzt.

Ein anderes wichtiges Trennverfahren ist die **Ionenchromatographie**, die u.a. auch im Reaktorlabor der ZCH betrieben wird. Auch hier muß geprüft werden, ob die Methode für die bevorstehenden Aufgaben geeignet ist.

Im Hinblick auf die chemischen Trennverfahren soll folgendes Vorgehen vorgeschlagen werden:

1. Fortsetzung der begonnenen Arbeiten zur nicht automatisierten Einzelnuklid-trennung. Sie sind im Moment noch der aussichtsreichste und apparativ am wenigstens aufwendige Weg. Selbst wenn eines Tages ein automatisches Trennverfahren zur Verfügung steht, werden diese Trennungen für Vergleichs- und Referenzzwecke gebraucht werden. Vor allem sind die Trennverfahren für einzelne Nuklide letzten Endes auch Teile eines anzustrebenden automatischen Trennverfahrens für möglichst viele Nuklide und die Entwicklungsarbeiten sollten auch schon im Blick auf diese spätere Möglichkeit betrieben werden.
2. Zusammenfassung der Erfahrungen der ZCH mit der Ionenchromatographie und gegebenenfalls Nutzung der vorhandenen Apparaturen für Entwicklungsarbeiten in der hier notwendigen Richtung. Wenn das Verfahren sehr erfolgreich eingesetzt werden kann, müßte eine Apparatur für die Abteilung Radioanalytik gekauft werden.
3. Die Erfahrungen des ICT bei der Nutzung der HPLC abwarten und evtl. Kooperation, wenn wir gute Ideen beisteuern können. Wenn das Verfahren erfolgreich eingesetzt werden kann, müßte eine Apparatur für die Abteilung Radioanalytik gekauft werden.
4. Gezielte Literaturrecherche zu Elementtrennverfahren mit HPLC und Ionenchromatographie.

5.1.2 Verfahren zur α -Spektrometrie

In der Abteilung Radioanalytik der ZCH ist die α -Spektrometrie nur relativ selten, meistens zur Bestimmung von α -Strahlern in Schwerwasser eingesetzt worden. Dabei wurden elektrolytisch abgeschiedene Präparate mit Halbleiterdetektoren gemessen. Die elektrolytische Abscheidung, die mit einem Tracer kontrolliert werden muß, ist vermutlich für größere Probenserien zu zeitraubend. Die Messung mit Halbleiterdetektoren ist voraussichtlich nicht so empfindlich wie die Messung mit Gitterionisationskammern. Im ersten Fall können Präparate mit wenigen cm^2 , im zweiten Fall mit etwa 200 cm^2 gemessen werden, d.h. es können relativ große Probenmengen eingesetzt werden und man erhält trotzdem genügend dünne Meßpräparate, die noch auswertbare α -Spektren liefern.

Erforderliche Arbeiten:

1. In der ZCH ist eine Gitterionisationskammer vorhanden. Sie muß wieder betriebsbereit gemacht und an einen Impulshöhenanalysator angeschlossen werden.¹¹
2. Das gleiche gilt für die vorhandenen Halbleiterdetektoren mit den zugehörigen Vakuumkammern.
3. Zur Herstellung geeigneter Präparate für die Gitterionisationskammer und für die Halbleiterdetektoren werden einfache Verfahren benötigt. Wahrscheinlich können die im ICT verwendeten Verfahren weitgehend übernommen werden.¹²
4. Zur Auswertung der α -Spektren muß ein automatisiertes Verfahren installiert werden, ähnlich wie es bereits für die γ -Spektroskopie existiert. Für die wenigen bisher aufgenommenen Spektren genügte die Auswertung von Hand. Wahrscheinlich ist es der beste Weg, für die Auswertung der α -Spektren geeignete Software zu kaufen. Ein α -Software-Paket ist aus den Beständen der früheren FE-Gruppe in der ZCH vorhanden.¹³
5. Die vorhandene Auswertungssoftware kann auf dem zentralen μ VAX-Rechner der Abteilung Radioanalytik nicht installiert werden. Sie läuft nur auf einem PC. Außerdem ist eine Vielkanalanalysator-Platine, ebenfalls für einen PC, vorhanden, die für die Messung von α -Spektren optimiert und mit der Auswertungssoftware kompatibel ist. Der zugehörige PC ist jedoch nicht mehr brauchbar und es fehlt der zur Software gehörige "Lizenz-Detektor", ohne den das Programm nicht läuft. Weiter ist zu klären, ob man mit einem PC mehrere MCA-Karten und Meßplätze betreiben kann.
6. Über gegenseitige Störungen der α -Nuklide durch Linienüberlagerungen gibt es bei uns wenig praktische Erfahrungen. Die "Störfälle" können im Prinzip aus einer Isotopentabelle zusammengesucht werden. Eine nach Energien sortierte Tabelle, die das am besten ermöglicht und wie sie für die γ -Spektrometrie existiert, ist uns für die α -Spektrometrie nicht bekannt; nur eine Tabelle älteren Datums, in der die α -Energien nicht genau stimmen. Auch hier ist eine Literaturrecherche notwendig.

¹¹ Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: Der α -Meßplatz wurde inzwischen in Betrieb genommen; vgl. Fußnote zu Abschnitt 3.1.

¹² Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: In der ZCH wird inzwischen ein einfaches Verfahren zur Herstellung von Meßpräparaten für die Gitterionisationskammer angewendet: Die bei der chemischen Abtrennung durch flüssig-flüssig Extraktion erhaltene organische Phase wird auf der Großflächenmeßschale gleichmäßig verteilt und eingedampft. Man erhält gut meßbare Präparate mit ausreichend schmalen α -Linien.

¹³ Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: Das Auswerteprogramm der Fa. Westmeyer, Mölln, wurde inzwischen getestet und in Betrieb genommen. Es liefert gute Ergebnisse, ist aber nicht sehr bedienungsfreundlich.

5.1.3 Verfahren zur Messung von β -Strahlern und von Atomelektronen im LSC

Die Messung von β -Strahlern im LSC ist kein Problem, wenn die zu messenden Nuklide sorgfältig getrennt, d.h. genügend rein sind. Das gilt sicher auch für die Messung von Atomelektronen, wobei noch zu untersuchen ist, welche untere Energiegrenze mit dem LSC erreicht werden kann. Das ist nicht nur für die Messung von Nukliden mit sehr energiearmen Auger-Elektronen - z.B. Calcium-Isotope oder ^{49}V - wichtig. Man muß auch wissen, wie stark die Grenze von der Lichtausbeute (unterschiedliche Szintillatoren, Quencheffekte) abhängt und die Zählausbeute beeinflusst. Wichtig bei der LSC-Messung ist auch, daß man die Reinheit der zu messenden Nuklide überprüfen kann. Das läßt sich fast nur aus den Formen der Impulshöhenspektren ablesen, weil bei den langlebigen Nukliden Halbwertszeit-Messungen nicht infrage kommen. Hier liegen noch wenig Erfahrungen vor, vor allem bei Nukliden die niederenergetische Atomelektronen - allein oder in Kombination mit β -Strahlung - emittieren, und über die gegenseitigen Störungen der Nuklide, auch durch andere Strahlungsarten wie γ -, Röntgen- und α -Strahlung. Die individuelle Überprüfung der vom Gerät gelieferten Meßwerte und Analysenergebnisse ist hier noch wichtiger und aufwendiger als bei der α - und γ -Messung. Auf längere Sicht ist die Anschaffung eines neuen LSC-Spektrometers, das α - und β -Strahlung anhand der Impulsform trennen kann, notwendig.

5.1.4 LEP-Spektrometrie

Ein LEP-Detektor ist in der ZCH vorhanden und in das vorhandene γ -Spektrometrie-System integriert. Für Peaksuche und Peakfit kann man im Prinzip das gleiche Verfahren (Rechenprogramm) verwenden, das auch für die normale γ -Spektrometrie angewendet wird. Allerdings wird man, vor allem im Bereich der Röntgenlinien, sehr viel mehr und stärkere Überlagerungen haben. Zur Nuklididentifizierung ist ein spezieller Satz nuklearer Daten für die niederenergetischen Linien erforderlich. Er kann, im Prinzip, aus dem vorhandenen Datenfile GAMDAT-79 herausgezogen werden. Er muß aber anhand neuerer Publikationen überprüft werden, weil gerade für die Röntgenlinien der Radionuklide inzwischen erheblich bessere Daten bekannt geworden sind. Die Auswertung der Spektren ist einerseits durch die Linienüberlagerungen, andererseits durch die Selbstabsorption der energiearmen Photonen, komplizierter als bei der normalen γ -Spektrometrie; automatische Korrekturverfahren existieren bei uns bisher noch nicht. Wenn wir aber davon ausgehen, daß die Nuklide vor der LEP-Messung abgetrennt werden - wobei an die Reinheit der Radionuklide nicht so hohe Anforderungen gestellt werden wie bei LSC - und Meßpräparate mit geringer Schichtdicke hergestellt werden, dann sind die Probleme der Linienüberlagerung und auch der Photonenselbstabsorption weitgehend eliminiert.

5.1.5 ICP-MS

Die im Rahmen dieses Vorhabens zu messenden Radionuklide können alle mit radio-metrischen Verfahren bestimmt werden, allerdings oft nur mit erheblichem Aufwand an Personalstunden pro Messung. Mit ICP-MS könnte der Arbeitsaufwand vermutlich er-

heblich verringert werden. Ehe man an die Anschaffung eines so teuren Gerätes denkt, sollte aber die praktische Realisierbarkeit im Detail sorgfältig durchdacht werden.¹⁴

Man muß daran denken, daß die Meßproben ziemlich stark radioaktiv sind - und zwar von langlebigen Nukliden - und daß dadurch die Wartung und Reparatur und eventuell der Betrieb des Gerätes erheblich erschwert sein werden.

Bisher ist es noch weitgehend unklar, wieweit die bekannten und für die stabilen Elemente heute meist korrigierbaren Störungen durch Massenüberlagerungen - bei der Analyse stabiler Elemente resultieren sie aus dem Auftreten von mehrfach geladenen Ionen, von Molekülonen und von geladenen Clustern gleicher Massenzahl wie das gesuchte Nuklid, bei der Bestimmung von Radionukliden kommen die Überlagerungen von stabilen Isotopen mit Radionukliden hinzu - gelöst werden können und ob dafür ein modernes Gerät mit hoher Auflösung geeignet ist.

Wenn ein geeignetes ICP-MS zur Verfügung steht, dann könnten voraussichtlich folgende Nuklide mit den erforderlichen Nachweisgrenzen simultan bestimmt werden:

^3H , ^{10}Be , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{59}Ni , ^{87}Rb , ^{93}Zr , ^{93}Mo , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{129}J , ^{135}Cs , ^{151}Sm , ^{232}Th , ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{242}Pu , ^{244}Pu und ^{247}Cm ,

wobei die unterstrichenen Nuklide auch im Ringversuch gefordert, also besonders wichtig bei der Beurteilung von radioaktivem Abfall sind.

5.1.6 Weitere Analysenverfahren

NAA ist wohl zu zeitaufwendig und wird nur gelegentlich zu Kontrollzwecken eingesetzt. Entwicklungsarbeiten sind hier nicht erforderlich.

Die **Fluorimetrie** ist ein sehr schnelles und effektives Verfahren zur Bestimmung von Uran. Es kann hier jedoch nicht eingesetzt werden, weil es keine Auskunft über die Isotopenverteilung gibt.

Die Nuklide ^{39}Ar , ^{85}Kr und ^{222}Rn können nicht mit den anderen Nukliden in einer Probe bestimmt werden. Dafür sind besondere Probenahmeverfahren erforderlich, die nicht in der ZCH ausgeführt werden. Inwieweit hierfür einmal Analysenverfahren notwendig sind, kann jetzt noch gesagt werden. Vorerst sind keine Entwicklungsarbeiten geplant.

Ein weitverbreitetes und wichtiges Vorprüf-Verfahren bei Radionuklidbestimmungen ist die **Gesamt- β - und die Gesamt- α -Zählung**. Wenn die damit gefundene Emissionsrate kleiner ist als der zulässige Wert für irgendeins der Radionuklide, dann kann man auf eine weitere Prüfung der Probe verzichten. Es ist vorgesehen, diese Messungen mit dem LSC auszuführen und besondere Entwicklungsarbeiten erscheinen nicht notwendig. Eventuell ist zu vergleichen, wie diese Meßmethode mit den in anderen Laboratorien angewendeten Verfahren korrespondiert, da die Ergebnisse sehr stark von den

¹⁴ vgl. Fußnoten zu den Abschnitten 3.6 und 5.0.

Zählausbeuten für die verschiedenen Radionuklide abhängen. Für die Gesamt- α -Zählung kann evtl. auch das vorhandene Methandurchflußzählrohr verwendet werden; allerdings ist hierfür eine spezielle Meßpräparatherstellung erforderlich, so daß LSC vermutlich vorzuziehen sein wird.

5.2 Erforderliche Investitionen

5.2.1 Radiochemische Trennverfahren

Für die Aufschluß- und Trennverfahren werden im wesentlichen Geräte benutzt, die im Labor vorhanden sind. Einige Kleingeräte müssen eventuell erneuert oder hinzugekauft werden.

Für die Veraschung von Ionenaustauscher-Proben werden z.Z. Versuche mit dem Trace-O-Mat ausgeführt. Falls die nicht zum Erfolg führen und auch andere, in der ZCH vorhandene und für andere Analysenverfahren nicht benötigte Veraschungsgeräte nicht geeignet sein sollten, ist hier vielleicht eine Investition erforderlich, z.B. ein Packard-Oxidizer, der vor allem zur Bestimmung von Tritium und ^{14}C gut geeignet ist, aber im Verbrennungsrückstand auch die anderen Nuklide zugänglich machen sollte.

Hochdruck-Flüssigkeitschromatograph ¹⁵ und Ionenchromatograph wären sehr wichtige Anschaffungen, wenn sie sich für die erforderlichen Trennungen als geeignet erweisen. Die Vorversuche sollten aber mit vorhandenen Geräten, evtl. in Zusammenarbeit mit dem ICT ausgeführt werden. Die Frage des Kaufes dieser Geräte ist vorerst nicht entscheidungsreif.

5.2.2 α -Spektrometrie

In der ZCH ist - von der früheren FE-Gruppe übernommen - ein Rechenprogramm zur Auswertung von α -Spektren vorhanden. Es läuft nur auf einem PC und nicht auf der vorhandenen VAX-Station. Bisher konnte es von der Abteilung Radioanalytik noch nicht benutzt werden. Deshalb können wir bis jetzt noch nicht sagen, ob es den hier gestellten Anforderungen genügt. Auf alle Fälle müßte dafür ein leistungsfähiger PC gekauft werden, der mit einer oder, noch besser, mit mehreren MCA-Karten für die α -Spektrometrie ausgerüstet werden kann. Daran könnten die vorhandenen Gitterionisationskammern und Halbleiterdetektoren angeschlossen werden. Die α -Spektrometrie-Einschübe bzw. die zugehörige Software müssen die Meßdaten so formatieren, daß sie vom Auswerteprogramm übernommen und bearbeitet werden können. Ein auf Datenträger gespeicherter Katalog der relevanten, α -strahlenden Nuklide, zu dem das Auswerteprogramm zugreifen kann, wäre sehr nützlich und sollte gekauft werden, wenn er verfügbar ist. Diese Investitionen sollten schon für 1994 vorgesehen werden.

¹⁵ Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: Ein HPLC-Gerät wurde inzwischen gekauft und wird im Rahmen einer Doktorarbeit zur Entwicklung von Trennverfahren für die Analytik kerntechnischer Abfälle benutzt.

5.2.3 LSC

Da für die Bestimmung der sehr verschiedenartigen Nuklide bei jeder Meßprobe das Spektrum ausgedruckt und eventuell auch mit numerischen Methoden bearbeitet werden muß, ist das Meßgerät in der z.Z. vorhandenen Ausstattung schlecht geeignet. Die Verarbeitung von Spektren geht sehr langsam und manche wichtigen Manipulationen sind gar nicht möglich. Es soll mit der Fa. Canberra-Packard verhandelt werden, ob eine Aufrüstung des Gerätes für die erforderlichen Zwecke möglich ist. Ein wichtiger Aspekt dabei ist es, den vorhandenen IBM-XT-Rechner durch einen viel schnelleren, modernen PC zu ersetzen. Diese Investition sollte 1994 erfolgen.¹⁶

Falls die Nachrüstung technisch nicht möglich sein sollte, muß möglichst bald, spätestens 1995, ein moderner LSC gekauft werden, der die erforderlichen Optionen hat, und der auch imstande ist, α - und β -Strahlung voneinander zu trennen.

5.2.4 LEP-Spektrometrie

Ein LEP-Detektor ist vorhanden. Hier sind vorläufig keine Investitionen erforderlich. Falls die Methode sich als nützlich erweist und größere Probenserien damit gemessen werden sollen, dann muß dafür ein spezieller Probenwechsler gebaut oder ein Laborroboter für den automatischen Probenwechsel angeschafft werden. Der vorhandene Probenwechsler ist für die Anordnung des LEP-Detektors und auch für die Messung niederenergetischer Strahlung nicht geeignet.

5.2.5 Elektronenspektrometrie

Das Meßverfahren hat offenbar für kein Nuklid besondere Vorteile und wird wahrscheinlich nicht benötigt.

5.2.6 ICP-MS

Inwieweit die ICP-MS für die Radionuklidanalyse geeignet ist, sollte vor dem Kauf eines Gerätes durch theoretische Überlegungen und Literaturstudien geklärt werden. Falls im ICT ein solches Gerät beschafft wird, hoffen wir, daß die ZCH damit einige Versuche ausführen kann, um die Eignung des Verfahrens für die anstehenden Aufgaben zu testen. Der Kauf eines eigenen Gerätes für die ZCH steht derzeit noch nicht zur Diskussion.¹⁷

¹⁶ Anmerkung bei der Ausgabe April 1996: Die Modernisierung des Gerätes ist inzwischen abgeschlossen.

¹⁷ vgl. Fußnoten zu Abschnitt 3.6 und 5.0.

6.0 Literatur

1. A. Raymond, W.Müller, R.Gens, M.Gill, A.Morales, A.Yates *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.* **193** 377 (1995).
2. J. Becker "Hochauflösendes Massenspektrometer mit induktiv gekoppelter Plasmaionenquelle"., *Mitteilungsblatt 3 '95 der Gesellschaft Deutscher Chemiker, Fachgruppe Analytische Chemie, Fresenius J. Anal. Chem.* 3'95 M104, December 1995
3. G. Küppers, G.Erdtmann "Laboratory Standard for Radionuclides in Nuclear Waste", *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.* (in print)
4. Bericht des Bundesamts für Strahlenschutz "Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Vorläufige Endlagerungsbedingungen, Stand April 1990 in der Fassung Juli 1991) - Schachtanlage Konrad -", ET-3/90-REV-1 (Juli 1991).

Anhang A. Angaben zu den einzelnen Nukliden

A.1 Erläuterungen

Im Anhang sind für jedes Nuklid folgende Angaben aufgelistet:

1. in der **Kopfzeile**

- das Nuklidsymbol
- die Halbwertszeit
- "Ringversuch", wenn das Nuklid bei dem für 1994 geplanten internationalen Ringversuch bestimmt werden soll.

2. in der **zweiten Zeile**

- das aktivitätsspezifische Gewicht des Radionuklids (g/1Bq)
- die spezifische Aktivität des Radionuklids (Bq/1g)

3. in der **dritten Zeile**

- die geforderte Nachweisgrenze (Bq)
- die geforderte Nachweisgrenze (g)
- die Nummer der Tabelle in Ref.^[4], aus der die Angabe über die zulässige Höchstmenge (die der geforderten Nachweisgrenze zugrunde liegt) entnommen wurde. In den Tabellen wurde immer die erste Spalte genommen, weil sie in der Regel die niedrigsten Angaben zur Höchstmenge enthielt.

4. in der **Tabelle** steht eine kurze Übersicht über die emittierte radioaktive Strahlung.

- α -Strahlung wird bei diskreten Energien emittiert; es sind nur die intensivsten Linien angegeben. Wenn nur schwache Linien vorliegen wird die Summe aller Intensitäten angegeben. In diesen Fällen ist α -Spektrometrie zur Bestimmung des Nuklids nicht geeignet.
- β -Strahlung (β^- und β^+) zeigt ein kontinuierlich verlaufendes Spektrum ohne Linien. Es wird jeweils der Anteil des Spektrums mit Energien >10 keV angegeben. Nur dieser Anteil wird für die Abschätzung der erreichbaren Nachweisgrenzen berücksichtigt (obwohl, wie oben erwähnt, der Diskriminator zur Unterdrückung des Photomultiplier-Rauschens und der Lumineszenz bei 2 - 3 keV gesetzt wird; für die meisten Nuklide liegt aber der Anteil >10 keV ohnehin bei 80 bis 95 %, so daß durch Hinzunahme des Bereichs zwischen 3 und 10 keV keine wesentliche Erhöhung der Nachweiswahrscheinlichkeit und somit keine Verbesserung der Nachweisgrenzen eintritt.)
- Atomelektronen (e^-) umfassen Auger- und Konversionselektronen. Hier werden nur in wenigen Fällen die einzelnen Linien angegeben. In den allermeisten Fällen handelt es sich um energiearme Elektronen, deren Linien zu Gruppen in bestimmten Energiebereichen zusammengefaßt sind und für jede Gruppe ist die Summe der Häufigkeiten angegeben.
- γ -Strahlung. Hier werden eine bis drei der intensivsten Linien und ihre Häufigkeiten angegeben. Wenn intensive γ -Linien über 100 keV vorhanden sind,

dann sind die Niederenergie-Photonen und die Atomelektronen oft nicht aufgeführt, weil dann die γ -Spektrometrie immer die optimale Meßmethode ist.

- LEP-Strahlung. Die niederenergetischen Photonen (K-Röntgenlinien bei Elementen mit niedriger und L-Röntgenlinien bei Elementen mit hoher Ordnungszahl, in einigen Fällen auch γ -Linien mit niedriger Energie), sind meistens zu Gruppen zusammengefaßt und für jede Gruppe ist die Summe der Häufigkeiten angegeben.
- Häufigkeit ist die Anzahl der emittierten Teilchen pro 100 Zerfälle.
- Die minimal meßbare Emissionsrate wurde nach den im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Kriterien geschätzt.

5. Unter **Bestimmungsmethoden** ist die Anwendbarkeit der einzelnen Methoden diskutiert und, wo möglich und sinnvoll, die erreichbare Nachweisgrenze (NWG) berechnet. Sie wird einmal in Aktivitätseinheiten [NWG(Bq)] und einmal in Gewichtseinheiten [NWG(g)] angegeben und aus den in der Tabelle angegebenen minimal meßbaren Emissionsraten (mmE) und den Emissionshäufigkeiten (H) berechnet:

$$NWG(Bq) = \frac{mmE}{100 \times H}$$

$$NWG(g) = \frac{NWG(Bq) \times M}{N_L} \times \frac{t_{1/2}}{\ln 2}$$

(NWG = Nachweisgrenze, N_L = Loschmidtsche Zahl, 6.023×10^{23} , $t_{1/2}$ = Halbwertszeit, M = Atomgewicht.)

Mit R_{NWG} ist das Verhältnis der erreichbaren zur geforderten NWG bezeichnet:

$$R_{NWG} = \frac{NWG_{\text{erreichbar}}}{NWG_{\text{gefordert}}}$$

Wenn $R_{NWG} \leq 1$ ist, dann ist die Meßmethode geeignet; wenn $R_{NWG} \gg 1$ ist, dann lassen sich damit voraussichtlich keine geeigneten Analysenverfahren für das betreffende Radionuklid entwickeln.

α -Messung. Sie wird nur erwähnt und erreichbare Nachweisgrenzen werden nur berechnet, wenn das Nuklid ein α -Strahler ist.

β -Messung. Als Meßmethode wurde nur die LSC berücksichtigt und für die Berechnung der erreichbaren Nachweisgrenzen wurde das β -Spektrum zugrundegelegt. Wenn das Radionuklid zusätzlich Atomelektronen emittiert, dann tragen diese fast nichts zur Zählrate und somit auch nichts zur Verbesserung der Nachweisgrenze bei. Wenn nur Atomelektronen emittiert werden, dann wurden sie gelegentlich zur Abschätzung der erreichbaren Nachweisgrenzen herangezogen. Das ist dann besonders erwähnt. Zusätzlich wird für die Messung der Atomelektronen die Elektronenspektrometrie in Betracht gezogen. Nach aller Voraussicht ist aber die LSC auch für die Atomelektronen das bessere Verfahren und sollte eine 10 bis 20fach bessere Nachweisgrenze bringen.

Elektronenmessung. Sie wurde in die Überlegungen einbezogen, wenn das Nuklid Atomelektronen emittiert. Bis auf wenige Ausnahmen haben Konversions-elektronen mit Energien >80 keV nur geringe Intensitäten und bieten daher keine gute Möglichkeit zur quantitativen Bestimmung des Nuklids. Energie-arme Atomelektronen im Bereich von 5 bis 20 keV werden hingegen oft in hohen Intensitäten emittiert, aber es ist bisher nicht klar ob diese niederenergetischen Elektronen mit einem einfachen Halbleiterdetektor-Spektrometer gut gemessen werden können. Es wurden erreichbare Nachweisgrenzen abgeschätzt, aber wahrscheinlich ist die LSC-Messung die bessere Methode.

γ -Messung. Wird nur aufgeführt, wenn γ -Linien mit $E > 50$ keV und genügend hoher Intensität emittiert werden. Da die Methode dann ohne Probenvorbereitung - weder Aufschluß noch Trennung - ausgeführt werden kann, ist sie in diesen Fällen auch meistens die Methode der Wahl und die geforderten Nachweisgrenzen werden fast immer erreicht.

LEP-Messung. Die Emission von Röntgenstrahlen ist bei den meisten Nukliden eine Begleiterscheinung des radioaktiven Zerfalls und deshalb wird diese Meßmethode hier oft erwähnt. Leider ist sie zur Identifizierung von Radionukliden nur sehr beschränkt geeignet, denn fast alle Radionuklide, deren Zerfallsprodukte dem gleichen Element angehören, emittieren das gleiche Röntgenspektrum. Nach einer radiochemischen Trennung und notfalls unter Zuhilfenahme weiterer Kriterien kann man aber häufig eine Identifizierung und Bestimmung der Nuklide ausführen. In einigen Fällen sind in den LEP-Spektren auch niederenergetische γ -Linien zu sehen; allerdings sind die bei ungetrennten Proben meistens von Röntgenlinien anderer Radionuklide überlagert, so daß sie schwer auszuwerten sind. Auch in diesen Fällen ist also eine Abtrennung des gesuchten Nuklids erforderlich. Die Abschätzung für die erreichbare Nachweisgrenze bezieht sich auf abgetrennte Nuklide und die jeweils intensivste Liniengruppe.

ICP-MS. Für diese Methode wurde in fast jedem Fall die erreichbare Nachweisgrenze berechnet, auch wenn sie bei kurzlebigen Nukliden weit über der geforderten Nachweisgrenze liegt.

NAA. Die Methode ist nur bei wenigen Nukliden anwendbar. Soweit sie in der ZCH schon einmal bestimmt wurden, können die erreichbaren Nachweisgrenzen abgeschätzt werden und sind angegeben.

6. In der **Zusammenfassung** sind die vermutlich optimalen Meßmethoden erwähnt und besondere Schwierigkeiten bei der Bestimmung aufgeführt. Bei manchen Nukliden ist es nicht gleich offensichtlich, weshalb sie von den Verfassern von Ref.^[4] in den Katalog der relevanten Radionuklide aufgenommen worden sind. Auch hierzu wurden gelegentlich Überlegungen angestellt und in die Bemerkungen aufgenommen.

A.2 Angaben zu den einzelnen Nukliden

^3H 12.3 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 2.790E-15 g

1 g $\Leftrightarrow$ 3.585E+14 Bq

geforderte NWG: 9.10E+06 Bq $\Leftrightarrow$ 2.54E-08 g aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	15 %	0.02 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Einfache radiochemische Abtrennung möglich. LSC-Messung sehr empfindlich und ausreichend.

erreichbare NWG: 0.13 Bq $\Leftrightarrow$ 3.72E-16 g, R_{NWG} 1.47E-08

Bei Routinemessungen in der ZCH werden bei Meßzeiten von etwa 30 min NWG von 0.05 Bq und niedriger erreicht.

ICP-MS: Denkbar, aber nicht sinnvoll.

erreichbare NWG: 1.08E+06 Bq $\Leftrightarrow$ 3.00E-09 g, R_{NWG} 0.12

Zusammenfassung: ^3H ist am besten über LSC-Messung zu bestimmen.

^{10}Be 1.6E06 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.210E-09 g

1 g $\Leftrightarrow$ 8.267E+08 Bq

geforderte NWG: 13000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.57E-05 g aus Tabelle 5

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	99 %	0.02 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung Messung mit einem β -Zähler, z.B. LSC.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 2.44E-11 g, R_{NWG} 1.55E-06

ICP-MS: Wahrscheinlich möglich.

erreichbare NWG: 8.27 Bq $\Leftrightarrow$ 1.00E-08 g, R_{NWG} 6.36E-04

NAA: Nicht geeignet.

Zusammenfassung: β -Messung nach radiochemischer Abtrennung (Verfahren sind für Anwendungen in der Umwelt-Radioanalytik und der Kosmochemie ausgearbeitet worden) und ICP-MS sind vermutlich geeignet und sollten beide ausprobiert werden.

^{14}C 5730 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 6.065E-12 g

1 g $\Leftrightarrow$ 1.649E+11 Bq

geforderte NWG: 72000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 4.37E-07 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	90 %	0.02 Ips

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 1.35E-13 g, R_{NWG} 3.09E-07

ICP-MS: Wahrscheinlich möglich, aber wohl nicht sinnvoll.

erreichbare NWG: 2308. Bq $\Leftrightarrow$ 1.40E-08 g, R_{NWG} 0.0321

Zusammenfassung: Die Abtrennung von ^{14}C und Messung mit LSC ist eine sehr häufig angewendete und hier wahrscheinlich die günstigste Methode.

^{22}Na 2.6 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 4.324E-15 g

1 g $\Leftrightarrow$ 2.312E+14 Bq

geforderte NWG: 160.0 Bq $\Leftrightarrow$ 6.92E-13 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^+	>10 keV	99 %	0.02 lps
γ	511 keV	200 %	2 lps
	1275 keV	100 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Möglich, aber nicht erforderlich und sinnvoll.

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 2.00 Bq $\Leftrightarrow$ 8.65E-15 g, R_{NWG} 0.0125

ICP-MS: Nicht empfindlich genug

erreichbare NWG: 5.09E+06 Bq $\Leftrightarrow$ 2.20E-08 g, R_{NWG} 3.18E+04

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{35}S 87.5 d

1 Bq $\Leftrightarrow$ 6.339E-16 g

1 g $\Leftrightarrow$ 1.578E+15 Bq

geforderte NWG: 17000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.08E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	87 %	0.02 Ips

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 1.46E-17 g, R_{NWG} 1.35E-06

ICP-MS: Nicht empfindlich genug

erreichbare NWG: 5.52E+07 Bq $\Leftrightarrow$ 3.50E-08 g, R_{NWG} 3248.

Zusammenfassung: Die Abtrennung von ^{35}S und Messung mit LSC ist ähnlich der von ^{14}C und auch hier wahrscheinlich die günstigste Methode.

^{36}Cl 301000 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 8.192E-10 g

1 g $\Leftrightarrow$ 1.221E+09 Bq

geforderte NWG: 420.0 Bq $\Leftrightarrow$ 3.44E-07 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	98 %	0.02 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 1.67E-11 g, R_{NWG} 4.86E-05

ICP-MS: Wahrscheinlich gut möglich.

erreichbare NWG: 44. Bq $\Leftrightarrow$ 3.60E-08 g, R_{NWG} 0.10

Zusammenfassung: Die Abtrennung von ^{35}Cl und Messung mit LSC ist ähnlich der von ^{14}C und auch hier wahrscheinlich die günstigste Methode. ICP-MS sollte auch ausprobiert werden. Stört ^{36}S ?

^{39}Ar 269 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 7.931E-13 g

1 g $\Leftrightarrow$ 1.261E+12 Bq

geforderte NWG: 27000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.14E-08 g aus Tabelle 5

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	98 %	0.02 lps

Bestimmungsmethoden

Argon dürfte in den Abfallbehältern im wesentlichen im Gasraum und in Gasblasen, die im festen Material eingeschlossen sind, enthalten sein. Eine für ^{39}Ar repräsentative Probe erhält man wahrscheinlich nur, wenn man

- eine Probe aus dem Gasraum des Behälters nimmt und
- das beim Auflösen einer festen Probe freiwerdende Gas sammelt.

Wenn man eine brauchbare Gasprobe hat, kann Argon daraus abgetrennt werden.

β -Messung: Die abgetrennte Argon-Fraktion läßt sich in einem Gaszählrohr messen.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 1.62E-14 g, R_{NWG} 7.56E-07

ICP-MS: Wahrscheinlich nicht geeignet.

Zusammenfassung: Die Messung von ^{39}Ar wird einige Vorarbeit, besonders hinsichtlich der Probenahme, erfordern.

^{41}Ca 103000 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 3.193E-10 g

1 g $\Leftrightarrow$ 3.132E+09 Bq

geforderte NWG: 1100.0 Bq $\Leftrightarrow$ 3.51E-07 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^+		<0.006 %	
Röntgen	4 keV	12 %	1 lps

Bestimmungsmethoden

LEP-Messung:

^{41}Ca kann nur über die sehr energiearmen Röntgenphotonen gemessen werden. Die Abtrennung und die Herstellung geeigneter Meßpräparate ist bei uns noch nicht entwickelt worden. Es ist fraglich, ob unser LEP-Detektor hierfür geeignet ist, weil er erst ab etwa 5 keV anspricht. Vielleicht kann man die Messung mit LSC ausführen, weil die energiearmen Röntgenphotonen im flüssigen Szintillator weitgehend absorbiert werden. Die angegebene NWG bezieht sich auf die LSC-Messung, wobei die minimal nachweisbare Emissionsrate nur grob geschätzt ist, weil dafür noch keinerlei Erfahrungen vorliegen.

erreichbare NWG: 8.33 Bq $\Leftrightarrow$ 2.66E-09 g, R_{NWG} 0.0076

ICP-MS: Ist wahrscheinlich die am besten geeignete Methode, wenn man von ^{41}K und von isobaren Molekülonen trennen kann.

erreichbare NWG: 128. Bq $\Leftrightarrow$ 4.10E-08 g, R_{NWG} 0.12

Zusammenfassung: Wenn das Nuklid wirklich gemessen werden muß, wäre ICP-MS die am ehesten geeignete Methode. Die Messung mit LSC sollte ausprobiert werden.

^{45}Ca 164 d

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.528E-15 g

1 g $\Leftrightarrow$ 6.546E+14 Bq

geforderte NWG: 7600.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.16E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	92 %	0.02 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 3.32E-17 g, R_{NWG} 2.86E-06

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 2.95E+07 Bq $\Leftrightarrow$ 4.50E-08 g, R_{NWG} 3876.

Zusammenfassung: Die Abtrennung von ^{45}Ca und Messung mit LSC oder einem anderen β -Zähler ist wohl die einzige Methode. Das langlebige ^{41}Ca stört vermutlich nicht oder seine energiearme Strahlung kann diskriminiert werden.

^{46}Sc 84 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 7.998\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.250\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 9100.0 Bq $\Leftrightarrow$ 7.28E-12 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	95 %	0.02 lps
γ	889 keV	100 %	2 lps
	1121 keV	100 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Möglich, aber nicht erforderlich und sinnvoll.

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

$$\text{erreichbare NWG: } 2.00 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.60\text{E-}15 \text{ g,} \quad R_{\text{NWG}} \quad 2.20\text{E-}04$$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug

$$\text{erreichbare NWG: } 5.75\text{E+}07 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.60\text{E-}08 \text{ g,} \quad R_{\text{NWG}} \quad 6320.$$

Zusammenfassung: Einfache Messung durch γ -Spektrometrie.

⁴⁹V 330 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.347\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 2.988\text{E+}14 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 4.90E+06 Bq $\Leftrightarrow$ 1.64E-08 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β		<0.02 %	
e^-	10 keV	8 %	2 lps
Röntgen	<5 keV	20 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: ⁴⁹V zerfällt nur über Elektroneneinfang. An Teilchenstrahlung werden nur Auger-Elektronen emittiert. Nach radiochemischer Abtrennung von Vanadium könnten sie mit einem LSC gemessen werden; die Messung per Elektronenspektrometrie ist weniger empfindlich, aber stellt nicht so hohe Ansprüche an die Reinheit des abgetrennten Präparats. Die erreichbare NWG bezieht sich auf die Elektronenspektrometrie.

erreichbare NWG: 25. Bq $\Leftrightarrow$ 8.37E-14 g, R_{NWG} 5.10E-06

LEP-Messung: An Photonen wird nur Ti-Röntgenstrahlung emittiert. Deren Messung ist mit einem LEP-Detektor vielleicht möglich, setzt aber auch eine radiochemische Abtrennung voraus.

erreichbare NWG: 10. Bq $\Leftrightarrow$ 3.35E-14 g, R_{NWG} 2.04E-06

ICP-MS: Vielleicht möglich.

erreichbare NWG: 1.46E+07 Bq $\Leftrightarrow$ 4.90E-08 g, R_{NWG} 2.99

NAA: Nicht geeignet, weil das (n, γ)-Produkt stabil ist.

Zusammenfassung: ⁴⁹V ist eins der nur schwierig zu bestimmenden Nuklide und geeignete Meßverfahren müssen, zumindest in der ZCH, erst entwickelt werden. Auf alle Fälle ist eine sehr effektive radiochemische Abtrennung erforderlich, an die sich am besten eine LSC-Messung, eventuell auch Elektronenspektrometrie oder eine LEP-Messung anschließen kann. ICP-MS muß ausprobiert werden.

^{51}Cr 27.7 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.924\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 3.420\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $8.50\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.49\text{E-}10 \text{ g}$ aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	$\Sigma < 0.05\%$	
e^-	4 - 5 keV	67 %	10 lps
γ	320 keV	9.8 %	2 lps
Röntgen	5 keV	22 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: Die Auger-Elektronen können mit LSC oder mit Elektronenspektrometrie gemessen werden. Ist aber nicht sinnvoll.

erreichbare NWG: $15. \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.36\text{E-}15 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 1.76\text{E-}05$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: $20. \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.97\text{E-}15 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 2.40\text{E-}05$

LEP-Messung: Vielleicht möglich, aber nicht sinnvoll

erreichbare NWG: $9.09 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.66\text{E-}15 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 1.07\text{E-}05$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug

erreichbare NWG: $1.74\text{E+}08 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.10\text{E-}08 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 205.$

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{54}Mn 312 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.487\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 2.868\text{E+}14 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 6000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.09E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^+	>10 keV	0.01 %	2 lps
e^-	5 keV	64 %	10 lps
γ	835 keV	100 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: Die Messung der Auger-Elektronen ist nach radiochemischer Trennung mit LSC oder mit Elektronenspektrometrie möglich. Das sind hier aber nicht die optimalen Verfahren.

erreichbare NWG: 16. Bq $\Leftrightarrow$ 5.45E-14 g, R_{NWG} 0.0026

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 2.00 Bq $\Leftrightarrow$ 6.97E-15 g, R_{NWG} 3.33E-04

ICP-MS: Nicht empfindlich genug

erreichbare NWG: 1.55E+07 Bq $\Leftrightarrow$ 5.40E-08 g, R_{NWG} 2581.

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{55}Fe 2.73 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.135E-14 g

1 g $\Leftrightarrow$ 8.809E+13 Bq

geforderte NWG: 1.00E+06 Bq $\Leftrightarrow$ 1.14E-08 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β		<0.03 %	
e^-	5 - 6 keV	61 %	0.1 lps
Röntgen	6 keV	27 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

^{55}Fe ist nicht in der Liste der für den Ringversuch vorgesehenen Nuklide genannt. Da bei der Untersuchung kerntechnischer Abfälle oft auch die Bestimmung dieses Nuklids verlangt wird, ist es hier bei den Nukliden, für die vordringlich Analysenverfahren ausgearbeitet werden müssen, mit aufgenommen worden.

Elektronenmessung: ^{55}Fe zerfällt nur über Elektroneneinfang. An Teilchenstrahlung werden nur Auger-Elektronen emittiert. Nach radiochemischer Abtrennung von Eisen könnten sie mit einem LSC gemessen werden; die Messung per Elektronenspektrometrie ist weniger empfindlich, aber stellt nicht so hohe Ansprüche an die Reinheit des abgetrennten Präparats wie die LSC-Messung. Die erreichbare NWG bezieht sich auf die LSC.

erreichbare NWG: 0.16 Bq $\Leftrightarrow$ 1.86E-15 g, R_{NWG} 1.64E-07

LEP-Messung: Es werden nur Mn-Röntgenstrahlen emittiert. Deren Messung ist mit einem LEP-Detektor möglich, setzt aber auch eine radiochemische Abtrennung voraus.

erreichbare NWG: 7.41 Bq $\Leftrightarrow$ 8.41E-14 g, R_{NWG} 7.41E-06

ICP-MS: Wahrscheinlich nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 4.85E+06 Bq $\Leftrightarrow$ 5.50E-08 g, R_{NWG} 4.85

NAA: Nicht geeignet, weil das (n, γ)-Produkt stabil ist.

Zusammenfassung: ^{55}Fe ist eins der schwierig zu bestimmenden Nuklide und geeignete Meßverfahren müssen, zumindest in der ZCH, erst entwickelt werden. Auf alle Fälle ist eine sehr effektive radiochemische Abtrennung erforderlich, an die sich am besten eine LSC-Messung, eventuell auch Elektronenspektrometrie oder eine LEP-Messung anschließen kann.

⁵⁹Fe 45 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.496\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.820\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 29400.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.62E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	94 %	0.02 lps
γ	1099 keV	57 %	2 lps
	1292 keV	43 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Mit radiochemischer Trennung ist das die empfindlichste Methode. Sie ist hier aber nicht erforderlich

$$\text{erreichbare NWG: } 0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.17\text{E-}17 \text{ g,} \quad R_{\text{NWG}} \quad 7.24\text{E-}07$$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

$$\text{erreichbare NWG: } 3.51 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.93\text{E-}15 \text{ g,} \quad R_{\text{NWG}} \quad 1.19\text{E-}04$$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug

$$\text{erreichbare NWG: } 1.07\text{E+}08 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.90\text{E-}08 \text{ g,} \quad R_{\text{NWG}} \quad 3652.$$

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{57}Co 272 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.209\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 3.116\text{E+}14 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 49000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.57E-10 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^+	>10 keV	$\approx$ 0.025 %	
e^-	6 - 7 keV	168 %	0.1 lps
γ	122 keV	86 %	2 lps
	136 keV	11 %	2 lps
Röntgen + γ	6 - 15 keV	64 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: Die Augerelektronen lassen sich nach radiochemischer Abtrennung von Kobalt mit LSC oder mit Elektronenspektrometrie messen. Die NWG bezieht sich auf die LSC, Die Methoden sind hier nicht erforderlich.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.06 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.91\text{E-}16 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 1.21\text{E-}06$$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

$$\text{erreichbare NWG: } 2.33 \text{ Bq} \Leftrightarrow 7.46\text{E-}15 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 4.75\text{E-}05$$

LEP-Messung: Möglich, aber hier nicht die optimale Methode.

$$\text{erreichbare NWG: } 3.13 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.00\text{E-}14 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 6.38\text{E-}05$$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug

$$\text{erreichbare NWG: } 1.78\text{E+}07 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.70\text{E-}08 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 362.$$

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie. Bei großen Proben muß die Selbstabsorption der nicht sehr energiereichen γ -Strahlen berücksichtigt werden.

⁵⁸Co 71 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.524\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.173\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 22000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.88E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
e^-	6 keV	46 %	0.1 Ips
γ	811 keV	99.5 %	2 Ips
Röntgen	6 - 7 keV	26 %	2 Ips

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: Die Augerelektronen lassen sich nach radiochemischer Abtrennung von Kobalt mit LSC oder mit Elektronenspektrometrie messen. Die Unterscheidung von ⁵⁷Co ist damit kaum möglich. Die NWG bezieht sich auf die LSC. LSC und Elektronenspektrometrie sind hier nicht die optimalen Methoden.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.22 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.85\text{E-}16 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 9.88\text{E-}06$$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

$$\text{erreichbare NWG: } 2.01 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.71\text{E-}15 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 9.14\text{E-}05$$

LEP-Messung: Möglich, aber hier nicht die optimale Methode.

$$\text{erreichbare NWG: } 7.69 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.56\text{E-}15 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 3.50\text{E-}04$$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug

$$\text{erreichbare NWG: } 6.80\text{E+}07 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.80\text{E-}08 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 3093.$$

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{60}Co 5.27 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 2.390E-14 g

1 g $\Leftrightarrow$ 4.183E+13 Bq

geforderte NWG: 350.0 Bq $\Leftrightarrow$ 8.37E-12 g

aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	93 %	0.02 lps
γ	1173 keV	100 %	2 lps
	1333 keV	100 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Mit radiochemischer Trennung ist das die empfindlichste Methode. Sie ist hier aber nicht erforderlich

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 5.14E-16 g,

R_{NWG} 6.14E-05

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 2.00 Bq $\Leftrightarrow$ 4.78E-14 g,

R_{NWG} 0.0057

ICP-MS: Nicht empfindlich genug

erreichbare NWG: 2.51E+06 Bq $\Leftrightarrow$ 6.00E-08 g,

R_{NWG} 7171.

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

⁵⁹Ni 75000 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 3.345E-10 g

1 g $\Leftrightarrow$ 2.989E+09 Bq

geforderte NWG: 53000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.77E-05 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
e^-	6 - 7 keV	55 %	2 Ips
Röntgen	7 keV	33 %	2 Ips

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: ⁵⁹Ni zerfällt nur über Elektroneneinfang. An Teilchenstrahlung werden nur die Auger-Elektronen emittiert. Nach radiochemischer Abtrennung von Nickel könnten sie mit einem LSC gemessen werden; die Messung per Elektronenspektrometrie ist weniger empfindlich, stellt aber nicht so hohe Ansprüche an die Reinheit des abgetrennten Präparats. Die erreichbare NWG bezieht sich auf Elektronenspektrometrie.

erreichbare NWG: 3.64 Bq $\Leftrightarrow$ 1.22E-09 g, R_{NWG} 6.86E-05

LEP-Messung: Es werden nur Co-Röntgenstrahlen emittiert. Deren Messung ist mit einem LEP-Detektor möglich, setzt aber auch eine radiochemische Abtrennung voraus.

erreichbare NWG: 6.06 Bq $\Leftrightarrow$ 2.03E-09 g, R_{NWG} 1.14E-04

ICP-MS: Wahrscheinlich gut möglich.

erreichbare NWG: 176. Bq $\Leftrightarrow$ 5.90E-08 g, R_{NWG} 0.0033

NAA: Nicht geeignet, weil das (n, γ)-Produkt stabil ist.

Zusammenfassung: ⁵⁹Ni ist eins der radiochemisch schwierig zu bestimmenden Nuklide und geeignete Meßverfahren müssen, zumindest in der ZCH, erst entwickelt werden. Auf alle Fälle ist eine sehr effektives Trennverfahren erforderlich, an das sich am besten eine LSC-Messung, eventuell auch Elektronenspektrometrie oder eine LEP-Messung anschließen kann. Es muß untersucht werden, wie gut bei der LSC- oder bei der LEP-Messung die ⁵⁹Ni-Augerelektronen von der β -Strahlung des ⁶³Ni getrennt werden kann.

^{63}Ni 100 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 4.763E-13 g

1 g $\Leftrightarrow$ 2.100E+12 Bq

geforderte NWG: 49000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.33E-08 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	63 %	0.02 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden.

erreichbare NWG: 0.03 Bq $\Leftrightarrow$ 1.51E-14 g, R_{NWG} 6.48E-07

ICP-MS: Die erreichbare NWG könnte ausreichen.

erreichbare NWG: 1.32E+05 Bq $\Leftrightarrow$ 6.30E-08 g, R_{NWG} 2.70

Zusammenfassung: Die Abtrennung von ^{63}Ni und Messung mit LSC oder einem anderen β -Zähler ist sicher die günstigste, wenn auch etwas aufwendige Methode. Zur Korrektur der Störung durch ^{59}Ni muß noch ein Verfahren entwickelt werden.

^{65}Zn 244 d

1 Bq $\Leftrightarrow$ 3.283E-15 g

1 g $\Leftrightarrow$ 3.046E+14 Bq

geforderte NWG: 1600.0 Bq $\Leftrightarrow$ 5.25E-12 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
e^-	7 - 8 keV	49 %	0.02 lps
γ	1116 keV	51 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: Es werden nur energiearme Auger-Elektronen emittiert. Die Messung ist aufwendig und in diesem Fall nicht das optimale Verfahren.

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 3.92 Bq $\Leftrightarrow$ 1.29E-14 g, R_{NWG} 0.0025

ICP-MS: Nicht empfindlich genug

erreichbare NWG: 1.98E+07 Bq $\Leftrightarrow$ 6.50E-08 g, R_{NWG} 1.24E+04

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{79}Se 65000 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 3.882E-10 g

1 g $\Leftrightarrow$ 2.576E+09 Bq

geforderte NWG: 49.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.90E-08 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	90 %	0.02 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 8.63E-12 g, R_{NWG} 4.54E-04

ICP-MS: Vielleicht kann nach Entwicklungsarbeiten zur Optimierung die geforderte NWG erreicht werden.

erreichbare NWG: 203. Bq $\Leftrightarrow$ 7.90E-08 g, R_{NWG} 4.15

Zusammenfassung: Die Abtrennung von Selen und Messung mit LSC oder einem anderen β -Zähler ist sicher die günstigste, wenn auch etwas aufwendige Methode. ICP-MS sollte ausprobiert werden.

^{85}Kr 10.7 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 6.876E-14 g

1 g $\Leftrightarrow$ 1.454E+13 Bq

geforderte NWG: 2.20E+05 Bq $\Leftrightarrow$ 1.51E-08 g aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	98 %	0.02 lps
γ	514 keV	0.434 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Krypton dürfte in den Abfallbehältern im wesentlichen im Gasraum und in Gasblasen, die im festen Material eingeschlossen sind, enthalten sein. Eine für ^{85}Kr repräsentative Probe erhält man wahrscheinlich nur, wenn man

- eine Probe aus dem Gasraum des Behälters nimmt und
- das beim Auflösen einer festen Probe freiwerdende Gas sammelt.

Wenn man eine brauchbare Gasprobe hat, kann Krypton daraus abgetrennt werden, z.B. - nach Absorption von (^{14}C -haltigem) CO_2 - durch Ausfrieren.

β -Messung: Die abgetrennte Krypton-Fraktion läßt sich in einem Gas-Proportional-Zählrohr messen; die Störung durch ^{39}Ar und andere radioaktive Edelgas-Isotope muß noch untersucht werden.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 1.40E-15 g, R_{NWG} 9.28E-08

γ -Messung: Bei der Messung von Umweltproben, die allerdings nur sehr geringe Aktivitäten von anderen Radionukliden enthielten, wurden in der ZCH Nachweisgrenzen von <20 Bq $\Leftrightarrow$ 1.4E-12 g erreicht. Das würde hier zwar ausreichen, kann aber in Gegenwart anderer Radionuklide nicht garantiert werden. Es ist aber möglich, daß ^{85}Kr , wenn es in der angegebenen Menge vorhanden ist, bei der instrumentellen γ -spektrometrischen Messung gefunden wird.

erreichbare NWG: 461. Bq $\Leftrightarrow$ 3.17E-11 g, R_{NWG} 0.0021

ICP-MS: Wahrscheinlich nicht empfindlich genug; dieselben Trennprobleme wie für die β -Messung.

erreichbare NWG: 1.24E+06 Bq $\Leftrightarrow$ 8.50E-08 g, R_{NWG} 5.62

Zusammenfassung: Nach Abtrennung der Edelgase und Abklingen von Radon ist die Messung mit einem β -Zähler, am besten einem Gas-Proportionalzählrohr, wahrscheinlich die am besten geeignete Methode. Es ist nicht ausgeschlossen, daß ^{85}Kr auch bei der instrumentellen γ -Spektrometrie gefunden wird.

^{87}Rb 4.8E10 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 3.157E-04 g

1 g $\Leftrightarrow$ 3167 Bq

geforderte NWG: 240.0 Bq $\Leftrightarrow$ 7.58E-02 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	92 %	0.02 lps

Bestimmungsmethoden

Dieses natürliche Radionuklid wird auch bei der Kernspaltung gebildet und könnte deshalb von Interesse sein.

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 6.86E-06 g, R_{NWG} 9.06E-05

ICP-MS: Sicher gut geeignet.

erreichbare NWG: 2.76E-4 Bq $\Leftrightarrow$ 8.70E-08 g, R_{NWG} 1.15E-06

NAA: Wahrscheinlich auch geeignet.

erreichbare NWG: 3.2E-4 Bq $\Leftrightarrow$ 1.0E-07 g R_{NWG} 1.3E-06

Zusammenfassung: Die Abtrennung von Rubidium und Messung mit LSC ist eine mögliche, wenn auch etwas aufwendige Methode. ICP-MS ist vielleicht einfacher, wenn ^{87}Sr nicht stört.

^{89}Sr 51 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 9.395\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.064\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 27000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.54E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	99 %	0.02 lps
γ	909 keV	0.009 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.90\text{E-}17 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 7.48\text{E-}07$$

γ -Messung:

Nicht geeignet.

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 9.47\text{E+}07 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.90\text{E-}08 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 3508.$$

Zusammenfassung: Die Abtrennung von ^{89}Sr und Messung mit LSC oder einem anderen β -Zähler ist sicher die günstigste, wenn auch etwas aufwendige Methode. Entsprechende Messungen wurden in der ZCH früher häufig ausgeführt. Die Störung durch ^{90}Sr muß berücksichtigt werden.

^{90}Sr 28.5 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.939E-13 g

1 g $\Leftrightarrow$ 5.157E+12 Bq

geforderte NWG: 60.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.16E-11 g

aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	99 %	0.02 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 3.92E-15 g,

R_{NWG} 3.37E-04

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 4.64E+05 Bq $\Leftrightarrow$ 9.00E-08 g,

R_{NWG} 7735.

Zusammenfassung: Die Abtrennung von ^{90}Sr und Messung mit LSC oder die Abtrennung des Tochternuklids ^{90}Y und Messung der Tscherenkow-Strahlung sind geeignete Verfahren. Sie wurden in der ZCH früher häufig ausgeführt. Die Störung durch ^{89}Sr muß berücksichtigt werden.

^{93}Zr 1.53E06 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.076E-08 g

1 g $\Leftrightarrow$ 9.296E+07 Bq

geforderte NWG: 17000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.83E-04 g

aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	70 %	0.02 lps
e^-	11 keV	14 %	2 lps
	28 - 30 keV	86 %	2 lps
Röntgen	17 keV	10 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung von Zirkonium können die β -Strahlung und die Konversionselektronen gemeinsam im LSC gemessen werden.

erreichbare NWG: 0.03 Bq $\Leftrightarrow$ 3.07E-10 g, R_{NWG} 1.68E-06

Elektronenmessung: Die Messung der Konversionselektronen ist selektiver, aber nicht so empfindlich.

erreichbare NWG: 2.33 Bq $\Leftrightarrow$ 2.50E-08 g, R_{NWG} 1.37E-04

LEP-Messung: Nach radiochemischer Abtrennung können die Nb-K-Röntgenstrahlen mit einem LEP-Detektor gemessen werden.

erreichbare NWG: 20. Bq $\Leftrightarrow$ 2.15E-07 g, R_{NWG} 0.0012

ICP-MS: Wahrscheinlich gut geeignet, wenn ^{93}Nb nicht stört.

erreichbare NWG: 8.65 Bq $\Leftrightarrow$ 9.30E-08 g, R_{NWG} 5.09E-04

NAA: Nicht geeignet weil das (n, γ)-Produkt stabil ist.

Zusammenfassung: Radiochemische Trennverfahren sind sowohl für die β - als auch für die γ -Messung erforderlich. Die geforderte NWG ist relativ hoch und kann mit ICP-MS vielleicht auch ohne chemische Trennung, aber nach Aufschluß der Probe, erreicht werden. Die Störung durch ^{93}Nb , ^{93m}Nb und ^{93}Mo muß untersucht werden.

^{95}Zr 64 d

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.258E-15 g

1 g $\Leftrightarrow$ 7.946E+14 Bq

geforderte NWG: 15000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.89E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	95 %	0.02 lps
γ	724 keV	44 %	2 lps
	757 keV	54 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Mit radiochemischer Trennung ist das die empfindlichste Methode. Sie ist hier aber nicht erforderlich

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 2.65E-17 g, R_{NWG} 1.40E-06

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 3.70 Bq $\Leftrightarrow$ 4.66E-15 g, R_{NWG} 2.47E-04

ICP-MS: Nicht empfindlich genug

erreichbare NWG: 7.55E+07 Bq $\Leftrightarrow$ 9.50E-08 g, R_{NWG} 5033.

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{93m}Nb 13.6 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 9.562\text{E-}14 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.046\text{E+}13 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 33000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 3.16E-09 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
e^-	23 - 30 keV	85 %	0.02 lps
Röntgen	16 - 19 keV	10 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: ^{93m}Nb zerfällt nur durch innere Konversion. An Teilchenstrahlung werden nur Konversionselektronen emittiert. Nach radiochemischer Abtrennung von Niob könnten sie mit einem LSC gemessen werden; die Messung per Elektronenspektrometrie ist weniger empfindlich, aber stellt nicht so hohe Ansprüche an die Reinheit des abgetrennten Präparats. Die erreichbare NWG bezieht sich auf die LSC-Messung.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.25\text{E-}15 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 7.13\text{E-}07$$

LEP-Messung: Es werden nur Nb-Röntgenstrahlen emittiert. Deren Messung ist mit einem LEP-Detektor möglich, setzt aber auch eine radiochemische Abtrennung voraus.

$$\text{erreichbare NWG: } 20. \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.91\text{E-}12 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 6.06\text{E-}04$$

ICP-MS: Könnte empfindlich genug sein, wenn das isomere Nuklid von dem im Grundzustand stabilen Nuklid getrennt werden kann.

$$\text{erreichbare NWG: } 9.73\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 9.30\text{E-}08 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 29.$$

Zusammenfassung: ^{93m}Nb läßt sich wohl am besten nach radiochemischer Abtrennung mit einer LSC-Messung der Konversionselektronen bestimmen. Auch eine LEP-Messung käme infrage. Das für beide Methoden erforderliche Trennverfahren ist wegen der chemischen Eigenschaften von Niob aber nicht einfach. Ob man mit ICP-MS ^{93m}Nb neben ^{93}Nb nachweisen kann, ist fraglich.

^{94}Nb 20300 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.443E-10 g

1 g $\Leftrightarrow$ 6.932E+09 Bq

geforderte NWG: 78.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.13E-08 g

aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	96 %	0.02 lps
γ	703 keV	100 %	2 lps
	871 keV	100 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Mit radiochemischer Trennung ist das die empfindlichste Methode. Sie ist hier aber vermutlich nicht erforderlich

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 3.01E-12 g, R_{NWG} 2.67E-04

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 2.00 Bq $\Leftrightarrow$ 2.89E-10 g, R_{NWG} 0.0256

ICP-MS: Wahrscheinlich nicht empfindlich genug; Störung durch ^{94}Zr .

erreichbare NWG: 652. Bq $\Leftrightarrow$ 9.40E-08 g, R_{NWG} 8.35

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie, aber hart an der NWG.

^{95}Nb 35 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.882\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.453\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $40000.0 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.75\text{E-}11 \text{ g}$ aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	85 %	0.02 lps
γ	766 keV	100 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Mit radiochemischer Trennung ist das die empfindlichste Methode. Sie ist hier aber vermutlich nicht erforderlich

erreichbare NWG: $0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.62\text{E-}17 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 5.88\text{E-}07$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: $2.00 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.38\text{E-}15 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 5.00\text{E-}05$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $1.38\text{E+}08 \text{ Bq} \Leftrightarrow 9.50\text{E-}08 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 3451.$

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{93}Mo 3500 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 2.461E-11 g

1 g $\Leftrightarrow$ 4.064E+10 Bq

geforderte NWG: 5300.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.30E-07 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
e^-	28 - 30 keV	82 %	2 lps
Röntgen	16 - 19 keV	73 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: ^{93}Mo zerfällt nur über Elektroneneinfang. An Teilchenstrahlung werden nur die Auger-Elektronen emittiert. Nach radiochemischer Abtrennung von Molybdän könnten sie mit einem LSC gemessen werden; die Messung per Elektronenspektrometrie ist weniger empfindlich, aber stellt nicht so hohe Ansprüche an die Reinheit des abgetrennten Präparats. Die erreichbare NWG bezieht sich auf Elektronenspektrometrie.

erreichbare NWG: 2.44 Bq $\Leftrightarrow$ 6.00E-11 g, R_{NWG} 4.60E-04

LEP-Messung: Es werden nur Nb-Röntgenstrahlen emittiert. Deren Messung ist mit einem LEP-Detektor möglich, setzt aber auch eine radiochemische Abtrennung voraus.

erreichbare NWG: 2.74 Bq $\Leftrightarrow$ 6.74E-11 g, R_{NWG} 5.17E-04

ICP-MS: Die geforderte NWG kann vielleicht nach Entwicklungsarbeiten und Optimierung erreicht werden. Nb- und Zr-Isotope mit gleicher Massenzahl können stören.

erreichbare NWG: 3779. Bq $\Leftrightarrow$ 9.30E-08 g, R_{NWG} 0.71

NAA: Nicht geeignet, weil das (n, γ)-Produkt stabil ist.

Zusammenfassung: ^{93}Mo ist eins der schwierig zu bestimmenden Nuklide und geeignete Meßverfahren müssen, zumindest in der ZCH, erst entwickelt werden. Auf alle Fälle ist eine sehr effektive radiochemische Abtrennung erforderlich, an die sich am besten eine LSC-Messung, eventuell auch Elektronenspektrometrie oder eine LEP-Messung anschließen kann. Ein Vergleich mit ICP-MS wäre sinnvoll, wenn ^{93}Mo von ^{93}Nb und $^{93\text{m}}\text{Nb}$ unterschieden werden kann.

⁹⁹Tc 213000 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.594E-09 g

1 g $\Leftrightarrow$ 6.273E+08 Bq

geforderte NWG: 3800.0 Bq $\Leftrightarrow$ 6.06E-06 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	92 %	0.02 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 3.47E-11 g, R_{NWG} 5.72E-06

ICP-MS: Könnte auch empfindlich genug sein.

erreichbare NWG: 62. Bq $\Leftrightarrow$ 9.90E-08 g, R_{NWG} 0.0163

NAA: Der Aktivierungsquerschnitt ist 20 b, die Halbwertszeit von ¹⁰⁰Tc ist 15.8 s. Die γ -Linien bei 540 und 591 keV haben Intensitäten von 7 bzw. 5.7 %. Die Bestimmung per INAA geht nur mit einer genügend schnellen Rohrpost-Bestrahlungseinrichtung. Wegen der geringen γ -Intensitäten und eventueller Störungen erscheint die Methode nicht sehr aussichtsreich, sollte aber, wenn die BE-12 am FRJ-2 wieder in Betrieb ist, einmal ausprobiert werden.

Zusammenfassung: Die Messung von ⁹⁹Tc mit LSC wird in der ZCH regelmäßig ausgeführt. Auch eine radiochemische Trennung wurde ausgearbeitet und angewendet. Ob die Abtrennung von ⁹⁹Tc und die Messung mit LSC oder ob ICP-MS die besser geeignete Methode ist, müßte untersucht werden.

^{103}Ru 39.3 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.379\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.194\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 84000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 7.04E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	89 %	0.02 lps
e^-	17 keV	11 %	2 lps
	37 - 40 keV	93 %	2 lps
γ	497 keV	89 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Mit radiochemischer Trennung ist das die empfindlichste Methode. Sie ist hier aber vermutlich nicht erforderlich

erreichbare NWG: $0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.88\text{E-}17 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 2.68\text{E-}07$

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist selektiver als LSC, aber nicht so empfindlich; sie ist hier nicht die optimale Methode.

erreichbare NWG: $2.15 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.80\text{E-}15 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 2.56\text{E-}05$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: $2.25 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.88\text{E-}15 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 2.68\text{E-}05$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $1.23\text{E+}08 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.03\text{E-}07 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 1463.$

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{106}Ru 1.02 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.174\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.223\text{E+}14 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $17000.0 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.39\text{E-}10 \text{ g}$ aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	190 %	0.02 lps
$\gamma(^{106}\text{Rh})$	622 keV	9 %	2 lps
	1050 keV	1.5 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

^{106}Ru emittiert nur relativ niederenergetische β -Strahlung. Sein Tochternuklid ^{106}Rh ($t_{1/2} = 30 \text{ s}$), emittiert aber neben der unspezifischen 511 keV-Linie auch die oben angegebenen γ -Linien und sie können zur Bestimmung von ^{106}Ru per γ -Spektrometrie herangezogen werden.

β -Messung: Die hohe β -Emissionsrate ist die Summe der Emissionen von ^{106}Ru und ^{106}Rh . Mit radiochemischer Trennung ist die β -Messung die empfindlichste Methode. Sie ist hier aber vermutlich nicht erforderlich

erreichbare NWG: $0.01 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.60\text{E-}17 \text{ g}$, $R_{\text{NWG}} \quad 6.19\text{E-}07$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode über die γ -Linien von ^{106}Rh .

erreichbare NWG: $22. \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.82\text{E-}13 \text{ g}$, $R_{\text{NWG}} \quad 0.0013$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $1.30\text{E+}07 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.06\text{E-}07 \text{ g}$, $R_{\text{NWG}} \quad 763.$

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie über ^{106}Rh .

^{107}Pd 6.5E06 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 5.258E-08 g

1 g $\Leftrightarrow$ 1.902E+07 Bq

geforderte NWG: 78000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 4.10E-03 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	40 %	0.02 Ips

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden. Eine sehr saubere Abtrennung der Edelmetalle ist aber nicht einfach.

erreichbare NWG: 0.05 Bq $\Leftrightarrow$ 2.63E-09 g, R_{NWG} 6.41E-07

ICP-MS: Wahrscheinlich gut geeignet.

erreichbare NWG: 2.03 Bq $\Leftrightarrow$ 1.07E-07 g, R_{NWG} 2.61E-05

Zusammenfassung: Die Abtrennung von ^{107}Pd und Messung mit LSC ist mit einigem Aufwand erreichbar. ICP-MS wäre wahrscheinlich erfolgversprechender; davor muß aber wahrscheinlich von Silber abgetrennt werden, weil stabiles ^{107}Ag auch als Spaltprodukt vorkommt.

^{108m}Ag 127 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.037\text{E-}12 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 9.644\text{E+}11 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 67.0 Bq $\Leftrightarrow$ 6.95E-11 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
e^-	>18 keV	25 %	2 lps
γ	434 keV	91 %	2 lps
	614 keV	90 %	2 lps
	723 keV	91 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: Wenn die Probe noch ^{110m}Ag ($t_{1/2} = 250 \text{ d}$) enthält, wird es bei der radiochemische Trennung nicht abgetrennt. Neben seiner intensiven β -Strahlung können die niederenergetischen Augerelektronen von ^{108m}Ag kaum gemessen werden. Abfallgebinde sind bei der Einlagerung aber in der Regel so alt, daß ^{110m}Ag bereits abgeklungen ist. Im übrigen ist Elektronenspektrometrie hier auch nicht erforderlich.

erreichbare NWG: 8.00 Bq $\Leftrightarrow$ 8.30E-12 g, R_{NWG} 0.12

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 2.20 Bq $\Leftrightarrow$ 2.28E-12 g, R_{NWG} 0.0328

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 1.04E+05 Bq $\Leftrightarrow$ 1.08E-07 g, R_{NWG} 1555.

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{110m}Ag 250 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.692\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.757\text{E+}14 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $1700.0 \text{ Bq} \Leftrightarrow 9.68\text{E-}12 \text{ g}$ aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	79 %	0.02 lps
e^-	91 keV	0.84 %	2 lps
	113 keV	0.41 %	2 lps
	631 keV	0.26 %	2 lps
	658 keV	95 %	2 lps
γ	885 keV	73 %	2 lps
	937 keV	34 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Wenn die Probe noch ^{108m}Ag enthalten sollte, können die niederenergetischen Augerelektronen diskriminiert werden. Die β -Messung ist aber zur Bestimmung von ^{110m}Ag nicht erforderlich.

erreichbare NWG: $0.03 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.44\text{E-}16 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 1.49\text{E-}05$

Elektronenmessung: Die schwachen Linien der Konversionselektronen lassen sich auf dem hohen β -Untergrund schlecht auswerten. Nicht empfindlich genug.

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: $5.88 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.35\text{E-}14 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 0.0035$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $1.93\text{E+}07 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.10\text{E-}07 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 1.14\text{E+}04$

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{109}Cd 1.27 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.047\text{E-}14 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 9.555\text{E+}13 \text{ Bq}$$

$$\text{geforderte NWG: } 6500.0 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.80\text{E-}11 \text{ g} \quad \text{aus Tabelle 4}$$

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
e^-	18 - 24 keV	20 %	2 lps
	63 keV	41 %	2 lps
	84 - 88 keV	56 %	2 lps
Röntgen	$\approx$ 23 keV	100 %	2 lps
γ	88 keV	3.6 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: Wenn nach der radiochemischen Abtrennung von Cadmium die Probe auch $^{113\text{m}}\text{Cd}$ enthält, können die Konversionselektronen von ^{109}Cd zur Identifizierung und Bestimmung herangezogen werden. Die Messung mit LSC ist in diesem Fall nur schlecht geeignet. Die erreichbare NWG bezieht sich auf Elektronenspektrometrie.

$$\text{erreichbare NWG: } 3.57 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.74\text{E-}14 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 5.49\text{E-}04$$

LEP-Messung: Die Messung der Röntgenstrahlung ist mit einem LEP-Detektor möglich, aber nicht selektiv, weil andere Radionuklide mit ähnlichen Ordnungszahlen ähnliche Röntgenspektren emittieren.

$$\text{erreichbare NWG: } 2.00 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.09\text{E-}14 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 3.08\text{E-}04$$

γ -Messung: Die 88 keV- γ -Linie ist im Gesamt- γ -Spektrum wahrscheinlich schlecht zu finden, weil in diesem Energiebereich auch andere Radionuklide emittieren. Eine chemische Trennung vor der Röntgen- und auch vor der γ -Messung ist sicher notwendig.

$$\text{erreichbare NWG: } 56. \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.81\text{E-}13 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.0085$$

3.08E-04 8.54E-03

ICP-MS: NWG zu hoch.

$$\text{erreichbare NWG: } 1.04\text{E+}07 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.09\text{E-}07 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 1602.$$

Zusammenfassung: Eine radiochemische Trennung ist notwendig. Danach kann das Nuklid durch LSC, durch Elektronenspektrometrie oder durch γ -Spektrometrie gemessen werden. Die Messung der 88 keV- γ -Linie ohne radiochemische Trennung kann man versuchen; sie ist aber wahrscheinlich nur in günstigen Fällen möglich. Dann muß auf jeden Fall die γ -Selbstabsorption berücksichtigt werden.

^{113m}Cd 13.7 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.170\text{E-}13 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 8.544\text{E+}12 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $51.0 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.97\text{E-}12 \text{ g}$ **aus Tabelle 3**

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	97 %	0.02 Ips
γ	264 keV	0.023 %	2 Ips

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Mit radiochemischer Trennung ist das die empfindlichste Methode. Evtl. muß die Störung durch ^{109}Cd berücksichtigt werden.

erreichbare NWG: $0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.41\text{E-}15 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 4.04\text{E-}04$

γ -Messung: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $8696. \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.02\text{E-}09 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 170.50$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $9.66\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.13\text{E-}07 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 1.89\text{E+}04$

Zusammenfassung: Die einzige brauchbare Methode ist wohl die LSC-Messung nach radiochemischer Trennung.

^{126}Sn 100000 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 9.526E-10 g

1 g $\Leftrightarrow$ 1.050E+09 Bq

geforderte NWG: 51.0 Bq $\Leftrightarrow$ 4.86E-08 g

aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
e^-	$\Sigma > 12$ keV	175 %	2 lps
Röntgen + γ	22 - 30 keV	37 %	2 lps
γ	87 keV	46 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: Nach der radiochemischen Abtrennung von Zinn kann man LSC-Messung oder Elektronenspektrometrie ausführen. Die NWG bezieht sich auf die Elektronenspektrometrie.

erreichbare NWG: 1.14 Bq $\Leftrightarrow$ 1.09E-09 g, R_{NWG} 0.0224

LEP-Messung: Die Röntgenstrahlung kann mit einem LEP-Spektrometrie gemessen werden, aber sie ist nicht unbedingt selektiv, weil andere Radionuklide mit ähnlichen Ordnungszahlen ähnliche Röntgenspektren emittieren.

erreichbare NWG: 5.41 Bq $\Leftrightarrow$ 5.15E-09 g, R_{NWG} 0.11

γ -Messung: Der γ -Doppelpick bei 87 keV kann von γ - oder Röntgenlinien anderer Radionuklide gestört sein, z.B. von ^{109}Cd . Die berechnete erreichbare NWG bezieht sich auf die Messung dieses Doppelpicks.

erreichbare NWG: 4.35 Bq $\Leftrightarrow$ 4.14E-09 g, R_{NWG} 0.0853

ICP-MS: Ist vielleicht auch geeignet.

erreichbare NWG: 132. Bq $\Leftrightarrow$ 1.26E-07 g, R_{NWG} 2.59

Zusammenfassung: Eine radiochemische Trennung wäre zu empfehlen. Danach kann das Nuklid durch LSC, durch Elektronenspektrometrie oder durch γ -Spektrometrie gemessen werden. Einfacher ist wohl die Bestimmung über das Tochternuklid ^{126}Sb .

^{125}Sb 2.7 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.552\text{E-}14 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 3.919\text{E+}13 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 2500.0 Bq $\Leftrightarrow$ 6.38E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	88 %	0.02 lps
e^-	>10 keV	48 %	2 lps
γ	428 keV	29 %	2 lps
	601 keV	18 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der emittierten Elektronen (β -Strahlung, Auger- und Konversionselektronen) nach radiochemischer Abtrennung mit LSC ist die empfindlichste Methode, hier aber sicher nicht erforderlich.

erreichbare NWG: $0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.80\text{E-}16 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 9.09\text{E-}06$

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist weniger empfindlich als LSC, vor allem weil hier noch ein β -Spektrum als Untergrund vorliegt. Zur Identifizierung und Bestimmung von ^{125}Sb ist es sicher nicht die optimale Methode.

erreichbare NWG: $4.17 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.06\text{E-}13 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.0017$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: $6.90 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.76\text{E-}13 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.0028$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $4.90\text{E+}06 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.25\text{E-}07 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 1960.$

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{126}Sb 12.4 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.234\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 3.092\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 51.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.65E-14 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	97 %	0.02 lps
γ	415 keV	84 %	2 lps
	666 keV	100 %	2 lps
	695 keV	100 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode, hier aber nicht erforderlich.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.67\text{E-}18 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 4.04\text{E-}04$$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode, aber hart an der geforderten NWG.

$$\text{erreichbare NWG: } 2.00 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.47\text{E-}16 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 0.0392$$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 3.90\text{E+}08 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.26\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 7.64\text{E+}06$$

Zusammenfassung: Das kurzlebige ^{126}Sb soll dazu dienen, das langlebige Mutternuklid ^{126}Sn zu bestimmen. Die Bestimmung ist etwas einfacher (energiereichere γ -Strahlung) und die NWG ist etwas niedriger als bei der direkten Messung des Mutternuklids. Aber auch hier ist sie noch in der Größenordnung der geforderten NWG.

^{125m}Te 58 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.501\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 6.664\text{E+}14 \text{ Bq}$$

$$\text{geforderte NWG: } 18000.0 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.70\text{E-}11 \text{ g} \quad \text{aus Tabelle 4}$$

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
e^-	4 - 5 keV	214 %	10 lps
	22 - 34 keV	29 %	2 lps
	77 keV	53 %	2 lps
	104 - 105 keV	39 %	2 lps
Röntgen + γ	27 - 35 keV	125 %	2 lps
γ	109 keV	0.28 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: ^{125m}Te zerfällt nur durch innere Konversion. An Teilchenstrahlung werden nur Konversionselektronen emittiert. Nach radiochemischer Abtrennung von Tellur könnten sie mit einem LSC gemessen werden; die Messung per Elektronenspektrometrie ist weniger empfindlich, aber stellt nicht so hohe Ansprüche an die Reinheit des abgetrennten Präparats. Die erreichbare NWG bezieht sich auf die Elektronenspektrometrie.

$$\text{erreichbare NWG: } 3.77 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.66\text{E-}15 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 2.10\text{E-}04$$

LEP-Messung: Es werden vor allem Te-Röntgenstrahlen emittiert. Deren Messung ist mit einem LEP-Detektor möglich, setzt aber auch eine radiochemische Abtrennung voraus.

$$\text{erreichbare NWG: } 1.60 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.40\text{E-}15 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 8.89\text{E-}05$$

γ -Messung: Die Messung der 109 keV- γ -Linie ist wegen der geringen Intensität nicht gut geeignet. Sie ist auch durch mehrere andere Radionuklide gestört und die γ -Selbstabsorption muß berücksichtigt werden, wenn die Meßproben nicht sehr dünn sind. Die erreichbare NWG ist in der Größenordnung der geforderten NWG.

$$\text{erreichbare NWG: } 714. \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.07\text{E-}12 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.0397$$

ICP-MS: Nicht hinreichend empfindlich.

$$\text{erreichbare NWG: } 8.33\text{E+}07 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.25\text{E-}07 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 4628.$$

Zusammenfassung: ^{125m}Te ist ein Folgeprodukt von ^{125}Sb mit einem Verzweigungsverhältnis von etwa 35%. Weil ^{125}Sb mit γ -Spektrometrie recht gut bestimmt werden kann, ist die Messung von ^{125m}Te nicht unbedingt erforderlich, denn nach einer Lagerzeit von etwa einem Jahr ist das Gleichgewicht nahezu erreicht. Wenn es trotzdem

gemessen werden soll, dann läßt sich wohl am besten über eine β -Messung bestimmen. Auch eine LEP-Messung käme infrage. Für beide Methoden ist ein radiochemisches Trennverfahren erforderlich. Die γ -Spektrometrie ohne radiochemische Trennung ist wegen der kleinen γ -Intensität und der Existenz von mehreren γ -Linien anderer Radionuklide in diesem Bereich kaum geeignet, d.h. die erreichbare NWG wird nur in sehr günstigen Fällen tatsächlich erreicht werden.

^{125}J 60 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.552\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 6.442\text{E+}14 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 1500.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.33E-12 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
e^-	>22 keV	33 %	2 lps
Röntgen + γ	27 - 35 keV	148 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: ^{125}J zerfällt durch Elektroneneinfang und als Teilchenstrahlung werden Konversions- und Augerelektronen emittiert. Nach radiochemischer Abtrennung von Jod können sie mit einem LSC gemessen werden; dabei kann aber ^{129}J stören. Die Messung per Elektronenspektrometrie ist weniger empfindlich, aber sie stellt nicht so hohe Ansprüche an die Reinheit des abgetrennten Präparats; ^{129}J emittiert ebenfalls Konversionselektronen in diesem Energiebereich, aber nur mit geringer Intensität. Die NWG bezieht sich auf die Elektronenspektrometrie-Messung.

$$\text{erreichbare NWG: } 6.06 \text{ Bq} \Leftrightarrow 9.41\text{E-}15 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 0.0040$$

LEP-Messung: Es werden vor allem Te-Röntgenstrahlen emittiert. Deren Messung ist mit einem LEP-Detektor möglich, setzt aber auch eine radiochemische Abtrennung voraus, weil z.B. $^{125\text{m}}\text{Te}$ dasselbe Röntgenspektrum emittiert.

$$\text{erreichbare NWG: } 1.35 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.10\text{E-}15 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 9.01\text{E-}04$$

ICP-MS: Nicht hinreichend empfindlich.

$$\text{erreichbare NWG: } 8.05\text{E+}07 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.25\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 5.37\text{E+}04$$

Zusammenfassung: ^{125}J ist kein Spalt- und kein (n, γ)-Aktivierungsprodukt. Es wird mit Beschleunigern für medizinische Zwecke hergestellt. Das Nuklid wird also nur in geringen Mengen im radioaktiven Abfall vorkommen und dann dürfte es wegen seiner kurzen HWZ fast immer abgeklungen sein. Wenn es trotzdem gemessen werden soll, dann läßt sich per Elektronenspektrometrie oder mit LEP-Spektrometrie bestimmen. Für beide Methoden sind radiochemische Trennverfahren erforderlich und die Störung durch ^{129}J und $^{125\text{m}}\text{Te}$ muß beachtet werden.

^{129}J $1.57\text{E}07 \text{ a}$

Ringversuch

$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.531\text{E}-07 \text{ g}$

$1 \text{ g} \Leftrightarrow 6.531\text{E}+06 \text{ Bq}$

geforderte NWG: $30.0 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.59\text{E}-06 \text{ g}$

aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	84 %	0.02 lps
e^-	34 keV	11 %	2 lps
Röntgen + γ	29 - 40 keV	79 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Abtrennung kann man ^{129}J durch Messung der β - und Elektronenstrahlung mit LSC bestimmen. ^{125}J dürfte wegen seiner kurzen Halbwertszeit normalerweise nicht in den Proben vorkommen und somit nicht stören.

erreichbare NWG: $0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.65\text{E}-09 \text{ g}$, $R_{\text{NWG}} \quad 7.94\text{E}-04$

Elektronenmessung: Die Messung der Konversionselektronen mit Elektronenspektrometrie ist durch das β -Spektrum von ^{129}J erschwert. Die NWG reicht nicht aus.

erreichbare NWG: $18. \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.78\text{E}-06 \text{ g}$, $R_{\text{NWG}} \quad 0.61$

LEP-Messung: Es werden vor allem Xe-Röntgenstrahlen emittiert. Deren Messung ist mit einem LEP-Detektor möglich, setzt aber auch eine radiochemische Abtrennung voraus, weil die Röntgenlinien nicht nuklidspezifisch sind.

erreichbare NWG: $2.53 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.88\text{E}-07 \text{ g}$, $R_{\text{NWG}} \quad 0.0844$

ICP-MS: Ist vermutlich auch geeignet, wenn ^{129}Xe nicht stört.

erreichbare NWG: $0.84 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.29\text{E}-07 \text{ g}$, $R_{\text{NWG}} \quad 0.0281$

NAA: Diese Methode wurde schon häufig zur hochempfindlichen Bestimmung von ^{129}J eingesetzt; auch in der ZCH, wobei die unten angegebene NWG erreicht wurde. Dabei wurde das Jod vor und nach der Bestrahlung abgetrennt; das Verfahren ist recht aufwendig.

erreichbare NWG $2\text{E}-5 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3\text{E}-12 \text{ g}$, $R_{\text{NWG}} \quad 7.\text{E}-07$

Bei der für ^{129}J geforderten NWG kann das Trennverfahren vermutlich vereinfacht werden, so daß NAA eine sinnvolle alternative Bestimmungsmethode bietet.

Zusammenfassung: LSC, Elektronenspektrometrie und LEP-Messungen nach radiochemischen Trennungen können die erforderliche NWG erreichen. ICP-MS ist sicher auch geeignet. Für extrem niedrige NWG hat sich NAA bewährt.

^{134}Cs 2.06 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 2.087E-14 g

1 g $\Leftrightarrow$ 4.792E+13 Bq

geforderte NWG: 1300.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.71E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	90 %	0.02 lps
γ	605 keV	98 %	2 lps
	796 keV	85 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode, hier aber nicht erforderlich.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 4.64E-16 g, R_{NWG} 1.71E-05

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 2.04 Bq $\Leftrightarrow$ 4.26E-14 g, R_{NWG} 0.0016

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 6.42E+06 Bq $\Leftrightarrow$ 1.34E-07 g, R_{NWG} 4939.

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{135}Cs 3.E06 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 3.062E-08 g

1 g $\Leftrightarrow$ 3.266E+07 Bq

geforderte NWG: 6400.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.96E-04 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	88 %	0.02 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Bei der radiochemischen Trennung bleiben die anderen Cs-Isotope beim ^{135}Cs , so daß man bei der LSC-Messung die Summe aller Aktivitäten erhält. ^{134}Cs und ^{137}Cs können aber per γ -Spektrometrie separat bestimmt und der Meßwert entsprechend korrigiert werden.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 6.96E-10 g, R_{NWG} 3.55E-06

ICP-MS: Wahrscheinlich gut geeignet.

erreichbare NWG: 4.41 Bq $\Leftrightarrow$ 1.35E-07 g, R_{NWG} 6.89E-04

Zusammenfassung: β -Messung und ICP-MS sollten ausprobiert und miteinander verglichen werden.

^{137}Cs 30 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.107\text{E-}13 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 3.218\text{E+}12 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 360.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.12E-10 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	96 %	0.02 lps
γ	662 keV	85 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode, hier aber nicht erforderlich.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 6.47E-15 g, R_{NWG} 5.79E-05

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 2.35 Bq $\Leftrightarrow$ 7.31E-13 g, R_{NWG} 0.0065

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 4.41E+05 Bq $\Leftrightarrow$ 1.37E-07 g, R_{NWG} 1225.

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{133}Ba 10.5 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.056\text{E-}13 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 9.472\text{E+}12 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 1000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.06E-10 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^+	>10 keV	0.2 %	0.02 lps
e^-	>10 keV	260 %	2 lps
γ	81 keV	34 %	2 lps
	303 keV	18 %	2 lps
	356 keV	62 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: Die Messung der Konversionselektronen nach radiochemischer Abtrennung mit LSC ist die empfindlichste Methode. Bei Elektronenspektrometrie ist die NWG höher, aber die Selektivität besser. Beide Methoden sind für dieses Nuklid nicht optimal.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.77 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.12\text{E-}14 \text{ g,} \quad R_{\text{NWG}} \quad 7.69\text{E-}04$$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

$$\text{erreichbare NWG: } 3.23 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.41\text{E-}13 \text{ g,} \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.0032$$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 1.26\text{E+}06 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.33\text{E-}07 \text{ g,} \quad R_{\text{NWG}} \quad 1260.$$

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{144}Ce 285 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.495\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.177\text{E+}14 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 29000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.46E-10 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
$\beta(^{144}\text{Ce})$	>10 keV	91 %	0.02 lps
$\beta(^{144}\text{Pr})$	>10 keV	100 %	0.02 lps
$\gamma(^{144}\text{Ce})$	133 keV	11 %	2 lps
$\gamma(^{144}\text{Pr})$	697 keV	1.34 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Dem Spaltprodukt ^{144}Ce folgt das kurzlebige ^{144}Pr , das auch zur Bestimmung herangezogen werden kann.

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 1.70E-16 g, R_{NWG} 6.90E-07

Die sehr energiereiche β -Strahlung von ^{144}Pr erlaubt auch die Bestimmung mit LSC über die Tscherenkow-Strahlung.

γ -Messung: Einfachste Meßmethode, wobei allerdings die 133 keV- γ -Linie durch andere Nuklide, z.B. ^{182}Hf , gestört werden kann.

erreichbare NWG: 18. Bq $\Leftrightarrow$ 1.54E-13 g, R_{NWG} 6.27E-04

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 1.70E+07 Bq $\Leftrightarrow$ 1.44E-07 g, R_{NWG} 585.

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie wahrscheinlich ausreichend; sonst radiochemische Abtrennung und LSC Messung.

^{147}Pm 2.62 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.912\text{E-}14 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 3.434\text{E+}13 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $4.50\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.31\text{E-}08 \text{ g}$ aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	89 %	0.02 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden. Das Trennverfahren ist wegen der chemischen Eigenschaften der Lanthaniden wahrscheinlich aufwendig.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.54\text{E-}16 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 4.99\text{E-}08$$

ICP-MS: Vielleicht kann die geforderte NWG erreicht werden.

$$\text{erreichbare NWG: } 5.05\text{E+}06 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.47\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 11.$$

Zusammenfassung: Die Abtrennung von ^{147}Pm und Messung mit LSC oder einem anderen β -Zähler ist wahrscheinlich die beste Methode. Wenn ICP-MS angewendet wird, dann sollte auf dieses Nuklid mit geachtet werden.

^{151}Sm 90 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.027\text{E-}12 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 9.733\text{E+}11 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $8.40\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.63\text{E-}07 \text{ g}$ aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β	>10 keV	95 %	0.02 Ips

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Nach radiochemischer Isolierung kann mit LSC gemessen werden. Das Trennverfahren ist wegen der chemischen Eigenschaften der Lanthaniden wahrscheinlich aufwendig.

erreichbare NWG: $0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.16\text{E-}14 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 2.51\text{E-}08$

ICP-MS: Wahrscheinlich möglich.

erreichbare NWG: $1.47\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.51\text{E-}07 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 0.17$

Zusammenfassung: Die Abtrennung von Samarium und Messung des Nuklids mit LSC oder einem anderen β -Zähler ist die empfindlichere, aber aufwendige Methode. Für Routinemessungen ist ICP-MS vielleicht besser geeignet.

^{152}Eu 13.3 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.528\text{E-}13 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 6.543\text{E+}12 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 310.0 Bq $\Leftrightarrow$ 4.74E-11 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	99 %	0.02 lps
γ	344 keV	27 %	2 lps
	1112 keV	14 %	2 lps
	1408 keV	21 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode, hier aber nicht erforderlich.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 3.09E-15 g, R_{NWG} 6.52E-05

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 7.41 Bq $\Leftrightarrow$ 1.13E-12 g, R_{NWG} 0.0239

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 9.95E+05 Bq $\Leftrightarrow$ 1.52E-07 g, R_{NWG} 3208.

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{154}Eu 8.8 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.025E-13 g

1 g $\Leftrightarrow$ 9.760E+12 Bq

geforderte NWG: 440.0 Bq $\Leftrightarrow$ 4.51E-11 g

aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	95 %	0.02 lps
γ	123 keV	41 %	2 lps
	723 keV	20 %	2 lps
	1274 keV	36 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode, hier aber nicht erforderlich.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 2.16E-15 g,

R_{NWG} 4.78E-05

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 4.88 Bq $\Leftrightarrow$ 5.00E-13 g,

R_{NWG} 0.0111

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 1.50E+06 Bq $\Leftrightarrow$ 1.54E-07 g,

R_{NWG} 3416.

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{155}Eu 5.0 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 5.859E-14 g

1 g $\Leftrightarrow$ 1.707E+13 Bq

geforderte NWG: 15000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 8.79E-10 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	85 %	0.02 lps
γ	87 keV	34 %	2 lps
	105 keV	21 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Eu-Nuklide werden bei der radiochemischen Abtrennung nicht getrennt. Deshalb ist die β -Messung keine gut geeignete Methode.

γ -Messung: Die niederenergetischen γ -Linien werden oft durch andere Radionuklide gestört. Falls die direkte γ -Messung keine zuverlässigen Werte liefert, muß vorher eine radiochemische Abtrennung ausgeführt werden; ^{152}Eu und ^{154}Eu haben in dem Bereich keine störenden Linien. In dem nach der Trennung vorliegenden Meßpräparat dürfte die γ -Selbstabsorption vernachlässigbar sein.

erreichbare NWG: 5.88 Bq $\Leftrightarrow$ 3.45E-13 g, R_{NWG} 3.92E-04

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 2.65E+06 Bq $\Leftrightarrow$ 1.55E-07 g, R_{NWG} 176.

Zusammenfassung: Bestimmung durch γ -Spektrometrie oder LEP-Spektrometrie nach radiochemischer Trennung.

^{175}Hf 70 d

1 Bq $\Leftrightarrow$ 2.536E-15 g

1 g $\Leftrightarrow$ 3.944E+14 Bq

geforderte NWG: 36000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 9.13E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^+	>10 keV	0.5 %	0.02 lps
e^-	9 - 11 keV	65 %	2 lps
γ	343 keV	87 %	2 lps
Röntgen	7 - 10 keV	23 %	2 lps
	53 - 63 keV	93 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: Die Messung der Elektronenstrahlung nach radiochemischer Abtrennung mit LSC ist die empfindlichste Methode, hier aber nicht erforderlich. Elektronenspektrometrie ist weniger empfindlich. Die angegebene erreichbare NWG bezieht sich auf Elektronenspektrometrie

erreichbare NWG: 3.08 Bq $\Leftrightarrow$ 7.80E-15 g, R_{NWG} 8.55E-05

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 2.30 Bq $\Leftrightarrow$ 5.83E-15 g, R_{NWG} 6.39E-05

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 6.90E+07 Bq $\Leftrightarrow$ 1.75E-07 g, R_{NWG} 1917.

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{181}Hf 42.4 d

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.589E-15 g

1 g $\Leftrightarrow$ 6.295E+14 Bq

geforderte NWG: 13000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.07E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	95 %	0.02 lps
γ	133 keV	36 %	2 lps
	482 keV	81 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode, hier aber nicht erforderlich.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 3.34E-17 g, R_{NWG} 1.62E-06

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 2.47 Bq $\Leftrightarrow$ 3.92E-15 g, R_{NWG} 1.90E-04

LEP-Messung: Möglich, aber nicht erforderlich.

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 1.14E+08 Bq $\Leftrightarrow$ 1.81E-07 g, R_{NWG} 8765.

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{182}Ta 115 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.332\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 2.308\text{E+}14 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 6000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.60E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	94 %	0.02 lps
γ	1121 keV	35 %	2 lps
	1221 keV	27 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode, hier aber nicht erforderlich.

erreichbare NWG: $0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 9.22\text{E-}17 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 3.55\text{E-}06$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: $5.71 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.48\text{E-}14 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 9.52\text{E-}04$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $4.20\text{E+}07 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.82\text{E-}07 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 7002.$

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{203}Hg 46.6 d

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.958E-15 g

1 g $\Leftrightarrow$ 5.107E+14 Bq

geforderte NWG: 29000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 5.68E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	88 %	0.02 lps
γ	279 keV	82 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode, hier aber nicht erforderlich.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 4.45E-17 g, R_{NWG} 7.84E-07

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: 2.44 Bq $\Leftrightarrow$ 4.78E-15 g, R_{NWG} 8.41E-05

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 1.04E+08 Bq $\Leftrightarrow$ 2.03E-07 g, R_{NWG} 3575.

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{210}Pb 22.3 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.540\text{E-}13 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 2.825\text{E+}12 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $10.0 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.54\text{E-}12 \text{ g}$ **aus Tabelle 3**

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	3720 keV	$< 2 \times 10^{-6} \%$	
β^-	$> 10 \text{ keV}$	17 %	0.02 lps
e^-	$> 10 \text{ keV}$	90 %	2 lps
γ	10 - 15 + 47 keV	25 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung: Ungeeignet

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode. Die NWG wird noch verbessert durch die Konversionselektronen, die im LSC ebenfalls erfaßt werden, hier aber bei der Berechnung der NWG nicht berücksichtigt worden sind.

erreichbare NWG: $0.12 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.17\text{E-}14 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.0118$

Elektronenmessung: Nicht so empfindlich, aber selektiv und deshalb zuverlässiger als die β -Messung.

erreichbare NWG: $2.22 \text{ Bq} \Leftrightarrow 7.87\text{E-}13 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.22$

LEP-Messung: Mit LEP-Spektrometrie und nach radiochemischer Abtrennung.

erreichbare NWG: $8.00 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.83\text{E-}12 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.80$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $5.93\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.10\text{E-}07 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 5.93\text{E+}04$

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid ist als Glied der ^{238}U - bzw. der ^{226}Ra -Reihe interessant. In diesem Fall können andere Vorgängernuklide leichter nachgewiesen werden. In Ausnahmefällen kann ^{210}Pb auch für technisch-wissenschaftliche Zwecke abgetrennt sein und isoliert in den Abfällen vorkommen. Dann kann man das Nuklid selbst oder seine Folgeprodukte ^{210}Bi oder ^{210}Po zur Bestimmung verwenden. ^{210}Bi läßt sich ebenfalls nur schwierig bestimmen, während ^{210}Po mit α -Spektrometrie gemessen werden kann.

Wenn ^{210}Pb selbst bestimmt werden soll, muß eine radiochemische Abtrennung ausgearbeitet werden, an die sich Elektronenspektrometrie oder eine LEP-Messung anschließen kann.

^{214}Pb 26.8 m

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.244\text{E-}19 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.213\text{E+}18 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $2.20\text{E+}06 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.81\text{E-}12 \text{ g}$ aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	97 %	0.02 lps
γ	295 keV	19 %	2 lps
	352 keV	37 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode, hier aber nicht erforderlich.

erreichbare NWG: $0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.70\text{E-}20 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 9.37\text{E-}09$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: $5.41 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.46\text{E-}18 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 2.46\text{E-}06$

ICP-MS: Nicht geeignet.

erreichbare NWG: $2.60\text{E+}11 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.14\text{E-}07 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 1.18\text{E+}05$

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid ist als Glied der ^{238}U - bzw. der ^{226}Ra -Reihe interessant und wegen seiner einfachen Bestimmung durch γ -Spektrometrie neben ^{214}Bi gut geeignet als Indikator für die dem ^{222}Rn folgenden Glieder dieser Reihe.

^{210}Bi 5.0 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.173\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 4.601\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $1.00\text{E+}06 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.17\text{E-}10 \text{ g}$ aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	>10 keV	$\Sigma < 2\text{E-}4 \%$	0.01 lps
β^-		99 %	0.02 lps
γ		$\Sigma < 1\text{E-}4 \%$	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung: Sehr unempfindlich.

β -Messung: Wenn ein einwandfreies radiochemisches Trennverfahren vorliegt, wäre damit eine Bestimmung mit niedriger NWG möglich. Es gibt allerdings einige langlebige Wismutisotope (^{205}Bi bis ^{208}Bi), die auch dann noch stören könnten. Sie entstehen aber nur durch Bestrahlungen in Beschleunigern und dürften deshalb in kerntechnischen Abfällen selten zu finden sein. Praktische Verwendung findet gelegentlich das ^{207}Bi ($t_{1/2} = 32.2 \text{ a}$) als Eichstrahler für γ -Spektrometer. Es wird nur in geringen Mengen erzeugt und deshalb in Abfallgebinden nicht in unzulässiger Menge vorkommen, kann dann aber anhand seiner γ -Linien leicht erkannt und gemessen werden.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.39\text{E-}18 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 2.02\text{E-}08$$

γ -Messung: Sehr unempfindlich.

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 9.66\text{E+}08 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.10\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 966.$$

Zusammenfassung und Bemerkungen: Siehe ^{210}Pb und $^{210\text{m}}\text{Bi}$

^{210m}Bi 3.0E06 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.763\text{E-}08 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 2.100\text{E+}07 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $1.00\text{E+}06 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.76\text{E-}02 \text{ g}$ aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4908 keV	39 %	0.01 lps
	4946 keV	56 %	0.01 lps
e^-	220 keV	9 %	2 lps
γ	266 keV	50 %	2 lps
	305 keV	28 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: $0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.51\text{E-}10 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 1.79\text{E-}08$

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist möglich, aber nicht optimal.

erreichbare NWG: $22. \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.06\text{E-}06 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 2.22\text{E-}05$

γ -Messung: Die direkte γ -Spektrometrie ist hier eine einfache und ausreichende Meßmethode.

erreichbare NWG: $4.00 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.91\text{E-}07 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 4.00\text{E-}06$

ICP-MS: Ist sicher gut geeignet.

erreichbare NWG: $4.41 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.10\text{E-}07 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 4.41\text{E-}06$

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid entsteht mit einem sehr kleinen Wirkungsquerschnitt durch Neutroneneinfang aus Wismut und kann deshalb bei Experimenten, bei denen Wismut lange im Reaktor oder anderen Neutronenquellen verbleibt, gebildet werden. Es ist wohl nur in Ausnahmefällen in kerntechnischen Abfällen zu finden. Nach einer Bestrahlungszeit von 3650 Tagen in einem Neutronenfluß von $\Phi_{th} = 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ beträgt die spezifische Aktivität etwa 650 Bq/g.

Es ist nicht ganz sicher, ob mit dem in Ref.^[4], Tabelle 6, genannten ^{210}Bi das hier behandelte langlebige mesomere Nuklid oder der Grundzustand ($t_{1/2} = 5.0 \text{ d}$) gemeint ist. Für ein α -strahlendes Nuklid mit einer so langen HWZ wäre die zulässige Aktivität (geforderte NWG) sehr hoch. Weil die Erzeugung derartig hoher Aktivitäten sehr unwahrscheinlich ist, ist zu vermuten, daß das kurzlebige Nuklid gemeint ist.

Die einfachste Meßmethode für Routinemessungen wäre vermutlich γ -Spektrometrie, aber auch bei ICP-MS Multielementbestimmungen würde es mit gefunden.

^{214}Bi 19.9 m

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.121\text{E-}19 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.634\text{E+}18 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $5.60\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.43\text{E-}13 \text{ g}$ aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	99 %	0.02 ips
γ	609 keV	46 %	2 ips
	1120 keV	15 %	2 ips

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode, hier aber nicht erforderlich.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.24\text{E-}20 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 3.61\text{E-}08$$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

$$\text{erreichbare NWG: } 4.35 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.66\text{E-}18 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 7.76\text{E-}06$$

ICP-MS: Nicht geeignet.

$$\text{erreichbare NWG: } 3.50\text{E+}11 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.14\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 6.24\text{E+}05$$

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid ist als Glied der ^{238}U - bzw. der ^{226}Ra -Reihe interessant und wegen seiner einfachen Bestimmung durch γ -Spektrometrie neben ^{214}Pb gut geeignet als Indikator für die dem ^{222}Rn folgenden Glieder dieser Reihe.

^{210}Po 138.4 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.016\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.662\text{E+}14 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 490.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.95E-12 g **aus Tabelle 4**

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5304 keV	100 %	0.01 lps
γ	803 keV	0.001 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

$$\text{erreichbare NWG: } 1.00\text{E-}2 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.02\text{E-}17 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 2.04\text{E-}05$$

β -Messung: Nicht möglich.

γ -Messung: Sehr unempfindlich.

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 3.49\text{E+}07 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.10\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 7.12\text{E+}04$$

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid ist als Glied der ^{238}U - bzw. der ^{226}Ra -Reihe interessant. In diesem Fall können andere Vorgängernuklide über γ -Spektrometrie leichter nachgewiesen werden.

In Ausnahmefällen kann ^{210}Po auch für technisch-wissenschaftliche Zwecke abgetrennt sein und isoliert in den Abfällen vorkommen. Dann muß man das Nuklid selbst per α -Spektrometrie bestimmen.

^{222}Rn 3.8 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.746\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 5.727\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $1.50\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.62\text{E-}11 \text{ g}$ aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5490 keV	100 %	0.01 lps
γ	510 keV	0.07 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

$$\text{erreichbare NWG: } 1.00\text{E-}2 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.75\text{E-}18 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 6.67\text{E-}08$$

γ -Messung: Sehr unempfindlich und die Linie ist stark von der Vernichtungsstrahlung anderer Radionuklide überlagert.

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 1.27\text{E+}09 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.22\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 8476.$$

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid ist als Glied der ^{238}U - bzw. der ^{226}Ra -Reihe interessant. Es läßt sich am besten über spezielle Radon-Detektionsmethoden (Emanation des Rn-Gases, Auffangen und Messen der α -Strahlung in Szintillationskammern) bestimmen.

^{223}Ra 11.4 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.262\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.900\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 910.0 Bq $\Leftrightarrow$ 4.79E-13 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5607 keV	24 %	0.01 lps
	5716 keV	53 %	0.01 lps
e^-	>15 keV	92 %	2 lps
γ	81 - 84 keV	40 %	2 lps
	269 keV	14 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

$$\text{erreichbare NWG: } 0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 9.93\text{E-}18 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 2.07\text{E-}05$$

Elektronenmessung: Möglich, aber wohl nicht optimal.

$$\text{erreichbare NWG: } 2.17 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.14\text{E-}15 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 0.0024$$

γ -Messung: Möglich und wahrscheinlich meistens ausreichend.

$$\text{erreichbare NWG: } 5.00 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.63\text{E-}15 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 0.0055$$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 4.24\text{E+}08 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.23\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 4.66\text{E+}05$$

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid ist wichtig zum Nachweis der Zerfallsreihe von ^{235}U - bzw. ^{231}Pa . Die instrumentelle γ -Messung ist wohl meistens das sinnvollste Meßverfahren. Wenn das nicht ausreicht, muß eine α -Messung ausgeführt werden.

^{224}Ra 3.66 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.697\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 5.893\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $1.10\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.87\text{E-}11 \text{ g}$ aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5686 keV	95 %	0.01 lps
γ	241 keV	3.9 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

$$\text{erreichbare NWG: } 0.01 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.79\text{E-}18 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 9.57\text{E-}08$$

γ -Messung: Möglich und wahrscheinlich meistens ausreichend.

$$\text{erreichbare NWG: } 51. \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.70\text{E-}15 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 4.66\text{E-}04$$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 1.32\text{E+}09 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.24\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 1.20\text{E+}04$$

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid ist wichtig zum Nachweis der Zerfallsreihe von ^{232}Th - bzw. ^{228}Th , das aber auch selbst recht gut nachgewiesen werden kann. Die instrumentelle γ -Messung ist wohl meistens das am einfachsten durchführbare Meßverfahren. Wenn das nicht ausreicht, muß eine α -Messung ausgeführt werden.

^{226}Ra 1600 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.734\text{E-}11 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 3.658\text{E+}10 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 4.4 Bq $\Leftrightarrow$ 1.20E-10 g **aus Tabelle 3**

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4784 keV	94 %	0.01 lps
γ	186 keV	3.3 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung: Die NWG ist ausreichend.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.01 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.91\text{E-}13 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 0.0024$$

γ -Messung: Wahrscheinlich nicht ausreichend.

$$\text{erreichbare NWG: } 61. \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.66\text{E-}09 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 13.77$$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 8267. \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.26\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 1879.$$

Zusammenfassung: Die instrumentelle γ -Messung ist das am einfachsten durchführbare, aber wohl selten ausreichende Meßverfahren. Normalerweise muß eine α -Messung ausgeführt werden. Auch die Messung des in der Probe nachgebildeten und abgetrennten Radons oder des von einer abgetrennten Radiumfraktion emanierenden Radons mit einem Szintillationsdetektor könnte ein geeignetes Verfahren sein.

^{228}Ra 5.75 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 9.911\text{E-}14 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.009\text{E+}13 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 51.0 Bq $\Leftrightarrow$ 5.05E-12 g **aus Tabelle 3**

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
γ	12 - 20 keV	187 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

LEP-Messung: Messung mit LEP-Spektrometrie nach radiochemischer Abtrennung möglich.

erreichbare NWG: 1.07 Bq $\Leftrightarrow$ 1.06E-13 g, R_{NWG} 0.0210

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 2.30E+06 Bq $\Leftrightarrow$ 2.28E-07 g, R_{NWG} 4.51E+04

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid ist das Tochterprodukt von ^{232}Th . Es läßt sich einfacher über das Folgeprodukt ^{228}Ac per γ -Spektrometrie bestimmen.

^{227}Ac 21.8 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.741\text{E-}13 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 2.673\text{E+}12 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 3.6 Bq $\Leftrightarrow$ 1.35E-12 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4938 keV	0.52 %	0.01 lps
	4951 keV	0.65 %	0.01 lps
β^-	>10 keV	40 %	0.02 lps
γ	$\Sigma > 20 \text{ keV}$	<0.1 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung: Nicht sehr empfindlich.

$$\text{erreichbare NWG: } 1.54 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.76\text{E-}13 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 0.43$$

β -Messung: Wahrscheinlich nicht möglich, weil nach der radiochemischen Abtrennung zu schnell Folgeprodukte nachgebildet werden und andere Radionuklide stören.

γ -Messung: Nicht geeignet.

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 6.07\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.27\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 1.69\text{E+}05$$

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid gehört zur Zerfallsreihe von ^{235}U bzw. ^{231}Pa . Es läßt sich selbst nicht gut messen. Deshalb ist die Bestimmung über das Tochterprodukt ^{227}Th vorzuziehen. Vielleicht ist auch eine Messung des γ -Spektrums von ^{223}Fr möglich.

^{228}Ac 6.13 h

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.205\text{E-}17 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 8.296\text{E+}16 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $8.20\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 9.88\text{E-}12 \text{ g}$ aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	98 %	0.02 lps
γ	911 keV	29 %	2 lps
	969 keV	17 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung wird leicht durch andere Actinium-Isotope gestört und ist nicht sinnvoll.

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

$$\text{erreichbare NWG: } 6.90 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.31\text{E-}17 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 8.41\text{E-}06$$

ICP-MS: Nicht geeignet.

$$\text{erreichbare NWG: } 1.89\text{E+}10 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.28\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 2.31\text{E+}04$$

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid ist Folgeprodukt von von ^{232}Th - bzw. ^{228}Ra . Das letztere Nuklid läßt sich nicht gut bestimmen und deshalb ist die instrumentelle γ -Messung für dessen Nachweis wichtig.

^{227}Th 18.7 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.786\text{E-}16 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.138\text{E+}15 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 780.0 Bq $\Leftrightarrow$ 6.85E-13 g **aus Tabelle 4**

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5757 keV	20 %	0.01 lps
	5978 keV	23 %	0.01 lps
	6038 keV	25 %	0.01 lps
e^-	>10 keV	170 %	2 lps
γ	235 keV	11.6 %	2 lps
	330 keV	2.7 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung

erreichbare NWG: 0.04 Bq $\Leftrightarrow$ 3.51E-17 g, R_{NWG} 5.13E-05

Elektronenmessung: Die Konversionselektronen können nach radiochemischer Abtrennung per Elektronenspektrometrie gemessen werden. Inwieweit die Linien charakteristisch für ^{227}Th sind oder ob sie durch andere Th-Isotope oder durch Folgeprodukte gestört werden, muß noch geprüft werden. Wahrscheinlich muß aber diese Methode nicht eingesetzt werden.

erreichbare NWG: 1.18 Bq $\Leftrightarrow$ 1.03E-15 g, R_{NWG} 0.0015

γ -Messung: Einfachste und in der Regel ausreichend empfindliche und selektive Methode.

erreichbare NWG: 17. Bq $\Leftrightarrow$ 1.51E-14 g, R_{NWG} 0.0221

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 2.58E+08 Bq $\Leftrightarrow$ 2.27E-07 g, R_{NWG} 3.31E+05

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid gehört zur Zerfallsreihe von ^{235}U bzw. ^{231}Pa und es dient zur Bestimmung des Mutternuklids ^{227}Ac , das selbst nicht gut meßbar ist. Die γ -Spektrometrie ist die optimale Meßmethode.

^{228}Th 1.9 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.275\text{E-}14 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 3.053\text{E+}13 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 49.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.60E-12 g **aus Tabelle 3**

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5341 keV	27 %	0.01 Ips
	5423 keV	73 %	0.01 Ips
e^-	>10 keV	36 %	2 Ips
Röntgen	12 - 18 keV	9 %	2 Ips

Bestimmungsmethoden

α -Messung: Wahrscheinlich die optimale Methode.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.01 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.49\text{E-}16 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 2.80\text{E-}04$$

β -Messung: β -Strahlung wird nicht emittiert, aber Konversionselektronen. Sie können nach radiochemischer Abtrennung per LSC gemessen werden. Inwieweit die evtl. per Elektronenspektrometrie meßbaren Linien charakteristisch für ^{228}Th sind oder ob sie durch andere Th-Isotope oder durch Folgeprodukte gestört werden, muß noch geprüft werden. Wahrscheinlich brauchen aber Elektronenspektrometrie und LSC nicht eingesetzt zu werden.

LEP-Messung: γ -Strahlung wird nicht und K- und L-Röntgenstrahlung nur mit geringer Intensität emittiert, die nach radiochemischer Abtrennung mit einem LEP-Spektrometrie gemessen werden könnte. Ob die Linien durch andere Th-Nuklide oder Folgeprodukte gestört werden, müßte noch geprüft werden.

$$\text{erreichbare NWG: } 22. \text{ Bq} \Leftrightarrow 7.28\text{E-}13 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 0.45$$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 6.96\text{E+}06 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.28\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 1.42\text{E+}05$$

Zusammenfassung und Bemerkungen: Das Nuklid gehört zur Zerfallsreihe von ^{232}Th und läßt sich wohl am besten mit der α -Spektrometrie bestimmen. Eventuell ist die Bestimmung eines der kurzlebigen Folgeprodukte z.B. ^{212}Bi oder ^{208}Tl per γ -Spektrometrie einfacher und hinreichend aussagekräftig.

^{230}Th 75400 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.311E-09 g

1 g $\Leftrightarrow$ 7.627E+08 Bq

geforderte NWG: 58.0 Bq $\Leftrightarrow$ 7.60E-08 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4621 keV	23 %	0.01 lps
	4688 keV	76 %	0.01 lps
γ		$\Sigma < 0.06$ %	

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 1.73E-11 g, R_{NWG} 2.27E-04

ICP-MS: Die geforderte NWG wird vermutlich nicht oder nur nach Optimierung des Verfahrens erreicht.

erreichbare NWG: 175. Bq $\Leftrightarrow$ 2.30E-07 g, R_{NWG} 3.02

NAA: Nicht empfindlich genug; das Aktivierungsprodukt ^{231}Th hat nur schwache γ -Linien.

Zusammenfassung: α -Spektrometrie ist wahrscheinlich die beste Meßmethode; ICP-MS sollte auch probiert werden.

^{231}Th 1.06 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.068\text{E-}17 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.973\text{E+}16 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $1.30\text{E+}07 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.59\text{E-}10 \text{ g}$ aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
e^-	>10 keV	427 %	2 lps
Röntgen	11 - 20 keV	96 %	2 lps
γ	85 keV	6.6 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: Es werden sehr viele Konversionselektronen emittiert. Sie können nach radiochemischer Abtrennung per Elektronenspektrometrie gemessen werden.

erreichbare NWG: $0.47 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.37\text{E-}17 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 3.60\text{E-}08$

LEP-Messung: Die emittierten Röntgenlinien sind nicht charakteristisch für das Nuklid, können aber nach radiochemischer Abtrennung von Thorium zur Messung verwendet werden und würden eine nachweisstarke Bestimmung erlauben. Vielleicht muß eine Zerfallskurve aufgenommen werden, um das kurzlebige Nuklid von anderen Th-Isotopen, die ähnliche Röntgenspektren emittieren, zu unterscheiden.

erreichbare NWG: $2.08 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.06\text{E-}16 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 1.60\text{E-}07$

γ -Messung: Die γ -Linie ist durch Linien anderer Radionuklide gestört, aber in abgetrenntem Thorium kann man die γ -Linie zum Bestimmen wahrscheinlich verwenden.

erreichbare NWG: $30. \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.54\text{E-}15 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 2.33\text{E-}06$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $4.56\text{E+}09 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.31\text{E-}07 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 351.$

Zusammenfassung und Bemerkungen: ^{231}Th ist das Tochternuklid von ^{235}U und läßt sich wohl am besten mit Elektronenspektrometrie oder mit LEP-Spektrometrie bestimmen.

^{232}Th 1.4E10 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 2.456E-04 g

1 g $\Leftrightarrow$ 4072 Bq

geforderte NWG: 10.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.46E-03 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	3952 keV	23 %	0.01 lps
	4010 keV	77 %	0.01 lps
γ	59 keV	0.19 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 3.19E-06 g, R_{NWG} 0.0013

ICP-MS: Wahrscheinlich gut geeignet.

erreichbare NWG: 9.45E-4 Bq $\Leftrightarrow$ 2.32E-07 g, R_{NWG} 9.45E-05

NAA: Wird in der ZCH routinemäßig ausgeführt.

erreichbare NWG: 2E-7 Bq $\Leftrightarrow$ 5E-11 g, R_{NWG} 2.E-08

Zusammenfassung: NAA und ICP-MS sind am besten geeignet. Vielleicht wird ^{232}Th auch bei der α -Spektrometrie mit gefunden.

^{234}Th 24.1 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.167\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 8.567\text{E+}14 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $1.00\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.17\text{E-}10 \text{ g}$ aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
e^-	>20 keV	21 %	2 lps
Röntgen	13 - 19 keV	9 %	2 lps
γ	63 keV	4 %	2 lps
	92 keV	5.4 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

Elektronenmessung: Die Konversionselektronen können nach radiochemischer Abtrennung per Elektronenspektrometrie gemessen werden.

erreichbare NWG: $9.52 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.11\text{E-}14 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 9.52\text{E-}05$

LSC kommt auch infrage und bietet wohl eine niedrigere NWG.

LEP-Messung: Die emittierten Röntgenlinien sind nicht charakteristisch für das Nuklid, können aber nach radiochemischer Abtrennung von Thorium zur Messung verwendet werden und würden eine Bestimmung erlauben. Wahrscheinlich muß eine Zerfallskurve aufgenommen werden, um das 24.1 d-Nuklid von anderen Th-Isotopen, die ähnliche Röntgenspektren emittieren, zu unterscheiden.

γ -Messung: Die γ -Linien liegen im unteren Energiebereich, wo auch viele andere Radionuklide emittieren. Deshalb wäre in diesem Fall auch für die γ -Spektrometrie eine radiochemische Abtrennung von Thorium vor der Messung sinnvoll. Die Linien würden dann genau so gut oder besser bei der LEP-Messung gefunden.

erreichbare NWG: $37. \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.32\text{E-}14 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 3.70\text{E-}04$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $2.00\text{E+}08 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.34\text{E-}07 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 2005.$

Zusammenfassung: Das Nuklid ist das Tochternuklid von ^{238}U und läßt sich wohl am besten mit der Elektronenspektrometrie oder mit einer LEP-Messung in abgetrenntem Thorium bestimmen.

^{231}Pa 33000 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.763\text{E-}10 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.735\text{E+}09 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 4.2 Bq $\Leftrightarrow$ 2.42E-09 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4951 keV	23 %	0.01 lps
	5013 keV	25 %	0.01 lps
	5029 keV	20 %	0.01 lps
e^-	>10 keV	200 %	2 lps
Röntgen	12 - 19 keV	53 %	
γ	27 keV	9.3 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung

erreichbare NWG: 0.04 Bq $\Leftrightarrow$ 2.31E-11 g, R_{NWG} 0.0095

Elektronenmessung: Die Konversionselektronen können nach radiochemischer Abtrennung per Elektronenspektrometrie gemessen werden. Inwieweit die Linien charakteristisch für ^{231}Pa sind oder ob sie durch andere Pa-Isotope oder durch Folgeprodukte gestört werden, muß noch geprüft werden.

erreichbare NWG: 1.00 Bq $\Leftrightarrow$ 5.76E-10 g, R_{NWG} 0.24

Mit LSC-Messung wäre die NWG um etwa zwei Größenordnungen niedriger, d.h. käme in den Bereich der geforderten NWG.

LEP-Messung: Die Röntgenlinien sind nicht charakteristisch für das Nuklid. Die energiearme γ -Linie kann eventuell nach chemischer Abtrennung von Protactinium mit LEP-Spektrometrie gemessen und zur Bestimmung herangezogen werden. Die NWG wurde dafür berechnet.

erreichbare NWG: 22. Bq $\Leftrightarrow$ 1.24E-08 g, R_{NWG} 5.12

ICP-MS: Wahrscheinlich nicht empfindlich genug, sollte aber ausprobiert werden.

erreichbare NWG: 401. Bq $\Leftrightarrow$ 2.31E-07 g, R_{NWG} 95.

NAA: Die (n, γ)-Reaktion hat einen hohen thermischen Wirkungsquerschnitt (200 b); das Aktivierungsprodukt hat gute γ -Linien. Ob allerdings mit instrumenteller NAA die niedrige NWG erreicht wird, die hier gefordert wird, ist fraglich.

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist vermutlich am besten geeignet. Die Messung der Elektronen erscheint auch aussichtsreich, wobei die geforderte NWG wahrscheinlich nur bei Einsatz von LSC erreicht wird.

^{233}Pa 27 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.302\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 7.680\text{E+}14 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $2.50\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.26\text{E-}10 \text{ g}$ aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	88 %	0.02 lps
γ	300 keV	6 %	2 lps
	312 keV	36 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Die Messung der β -Strahlung nach radiochemischer Abtrennung ist die empfindlichste Methode, hier aber nicht erforderlich.

erreichbare NWG: $0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.96\text{E-}17 \text{ g}$, $R_{\text{NWG}} \quad 9.09\text{E-}08$

γ -Messung: Einfachste und beste Meßmethode.

erreichbare NWG: $5.56 \text{ Bq} \Leftrightarrow 7.23\text{E-}15 \text{ g}$, $R_{\text{NWG}} \quad 2.22\text{E-}05$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $1.79\text{E+}08 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.33\text{E-}07 \text{ g}$, $R_{\text{NWG}} \quad 716.$

Zusammenfassung: Einfache Bestimmung durch γ -Spektrometrie.

^{234m}Pa 1.17 m

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.935\text{E-}20 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 2.541\text{E+}19 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 91000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 3.58E-15 g aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	99 %	0.02 lps
γ	1001 keV	0.65 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Wegen der kurzen HWZ ist eine radiochemische Abtrennung mit der erforderlichen Reinheit kaum möglich.

γ -Messung: Sehr schwache γ -Linie; nicht sehr empfindlich, könnte aber trotzdem ausreichend sein.

erreichbare NWG: 308. Bq $\Leftrightarrow$ 1.21E-17 g, R_{NWG} 0.0034

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 5.95E+12 Bq $\Leftrightarrow$ 2.34E-07 g, R_{NWG} 6.53E+07

Zusammenfassung: Das Nuklid ist als Folgeprodukt von ^{238}U und ^{234}Th interessant, bietet aber auch kein leichtes Bestimmungsverfahren. Vielleicht ist, nach Abtrennung von Thorium die sehr harte β -Strahlung ($E_{\beta, \text{max}} = 2.20 \text{ MeV}$) geeignet, das Nuklid und damit seine Vorläufer zu bestimmen. Zur β -Messung im LSC kann man den Tscherenkow-Effekt ausnutzen. Mit γ -Spektrometrie hat man aber auch gute Chancen.

^{234}Pa 6.7 h

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.352\text{E-}17 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 7.396\text{E+}16 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $3.10\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.19\text{E-}12 \text{ g}$ aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	96 %	0.02 lps
e^-	>10 keV	375 %	10 lps
γ	95 - 98 keV	41 %	2 lps
	131 keV	20 %	2 lps
	880 - 883 keV	25 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Empfindlichste Methode, aber die radiochemische Trennung ist nicht einfach.

erreichbare NWG: $0.02 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.82\text{E-}19 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 6.72\text{E-}08$

Elektronenmessung: Es gibt zahlreiche und z.T. intensive Linien von Konversionselektronen. Auf dem hohen β -Untergrund ist ihre Messung aber erschwert.

erreichbare NWG: $2.67 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.61\text{E-}17 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 8.60\text{E-}06$

γ -Messung: Einfache Methode und ausreichend empfindlich.

erreichbare NWG: $8.00 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.08\text{E-}16 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 2.58\text{E-}05$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $1.73\text{E+}10 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.34\text{E-}07 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 5.58\text{E+}04$

Zusammenfassung: Das Nuklid ist als Folgeprodukt von ^{238}U und ^{234}Th interessant. Es läßt sich per γ -Spektrometrie leicht bestimmen. Da es aber nur mit einem Verzweungsverhältnis von 0.13 % gebildet wird, reicht die NWG von ^{234}Pa zur Bestimmung der obengenannten Vorläufernuklide wohl nicht aus.

^{232}U 70 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.228E-12 g

1 g $\Leftrightarrow$ 8.145E+11 Bq

geforderte NWG: 36.0 Bq $\Leftrightarrow$ 4.42E-11 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5264 keV	31 %	0.01 lps
	5320 keV	68 %	0.01 lps
γ		$\Sigma < 0.25$ %	

Bestimmungsmethoden

α -Messung

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 1.81E-14 g, R_{NWG} 4.08E-04

γ -Messung: Nicht geeignet.

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 1.89E+05 Bq $\Leftrightarrow$ 2.32E-07 g, R_{NWG} 5249.

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das einzige geeignete Verfahren.

^{233}U 1.6E05 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 2.818E-09 g

1 g $\Leftrightarrow$ 3.548E+08 Bq

geforderte NWG: 90.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.54E-07 g aus Tabelle 5

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4783 keV	12 %	0.01 lps
	4825 keV	84 %	0.01 lps
e^-	>10 keV	15 %	2 lps
γ	nur sehr schwache Linien		

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 3.36E-11 g, R_{NWG} 1.32E-04

Elektronenmessung: Die Messung der Konversionselektronen per Elektronenspektrometrie ist vielleicht geeignet, aber nicht einfacher auszuführen als α -Spektrometrie.

erreichbare NWG: 13. Bq $\Leftrightarrow$ 3.76E-08 g, R_{NWG} 0.15

Wenn die Elektronen mit LSC gemessen werden, erreicht man eine hundertmal niedrigere NWG.

γ -Messung: Nicht geeignet.

ICP-MS: Vielleicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 83. Bq $\Leftrightarrow$ 2.33E-07 g, R_{NWG} 0.92

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das am ehesten geeignete Verfahren.

Mit LSC-Messung würde auch eine niedrige NWG erreicht, aber es ist nicht klar, wie weit andere Uranisotope und evtl. schnell nachgebildete, kurzlebige Folgeprodukt die Messung stören. ICP-MS sollte ausprobiert werden.

^{234}U 2.5E05 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 4.423E-09 g

1 g $\Leftrightarrow$ 2.261E+08 Bq

geforderte NWG: 130.0 Bq $\Leftrightarrow$ 5.75E-07 g aus Tabelle 5

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4724 keV	27 %	0.01 lps
	4776 keV	73 %	0.01 lps
γ	53 keV	0.12 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 6.06E-11 g, R_{NWG} 1.05E-04

γ -Messung: Nicht geeignet.

erreichbare NWG: 1667. Bq $\Leftrightarrow$ 7.37E-06 g, R_{NWG} 12.82

ICP-MS: Vielleicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 53. Bq $\Leftrightarrow$ 2.34E-07 g, R_{NWG} 0.41

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das am ehesten geeignete Verfahren, ICP-MS sollte ausprobiert werden.

^{235}U 7.E08 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.244E-05 g

1 g $\Leftrightarrow$ 8.041E+04 Bq

geforderte NWG: 74.0 Bq $\Leftrightarrow$ 9.20E-04 g

aus Tabelle 5

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4395 keV	55 %	0.01 lps
e^-	>10 keV	110 %	2 lps
γ	186 keV	53 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 2.26E-07 g, R_{NWG} 2.46E-04

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist wahrscheinlich auch geeignet, aber ähnlich aufwendig wie α -Spektrometrie.

erreichbare NWG: 1.82 Bq $\Leftrightarrow$ 2.26E-05 g, R_{NWG} 0.0246

γ -Messung: Die NWG ist wahrscheinlich nur ausreichend, wenn nicht zu viele andere Radionuklide mit hoher Aktivität in der Probe vorhanden sind. Eine radiochemische Abtrennung des Urans wäre in solchen Fällen notwendig.

erreichbare NWG: 3.77 Bq $\Leftrightarrow$ 4.69E-05 g, R_{NWG} 0.0510

ICP-MS: Wahrscheinlich gut geeignet.

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 2.35E-07 g, R_{NWG} 2.55E-04

NAA: Wird in der ZCH routinemäßig ausgeführt.

erreichbare NWG 8E-5 Bq $\Leftrightarrow$ 1E-9 g, R_{NWG} 1.E-06

Zusammenfassung: γ -Spektrometrie ist wahrscheinlich meistens ausreichend. NAA und ICP-MS sind sehr gut geeignet. Vielleicht wird das Nuklid auch bei der α -Spektrometrie mit gefunden. γ -Spektrometrie kann in günstigen Fällen ausreichend sein.

^{236}U 2.3E07 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 4.104E-07 g

1 g $\Leftrightarrow$ 2.437E+06 Bq

geforderte NWG: 160.0 Bq $\Leftrightarrow$ 6.57E-05 g

aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4445 keV	26 %	0.01 lps
	4494 keV	74 %	0.01 lps
e^-	>10 keV	35 %	2 lps
Röntgen	13 - 19 keV	9 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 5.55E-09 g, R_{NWG} 8.45E-05

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist vielleicht auch geeignet, aber ähnlich aufwendig wie α -Spektrometrie und viel weniger empfindlich.

erreichbare NWG: 5.71 Bq $\Leftrightarrow$ 2.34E-06 g, R_{NWG} 0.0357

LEP-Messung: LEP-Spektrometrie ist ähnlich aufwendig wie α -Spektrometrie aber nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 22. Bq $\Leftrightarrow$ 9.12E-06 g, R_{NWG} 0.14

ICP-MS: Vielleicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 0.58 Bq $\Leftrightarrow$ 2.36E-07 g, R_{NWG} 0.0036

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das am ehesten geeignete Verfahren, ICP-MS sollte ausprobiert werden.

^{238}U 4.5E09 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 8.097E-05 g

1 g $\Leftrightarrow$ 1.235E+04 Bq

geforderte NWG: 170.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.38E-02 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4147 keV	23 %	0.01 lps
	4196 keV	77 %	0.01 lps
e^-	>16 keV	30 %	2 lps
γ	Nur sehr schwache γ - und Th-L-Röntgenlinien.		

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 1.05E-06 g, R_{NWG} 7.64E-05

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist wahrscheinlich auch geeignet, aber ähnlich aufwendig wie α -Spektrometrie und weniger empfindlich.

erreichbare NWG: 6.67 Bq $\Leftrightarrow$ 5.40E-04 g, R_{NWG} 0.0392

ICP-MS: Wahrscheinlich gut geeignet.

erreichbare NWG: 2.94E-3 Bq $\Leftrightarrow$ 2.38E-07 g, R_{NWG} 1.73E-05

NAA: Wird in der ZCH routinemäßig ausgeführt.

erreichbare NWG 1.2E-6 Bq $\Leftrightarrow$ 1E-10 g, R_{NWG} 7.E-09

Fluorimetrie: ist ein sehr schnelles und einfaches Verfahren. Es ist zwar hinreichend empfindlich, aber man kann damit keine Isotope bestimmen. Es kann nur eingesetzt werden, wenn die Masse aller anderen Uranisotope sehr klein ist gegen die von ^{238}U .

Zusammenfassung: Die geforderte NWG ist recht hoch, aber weil eine Isotopenbestimmung gebraucht wird, kommen trotzdem nur massenspektrometrische oder radiometrische Verfahren sowie NAA infrage. ICP-MS und α -Spektrometrie sind wahrscheinlich am ehesten geeignet. NAA könnte gelegentlich zur Kontrolle eingesetzt werden.

^{237}Np 2.14E06 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 3.834E-08 g

1 g $\Leftrightarrow$ 2.608E+07 Bq

geforderte NWG: 15.0 Bq $\Leftrightarrow$ 5.75E-07 g

aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4771 keV	25 %	0.01 lps
	4788 keV	47 %	0.01 lps
e^-	>10 keV	156 %	2 lps
Röntgen	11 - 20 keV	51 %	2 lps
γ	87 keV	13 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.02 Bq $\Leftrightarrow$ 8.16E-10 g, R_{NWG} 0.0014

Elektronenmessung: Bei Elektronenspektrometrie entspricht die erreichbare NWG etwa der geforderten. Die Methode ist aber ähnlich aufwendig wie α -Spektrometrie und deshalb hier nicht sinnvoll.

erreichbare NWG: 1.28 Bq $\Leftrightarrow$ 4.92E-08 g, R_{NWG} 0.0855

LEP-Messung: LEP-Spektrometrie wird die geforderte NWG wohl nicht erreicht. Sie ist ähnlich aufwendig wie α -Spektrometrie und hier nicht sinnvoll.

erreichbare NWG: 3.92 Bq $\Leftrightarrow$ 1.50E-07 g, R_{NWG} 0.26

γ -Messung: Falls die 87 keV- γ -Linie spezifisch ist (dazu muß Np radiochemisch abgetrennt werden) könnte die geforderte NWG gerade erreicht werden.

erreichbare NWG: 15. Bq $\Leftrightarrow$ 5.90E-07 g, R_{NWG} 1.03

ICP-MS: Vielleicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 6.18 Bq $\Leftrightarrow$ 2.37E-07 g, R_{NWG} 0.41

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das am ehesten geeignete Verfahren, ICP-MS und eventuell LEP- und γ -Spektrometrie sollten ausprobiert werden.

^{236}Pu 2.85 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.085\text{E-}14 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.967\text{E+}13 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 160.0 Bq $\Leftrightarrow$ 8.14E-12 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5721 keV	32 %	0.01 lps
	5768 keV	68 %	0.01 lps
e^-	>10 keV	43 %	2 lps
Röntgen	11 - 20 keV	12 %	2 lps
γ	$\Sigma < 0.1$ %		

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: $0.01 \text{ Bq} \Leftrightarrow 7.48\text{E-}16 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 9.19\text{E-}05$

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist viel weniger empfindlich aber ähnlich aufwendig wie α -Spektrometrie.

erreichbare NWG: $4.65 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.37\text{E-}13 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.0291$

LEP-Messung: LEP-Spektrometrie ist kaum geeignet, weil die Röntgenlinien nicht nuklidspezifisch sind.

erreichbare NWG: $17. \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.47\text{E-}13 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.10$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: $4.64\text{E+}06 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.36\text{E-}07 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 2.90\text{E+}04$

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das einzige geeignete Verfahren.

^{238}Pu 87.7 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.578E-12 g

1 g $\Leftrightarrow$ 6.337E+11 Bq

geforderte NWG: 62.0 Bq $\Leftrightarrow$ 9.78E-11 g

aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5456 keV	28 %	0.01 lps
	5499 keV	72 %	0.01 lps
e^-	17 - 42 keV	37 %	2 lps
Röntgen	14 - 20 keV	11 %	2 lps
γ	>100 keV	$\Sigma < 0.01$ %	

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 2.19E-14 g, R_{NWG} 2.24E-04

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist wahrscheinlich auch geeignet, aber ähnlich aufwendig wie α -Spektrometrie und weniger empfindlich.

erreichbare NWG: 5.41 Bq $\Leftrightarrow$ 8.53E-12 g, R_{NWG} 0.0872

LEP-Messung: LEP-Spektrometrie ist kaum geeignet, weil die Röntgenlinien nicht nuklidspezifisch sind.

erreichbare NWG: 18. Bq $\Leftrightarrow$ 2.87E-11 g, R_{NWG} 0.29

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 1.51E+05 Bq $\Leftrightarrow$ 2.38E-07 g, R_{NWG} 2433.

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das einzige geeignete Verfahren.

^{239}Pu 24100 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 4.355E-10 g

1 g $\Leftrightarrow$ 2.296E+09 Bq

geforderte NWG: 58.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.53E-08 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5143 keV	15 %	0.01 Ips
	5156 keV	73 %	0.01 Ips
γ	>100 keV	$\Sigma < 0.01$ %	

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 5.97E-12 g, R_{NWG} 2.36E-04

γ -Messung: Nicht geeignet.

ICP-MS: Wenn der hier angenommene Wert für die geforderte NWG zutrifft, ist die ICP-MS nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 549. Bq $\Leftrightarrow$ 2.39E-07 g, R_{NWG} 9.46

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das einzige, aber auch nur beschränkt geeignete Verfahren, weil die Linien von ^{240}Pu mit einem Halbleiterdetektor (Sperschichtzähler) und auch mit der Gitterionisationskammer nicht getrennt werden können. Bei der Radionuklidanalyse gibt man sich meistens mit der Angabe der Summe der Aktivitäten dieser beiden Nuklide zufrieden. Je nachdem, welche NWG tatsächlich erforderlich ist, sollte ICP-MS ausprobiert werden.

^{240}Pu 6563 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.191E-10 g

1 g $\Leftrightarrow$ 8.398E+09 Bq

geforderte NWG: 58.0 Bq $\Leftrightarrow$ 6.91E-09 g

aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5124 keV	26 %	0.01 lps
	5168 keV	74 %	0.01 lps
γ	160 keV	.00042 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 1.61E-12 g,

R_{NWG} 2.33E-04

γ -Messung: Nicht geeignet.

ICP-MS: Wenn der hier angenommene Wert für die geforderte NWG zutrifft, ist die ICP-MS nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 2015. Bq $\Leftrightarrow$ 2.40E-07 g,

R_{NWG} 35.

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das einzige, aber auch nur beschränkt geeignete Verfahren, weil die Linien von ^{239}Pu mit einem Halbleiterdetektor (Sperrschichtzähler) und auch mit der Gitterionisationskammer nicht getrennt werden können. Je nachdem, welche NWG tatsächlich erforderlich ist, sollte ICP-MS ausprobiert werden.

^{241}Pu 14.4 a

Ringversuch

1 Bq $\Leftrightarrow$ 2.624E-13 g

1 g $\Leftrightarrow$ 3.811E+12 Bq

geforderte NWG: 1200.0 Bq $\Leftrightarrow$ 3.15E-10 g

aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α		$\Sigma < 0.0025\%$	
β^-	$> 10 \text{ keV}$	14 %	0.02 lps
γ		$\Sigma < 0.0006\%$	

Bestimmungsmethoden

α -Messung: Nicht möglich

β -Messung: Das β -Spektrum hat eine ähnliche Energieverteilung wie das von Tritium. Seine Messung ist aber schwieriger, weil Plutonium nicht so einfach abgetrennt werden kann. Auf alle Fälle werden andere Pu-Isotope in der Pu-Fraktion sein, deren α -Strahlung stören könnte. Hier wäre ein modernes LSC- Meßgerät, das α - und β -Strahlung an der Impulsform unterscheiden und getrennt zählen kann, eine nützliche Sache.

erreichbare NWG: 0.14 Bq $\Leftrightarrow$ 3.75E-14 g,

R_{NWG} 1.19E-04

γ -Messung: Nicht geeignet.

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 9.19E+05 Bq $\Leftrightarrow$ 2.41E-07 g,

R_{NWG} 765.

Zusammenfassung: Das Nuklid ist schwierig zu bestimmen. Die LSC-Messung nach radiochemischer Abtrennung ist noch am ehesten geeignet. Das β -Spektrum hat eine ähnliche Verteilung wie Tritium ($E_{\beta, \text{max}} = 21 \text{ keV}$). Das Meßgerät muß dieses Spektrum von der α -, e^- - und β -Strahlung anderer Nuklide in der Plutonium-Fraktion unterscheiden können.

^{242}Pu 3.76E05 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 6.879E-09 g

1 g $\Leftrightarrow$ 1.454E+08 Bq

geforderte NWG: 60.0 Bq $\Leftrightarrow$ 4.13E-07 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4856 keV	22 %	0.01 lps
	4901 keV	78 %	0.01 lps
e^-	17 - 44 keV	29 %	2 lps
Röntgen	13 - 17 keV	8 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 8.82E-11 g, R_{NWG} 2.14E-04

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist nicht geeignet; die NWG ist nicht ausreichend. Außerdem ist die Methode genau so aufwendig wie α -Spektrometrie.

LEP-Messung: LEP-Spektrometrie ist nicht geeignet, weil die Röntgenlinien nicht charakteristisch für das Nuklid sind und weil die NWG zu hoch ist. Außerdem ist die Methode fast so aufwendig wie α -Spektrometrie.

erreichbare NWG: 25. Bq $\Leftrightarrow$ 1.72E-07 g, R_{NWG} 0.42

ICP-MS: Ist vielleicht geeignet, muß aber sicher optimiert werden.

erreichbare NWG: 35. Bq $\Leftrightarrow$ 2.42E-07 g, R_{NWG} 0.59

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das einzige geeignete Verfahren; aber Linienüberlagerungen müssen noch geklärt werden. LEP-Spektrometrie und ICP-MS sollten ausprobiert werden.

^{244}Pu 8.26E07 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 1.524E-06 g

1 g $\Leftrightarrow$ 6.563E+05 Bq

geforderte NWG: 60.0 Bq $\Leftrightarrow$ 9.14E-05 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4546 keV	19 %	0.01 Ips
	4589 keV	81 %	0.01 Ips
e^-		$\Sigma < 0.8\%$	
Röntgen + γ		$\Sigma < 1\%$	

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 1.88E-08 g, R_{NWG} 2.06E-04

Elektronenmessung: Sehr geringe e^- -Intensität; nicht geeignet.

γ -Messung: Sehr schwache Röntgenlinien; nicht geeignet.

ICP-MS: Ist sehr wahrscheinlich geeignet.

erreichbare NWG: 0.16 Bq $\Leftrightarrow$ 2.44E-07 g, R_{NWG} 0.0027

NAA: Der Wirkungsquerschnitt ist zwar nicht sehr groß ($\sigma_0 = 1.7 \text{ b}$, $I_0 = 40.6 \text{ b}$) aber er dürfte ausreichend sein, um ^{244}Pu in einer abgetrennten Plutoniumfraktion zu bestimmen.

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das am besten geeignete Verfahren; aber Linienüberlagerungen müssen noch geklärt werden. ICP-MS sollte ausprobiert werden, NAA bei Gelegenheit auch.

^{241}Am 433 a

Ringversuch

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 7.889\text{E-}12 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.268\text{E+}11 \text{ Bq}$$

$$\text{geforderte NWG: } 53.0 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.18\text{E-}10 \text{ g}$$

aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5443 keV	13 %	0.01 lps
	5486 keV	85 %	0.01 lps
e^-	11 - 54 keV	103 %	2 lps
Röntgen	14 - 21 keV	38 %	2 lps
γ	59 keV	36 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

$$\text{erreichbare NWG: } 0.01 \text{ Bq} \Leftrightarrow 9.28\text{E-}14 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 2.22\text{E-}04$$

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist vielleicht geeignet, aber die erreichbare NWG liegt im Bereich der geforderten. Die Methode ist ähnlich aufwendig wie α -Spektrometrie und weniger empfindlich.

$$\text{erreichbare NWG: } 1.94 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.53\text{E-}11 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 0.0366$$

LEP-Messung: LEP-Spektrometrie ist kaum geeignet, weil die Röntgenlinien nicht nuklidspezifisch sind und weil die erreichbare NWG nicht wesentlich niedriger ist als die geforderte. Die Methode ist ähnlich aufwendig wie α -Spektrometrie und weniger empfindlich.

$$\text{erreichbare NWG: } 5.26 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.15\text{E-}11 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 0.0993$$

γ -Messung: Messung mit LEP-Spektrometrie ist möglich, eine radiochemische Trennung vielleicht notwendig.

$$\text{erreichbare NWG: } 5.56 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.38\text{E-}11 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 0.10$$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 30548. \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.41\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 576.$$

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das am besten geeignete Verfahren; aber Linienüberlagerungen müssen noch geklärt werden. γ -Spektrometrie kann in günstigen Fällen ohne, in allen Fällen aber mit radiochemischer Trennung zum Erfolg führen. Elektronenspektrometrie und LEP-Spektrometrie sind eventuell auch geeignet.

^{242m}Am 141 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.580\text{E-}12 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 3.877\text{E+}11 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 49.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.26E-10 g **aus Tabelle 3**

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α		$\Sigma < 0.5 \%$	
e^-	20 - 50 keV	120 %	2 lps
Röntgen	15 - 22 keV	25 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung: Nicht geeignet.

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist, von der NWG her, vielleicht geeignet.

erreichbare NWG: 1.67 Bq $\Leftrightarrow$ 4.30E-12 g, R_{NWG} 0.0340

LEP-Messung: LEP-Spektrometrie ist kaum geeignet, weil die Röntgenlinien nicht nuklidspezifisch sind.

erreichbare NWG: 8.00 Bq $\Leftrightarrow$ 2.06E-11 g, R_{NWG} 0.16

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 93811. Bq $\Leftrightarrow$ 2.42E-07 g, R_{NWG} 1915.

Zusammenfassung: Die Elektronenspektrometrie ist wohl das am besten geeignete Verfahren. ^{242m}Am kann auch über den kurzlebigen Grundzustand gemessen werden; aber auch hier wäre Elektronenspektrometrie die beste Methode.

^{243}Am 7380 a

Ringversuch

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.356\text{E-}10 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 7.376\text{E+}09 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 53.0 Bq $\Leftrightarrow$ 7.19E-09 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5234 keV	11 %	0.01 lps
	5276 keV	88 %	0.01 lps
γ	75 keV	60 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 1.54E-12 g, R_{NWG} 2.14E-04

γ -Messung: Die Messung ist mit γ -Spektrometrie, besser wohl mit LEP-Spektrometrie möglich. Eine radiochemische Trennung kann notwendig sein.

erreichbare NWG: 3.33 Bq $\Leftrightarrow$ 4.52E-10 g, R_{NWG} 0.0629

ICP-MS: Wahrscheinlich nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 1792. Bq $\Leftrightarrow$ 2.43E-07 g, R_{NWG} 34.

NAA: Der Wirkungsquerschnitt ist ziemlich groß ($\sigma_0 = 1.7 \text{ b}$, $I_0 = 40.6 \text{ b}$). Vielleicht ist damit eine Bestimmung in einer abgetrennten Americiumfraktion möglich.

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das am besten geeignete Verfahren; aber Linienüberlagerungen müssen noch geklärt werden. γ -Spektrometrie kann vielleicht ohne, sicher aber mit radiochemischer Trennung zum Erfolg führen. Falls diese Methoden nicht zum Ziel führen, muß ICP-MS ausprobiert werden, NAA evtl. auch.

^{244}Am 10.1 h

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.125\text{E-}17 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 4.705\text{E+}16 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: $1.40\text{E+}06 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.98\text{E-}11 \text{ g}$ aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
β^-	>10 keV	94 %	0.01 lps
e^-	18 - 148 keV	317 %	2 lps
Röntgen	12 - 23 keV	104 %	2 lps
γ	746 keV	67 %	2 lps
	900 keV	28 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

β -Messung: Möglich, aber nicht sinnvoll.

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist wahrscheinlich geeignet, aber wohl nicht erforderlich.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.63 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.34\text{E-}17 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 4.51\text{E-}07$$

LEP-Messung: Nicht sinnvoll, weil Röntgenlinien nicht nuklidspezifisch.

$$\text{erreichbare NWG: } 1.92 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.09\text{E-}17 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 1.37\text{E-}06$$

γ -Messung: Gut möglich.

$$\text{erreichbare NWG: } 2.99 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.34\text{E-}17 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 2.13\text{E-}06$$

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

$$\text{erreichbare NWG: } 1.15\text{E+}10 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.44\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 8200.$$

Zusammenfassung und Bemerkungen

Das Nuklid hat nur eine kurze HWZ und keine Vorläufernuklide. Es ist unklar, warum danach gesucht werden soll. Eine Messung wäre mit der γ -Spektrometrie sicher problemlos möglich.

^{242}Cm 163 d

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.165\text{E-}15 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.225\text{E+}14 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 15000.0 Bq $\Leftrightarrow$ 1.22E-10 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	6070 keV	25 %	0.01 lps
	6113 keV	74 %	0.01 lps
γ		$\Sigma < 0.04 \%$	
Röntgen	14 - 22 keV	10 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 1.10E-16 g, R_{NWG} 9.01E-07

LEP-Messung: Messung mit LEP-Spektrometrie möglich, aber die Röntgenlinien sind nicht nuklidspezifisch.

erreichbare NWG: 20. Bq $\Leftrightarrow$ 1.63E-13 g, R_{NWG} 0.0013

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 2.96E+07 Bq $\Leftrightarrow$ 2.42E-07 g, R_{NWG} 1976.

Zusammenfassung: Das relativ kurzlebige Nuklid dürfte in Abfallgebinden kaum noch vorhanden sein. Die α -Spektrometrie ist wohl das einzige geeignete Verfahren; aber Linienüberlagerungen müssen noch geklärt werden.

^{243}Cm 28.5 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 5.236\text{E-}13 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.910\text{E+}12 \text{ Bq}$$

$$\text{geforderte NWG: } 6500.0 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.40\text{E-}09 \text{ g}$$

aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5742 keV	11 %	0.01 lps
	5786 keV	73 %	0.01 lps
e^-	18 - 250 keV	138 %	2 lps
Röntgen	12 - 22 keV	43 %	2 lps
γ	104 keV	23 %	2 lps
	228 keV	11 %	2 lps
	278 keV	14 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

$$\text{erreichbare NWG: } 0.01 \text{ Bq} \Leftrightarrow 7.17\text{E-}15 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 2.11\text{E-}06$$

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist möglich; einige Linien oberhalb 100 keV sind spezifisch.

$$\text{erreichbare NWG: } 1.45 \text{ Bq} \Leftrightarrow 7.59\text{E-}13 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 2.23\text{E-}04$$

γ -Messung: Gut möglich.

$$\text{erreichbare NWG: } 8.70 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.55\text{E-}12 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 0.0013$$

ICP-MS: Vielleicht hinreichend empfindlich.

$$\text{erreichbare NWG: } 4.64\text{E+}05 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.43\text{E-}07 \text{ g, } R_{\text{NWG}} \quad 71.$$

Zusammenfassung: α -Messung ist möglich, aber Linienüberlagerungen müssen überprüft werden. γ -Spektrometrie ist einfacher und die NWG ist ausreichend. Falls ohne ICP-MS ohne besonderes Trennverfahren angewendet wird und das Nuklid wird dabei gefunden, dann ist es gut. Aber die Entwicklung eines speziellen Trennverfahrens für diese Methode ist vermutlich nicht gerechtfertigt, weil die anderen Methoden mit größerer Wahrscheinlichkeit zum Ziel führen.

^{244}Cm 18.1 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 3.339\text{E-}13 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 2.995\text{E+}12 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 82.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.74E-11 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5763 keV	24 %	0.01 lps
	5805 keV	76 %	0.01 lps
γ		$\Sigma < 0.03 \%$	
Röntgen	14 - 22 keV	9 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 4.39E-15 g, R_{NWG} 1.60E-04

LEP-Messung: Messung mit LEP-Spektrometrie möglich, aber Röntgenlinien nicht spezifisch.

erreichbare NWG: 22. Bq $\Leftrightarrow$ 7.42E-12 g, R_{NWG} 0.27

ICP-MS: Nicht empfindlich genug.

erreichbare NWG: 7.31E+05 Bq $\Leftrightarrow$ 2.44E-07 g, R_{NWG} 8912.

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist wohl das einzige geeignete Verfahren; aber Linienüberlagerungen müssen noch geklärt werden.

^{245}Cm 8500 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.574\text{E-}10 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 6.352\text{E+}09 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 51.0 Bq $\Leftrightarrow$ 8.03E-09 g aus Tabelle 6

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5362 keV	93 %	0.01 lps
e^-	11 - 152 keV	478 %	2 lps
Röntgen	12 - 22 keV	123 %	2 lps
γ	99 keV	21 %	2 lps
	104 keV	34 %	2 lps
	117 keV	12 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: $0.01 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.69\text{E-}12 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 2.11\text{E-}04$

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist möglich; einige Linien oberhalb 100 keV sind spezifisch.

erreichbare NWG: $0.42 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.59\text{E-}11 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 0.0082$

LEP-Messung: Messung mit LEP-Spektrometrie möglich, aber Röntgenlinien nicht spezifisch.

erreichbare NWG: $1.63 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.56\text{E-}10 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 0.0319$

γ -Messung: Die Messung der 99 keV-Linie ist mit LEP- und mit normaler γ -Spektrometrie möglich; vielleicht ist eine radiochemische Abtrennung von Curium erforderlich.

erreichbare NWG: $5.88 \text{ Bq} \Leftrightarrow 9.26\text{E-}10 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 0.12$

ICP-MS: Vielleicht hinreichend empfindlich.

erreichbare NWG: $1556. \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.45\text{E-}07 \text{ g},$ $R_{\text{NWG}} \quad 31.$

Zusammenfassung: α -Messung ist möglich, aber Linienüberlagerungen müssen überprüft werden. γ -Spektrometrie ist einfacher und die NWG ist wahrscheinlich ausreichend. ICP-MS sollte überprüft werden.

^{246}Cm 4730 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.797\text{E-}11 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 1.137\text{E+}10 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 53.0 Bq $\Leftrightarrow$ 4.66E-09 g aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5343 keV	21 %	0.01 lps
	5386 keV	79 %	0.01 lps
e^-	18 - 43 keV	27 %	2 lps
Röntgen	12 - 22 keV	8 %	2 lps
γ	45 keV	0.027 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: $0.01 \text{ Bq} \Leftrightarrow 1.11\text{E-}12 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 2.39\text{E-}04$

Elektronenmessung: Elektronenspektrometrie ist möglich, aber die Linien sind nicht sehr stark.

erreichbare NWG: $7.41 \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.52\text{E-}10 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.14$

γ -Messung: NWG sehr hoch.

erreichbare NWG: $7407. \text{ Bq} \Leftrightarrow 6.52\text{E-}07 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 139.76$

LEP-Messung: LEP-Messung müßte hinsichtlich Störung durch die Röntgenlinien anderer Cm-Isotope geprüft werden, ist aber wohl nicht geeignet.

erreichbare NWG: $25. \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.20\text{E-}09 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.47$

ICP-MS: Vielleicht hinreichend empfindlich.

erreichbare NWG: $2796. \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.46\text{E-}07 \text{ g}, \quad R_{\text{NWG}} \quad 53.$

Zusammenfassung: α -Messung ist möglich, aber Linienüberlagerungen müssen überprüft werden. Dasselbe gilt für Elektronenspektrometrie. ICP-MS sollte versucht werden.

^{247}Cm 1.56E07 a

$$1 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.913\text{E-}07 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} \Leftrightarrow 3.433\text{E+}06 \text{ Bq}$$

geforderte NWG: 100.0 Bq $\Leftrightarrow$ 2.91E-05 g aus Tabelle 4

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	4869 keV	71 %	0.01 lps
	5266 keV	14 %	0.01 lps
γ	404 keV	72 %	2 lps

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

$$\text{erreichbare NWG: } 0.01 \text{ Bq} \Leftrightarrow 4.10\text{E-}09 \text{ g,} \quad R_{\text{NWG}} \quad 1.41\text{E-}04$$

γ -Messung: Gut möglich.

$$\text{erreichbare NWG: } 2.78 \text{ Bq} \Leftrightarrow 8.09\text{E-}07 \text{ g,} \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.0278$$

ICP-MS: Gut möglich.

$$\text{erreichbare NWG: } 0.85 \text{ Bq} \Leftrightarrow 2.47\text{E-}07 \text{ g,} \quad R_{\text{NWG}} \quad 0.0085$$

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist gut geeignet. γ -Spektrometrie ebenfalls und wahrscheinlich ausreichend. ICP-MS ist vermutlich gut geeignet und Störungen durch andere isobare Atome oder Moleküle sind kaum zu erwarten.

^{248}Cm 3.4E5 a

1 Bq $\Leftrightarrow$ 6.375E-09 g

1 g $\Leftrightarrow$ 1.569E+08 Bq

geforderte NWG: 9.1 Bq $\Leftrightarrow$ 5.80E-08 g

aus Tabelle 3

Strahlung	Energie	Häufigkeit	minimal meßbare Emissionsrate
α	5035 keV	17 %	0.01 Ips
	5078 keV	75 %	0.01 Ips
γ	Von spontanen Spaltprodukten.		

Bestimmungsmethoden

α -Messung:

erreichbare NWG: 0.01 Bq $\Leftrightarrow$ 8.50E-11 g,

R_{NWG} 0.0015

γ -Messung: Müßte untersucht werden.

ICP-MS: Wahrscheinlich möglich.

erreichbare NWG: 39. Bq $\Leftrightarrow$ 2.48E-07 g,

R_{NWG} 4.28

Zusammenfassung: Die α -Spektrometrie ist gut geeignet. Für die γ -Spektrometrie käme die Messung der durch Spontanspaltung aus einer abgetrennten Curiumfraktion sich nachbildenden, kurzlebigen Spaltprodukte infrage. Die Messung der bei der Spontanspaltung emittierten Neutronen ist eine weitere Möglichkeit, die untersucht werden muß. ICP-MS sollte ausprobiert werden; Störungen durch andere isobare Atome oder Moleküle sind kaum zu erwarten.

Jül-3207
März 1996
ISSN 0944-2952