

- [3] a) J. B. Vincent, J. C. Huffman, G. Christou, Q. Li, M. A. Nanny, D. N. Hendrickson, R. H. Fong, R. H. Fish, *J. Am. Chem. Soc.* **1988**, *110*, 6898; b) R. H. Fish, M. S. Konings, K. J. Oberhausen, R. H. Fong, W. M. Yu, G. Christou, J. B. Vincent, D. K. Coggan, R. M. Buchanan, *Inorg. Chem.* **1991**, *30*, 3002; zit. Lit.; c) N. Kitajima, H. Fukui, Y. Moro-oka, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **1988**, 485; d) R. A. Leising, J. Kim, M. A. Pérez, L. Que, Jr., *J. Am. Chem. Soc.* **1993**, *115*, 9524; e) S. Ménage, J. M. Vincent, C. Lambeaux, G. Chottard, A. Grand, M. Fontecave, *Inorg. Chem.* **1993**, *32*, 4766.
- [4] A. Trefry, J. Hirzmann, S. J. Yewdall, P. M. Harrison, *FEBS Lett.* **1992**, *302*, 108.
- [5] Abkürzungen: OAc = Acetat, phen = 1,10-Phenanthrolin, Me<sub>2</sub>bipy = 4,4'-Dimethyl-2,2'-bipyridin, EtOAc = thylacetat, T1,4DMIP = Tris-(1,4-dimethylimidazol-2-yl)phosphan.
- [6] Röntgenaugliche rote Einkristalle (0.4 × 0.2 × 0.1 mm) erhielt man aus Ethylacetat/Acetonitril. Der Komplex **2** · EtOAc kristallisiert im monoklinen System, Raumgruppe *P2<sub>1</sub>/c*, *a* = 13.336(4), *b* = 22.804(6), *c* = 25.181(7) Å,  $\beta$  = 92.41(2) $^\circ$ , *V* = 7668.7 Å<sup>3</sup>, *Z* = 4. Mit 5299 beobachteten unabhängigen Reflexen,  $I > 3.0\sigma(I)$ , die bei 293 K mit Mo<sub>Kα</sub>-Strahlung ( $\lambda = 0.71069$  Å) bis zu  $2\theta = 26^\circ$  auf einem Enraf-Nonius CAD4F-Röntgendiffraktometer aufgenommen wurden, wurde die Struktur mit Direkten Methoden gelöst und zu  $R = 0.074$ ,  $R_w = 0.099$  verfeinert. Weitere Einzelheiten zur Kristallstrukturerforschung können beim Direktor des Cambridge Crystallographic Data Centre, 12 Union Road, GB-Cambridge CB2 1EZ, unter Angabe des vollständigen Literaturzitats angefordert werden.
- [7] V. Van Kai, G. Newton, D. M. Kurtz, *Inorg. Chem.* **1992**, *31*, 34.
- [8] N. Kitajima, H. Amagai, N. Tamura, M. Ito, Y. Moro-oka, K. Heerwag, A. Pénicaud, R. Mathur, C. A. Reed, P. D. Boyd, *Inorg. Chem.* **1993**, *32*, 3583.
- [9] Die magnetische Suszeptibilität wurde an einer mikrokristallinen Probe von 17.44 mg mit einem Quantum-Design-MMPMS-SQUID-Magnetometer gemessen. Die Daten wurden im Bereich 2–300 K bei vier Feldstärken von 3, 2, 1, 0.5 Tesla aufgenommen.
- [10] S. M. Gorun, S. J. Lippard, *Inorg. Chem.* **1991**, *30*, 1625.
- [11] EPR-Spektren von **2** im festen Zustand und in Acetonitril stimmen überein, d.h. **2** dissoziert in Lösung nicht. Im Gegensatz zu den <sup>1</sup>H-NMR-Spektren von [Fe<sub>3</sub>(μ-OH)<sub>2</sub>(μ-OAc)<sub>4</sub>(T1,4DMIP)<sub>2</sub>](PF<sub>6</sub>)<sub>3</sub>, oder anderen Oxooxo(III)-Komplexen wie **1** ist das Spektrum von **2** sehr komplex und zeigt Protonenresonanzsignale im Bereich 90  $\geq \delta \geq -60$ . Die Signale des Methacetylatoliganden konnten durch Vergleich derjenigen der Trifluoracetat-Verbindung zugeordnet werden ( $\delta_{CH_3} = 39$ ). Bei Resonanz-Raman-Untersuchungen findet man Fe-O-Schwingungen einer linearen Fe-O-Fe-Einheit.
- [12] J. J. Girerd, G. C. Papaefthymiou, A. D. Watson, E. Gamp, K. S. Hagen, N. Edelstein, R. B. Frankel, R. H. Holm, *J. Am. Chem. Soc.* **1984**, *106*, 5941.
- [13] a) W. R. Hagen, *Adv. Inorg. Chem.* **1992**, *38*, 165; b) S. Wickman, *J. Chem. Phys.* **1965**, *42*, 2113.
- [14] Mößbauer-Untersuchungen wurden mit einem konventionellen Spektrometer mit konstanter Beschleunigung durchgeführt. Es wurde eine 50 mCi-<sup>57</sup>Co(RH-Matrix)-Quelle und als Absorber eine Probe von 120 mg mikrokristallinem Pulver von **2** verwendet. Mit einem MD-306-Oxford-Kryostaten konnten Spektren im Temperaturbereich 4–300 K aufgenommen werden.
- [15] N. N. Greenwood, T. C. Gibbs in *Mössbauer Spectroscopy*, Chapman & Hall, New York, 1971.
- [16] Zum Nachweis von Relaxationsphänomenen muß der statische Zustand erreicht und dann das interne Magnetfeld beobachtet werden. Das kann durch das Anlegen eines schwachen äußeren Feldes erreicht werden. Die magnetischen Fluktuationen wurden durch Anlegen eines äußeren Feldes von 2 Tesla bei 7 K eingefroren. Aus dem resultierenden Zeeman-Spektrum konnte ein effektives inneres Magnetfeld von ca. 3.9 T bestimmt werden.

## Spurenbestimmung der Radionuclide <sup>90</sup>Sr und <sup>89</sup>Sr in Umweltproben I: Laser-Massenspektrometrie\*\*

Jörg Lantzsch, Bruce A. Bushaw, Günter Herrmann, Heinz-Jürgen Kluge, Ludwin Monz, Sabine Nieß, Ernst W. Otten, Richard Schwalbach, Martin Schwarz, Judith Stenner, Norbert Trautmann, Klaus Walter, Klaus Wendt\* und Klaus Zimmer

Strontium-90 gehört zu den giftigsten Radionucliden; seine Toxizität wird nur von der des natürlichen Poloniums-210 (aus Blei-210) und der des Radiums-226 sowie von der einiger Aktinoidennuclide übertrffen<sup>[1]</sup>. Grund dafür ist seine lange Halbwertszeit von 28.5 Jahren sowie seine dauerhafte und komplex verlaufende Speicherung im blutbildenden Knochensystem<sup>[2]</sup>. Strontium-90 entsteht bei der Kernspaltung von Uran-235 und bei der von Plutonium-239 in hohen Ausbeuten; durch die oberirdischen Kernwaffentests in den fünfziger und sechziger Jahren wurde es weltweit verbreitet. In der Bundesrepublik Deutschland betrug Anfang der achtziger Jahre die Bodenbelegung an Strontium-90 durchschnittlich 2 kBq m<sup>-2</sup><sup>[3]</sup>. Dieser Wert hat sich durch Zufuhr von Strontium-90 nach dem Reaktorunglück in Tschernobyl Ende April 1986 nicht wesentlich erhöht; im Mainzer Raum kamen 0.02 kBq m<sup>-2</sup> hinzu, wie Messungen von Luftfiltern und Regenwasser ergaben<sup>[4]</sup>. Allerdings dauerte es damals etwa zwei Wochen, bis verlässliche Daten über diese Zufuhr vorlagen – viel zu lange für den Fall akuter Kontamination. Hier wurde deutlich, wie unzulänglich die übliche, auf Radioaktivitätsmessung beruhende Bestimmung von Strontium-90 in Umweltproben ist, wenn frische Spaltproduktgemische vorliegen.

In dieser und den beiden folgenden Zuschriften<sup>[5, 6]</sup> wird über alternative physikalische Bestimmungsmethoden und chemische Trennverfahren für Strontium-90 und -89 in frischen Fall-outgemischen berichtet. Diese Methoden und Verfahren wurden in einem koordinierten Vorgehen dreier Arbeitsgruppen mit dem Ziel entwickelt, innerhalb eines Tages zuverlässige Analysergebnisse liefern zu können. Als Alternative zu den radiometrischen Methoden wurden zwei Verfahren erprobt: die Resonanzspektroskopie mit Lasern in kollinearer Geometrie an einem Strahl aus massengetrennten Atomen und die Beschleuniger-Massenspektrometrie<sup>[5]</sup>. Weiterhin wurde ein chemisches Trennverfahren, eine Flüssig-flüssig-Extraktion mit Kronenethern, ausgearbeitet und eine Schnellmethode für die Bestimmung radioaktiver Strontiumisotope auf Grundlage der Ionenaustauschchromatographie mit nachgeschalteter On-line- $\beta$ -Messung entwickelt<sup>[6]</sup>.

Probleme macht der Nachweis von Strontium-90 in frischen Fall-outgemischen, weil es vom kürzerlebigen Strontium-89 ( $t_{1/2} = 50.5$  d) verdeckt wird; das <sup>89</sup>Sr/<sup>90</sup>Sr-Verhältnis betrug im Tschernobyl-Fallout 11/1<sup>[7]</sup> bis 17/1<sup>[4]</sup>; im Kernwaffen-fallout kann es bei 200/1 liegen<sup>[8]</sup>. Die beiden Strontiumisotope

[\*] Dr. K. Wendt, Dipl.-Phys. J. Lantzsch, B. A. Bushaw, M. Sc., Prof. Dr. H.-J. Kluge, Dr. L. Monz, Prof. Dr. E. W. Otten, Dipl.-Phys. R. Schwalbach, Dipl.-Phys. M. Schwarz, Dipl.-Phys. J. Stenner, Dipl.-Phys. K. Zimmer  
Institut für Physik der Universität  
Staudingerweg 7, D-55099 Mainz  
Telefax: Int. +6131/39-2994

Prof. Dr. G. Herrmann, Dipl.-Chem. S. Nieß, Dr. N. Trautmann,  
Dr. K. Walter  
Institut für Kernchemie der Universität Mainz

[\*\*] Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, vom Bundesamt für Strahlenschutz und vom Umweltzentrum der Universität Mainz gefördert.

werden als reine  $\beta^-$ -Strahler bei der sonst so leistungsfähigen Analyse von Falloutgemischen durch hochauflösende  $\gamma$ -Strahlungsspektroskopie nicht erfaßt, sondern müssen chemisch isoliert und durch eine viel unspezifischere Messung der  $\beta^-$ -Strahlen bestimmt werden. Zum Nachweis von wenig Strontium-90 neben viel Strontium-89 bei insgesamt niedriger Aktivität nutzt man seit langem<sup>[9]</sup> die unterschiedlichen Eigenschaften ihrer Zerfallsprodukte: Yttrium-90 ist ein  $\beta^-$ -Strahler mit  $t_{1/2} = 64$  h, Yttrium-89 hingegen stabil. In der gereinigten Strontiumfraktion bildet sich Yttrium-90 aus Strontium-90 nach. Nach einigen Tagen

wird es chemisch abgetrennt, gemessen und das Abklingen seiner Aktivität über einige Tage verfolgt, um die Identität sicherzustellen. So ergibt sich die Strontium-90-Aktivität; die Strontium-89-Aktivität resultiert als Differenz zur Gesamt- $\beta^-$ -Aktivität der Strontiumfraktion.

Das Abwarten von Bildung und Zerfall des Ytriums-90 lässt sich vermeiden, indem bei der simultanen Messung beider Strontiumisotope Unterschiede in den  $\beta^-$ -Zerfallsenergien genutzt werden (maximale Strahlungsenergie:  ${}^{90}\text{Sr}$  0.55 MeV,  ${}^{89}\text{Sr}$  1.49 MeV). Mit einem Flüssigszintillator werden beide Nuclide gemeinsam, über die Tscherenkow-Strahlung nur Strontium-89 erfaßt. Dem Verfahren sind bei hohem  ${}^{89}\text{Sr}/{}^{90}\text{Sr}$ -Verhältnis und niedriger Aktivität indes Grenzen gesetzt<sup>[10]</sup>.

Auch der übliche chemische Trennungsgang für Strontium in frischen Falloutgemischen<sup>[9]</sup> ist unzulänglich. Aus der Probenlösung werden Strontium und Barium nach Zusatz von inaktiven Trägern mit konzentrierter Salpetersäure als Nitrat gefällt; dadurch wird unter anderem das häufig vorhandene, inaktive Calcium entfernt. Barium wird anschließend als Chromatniederschlag vom Strontium getrennt. Dieser Schritt ist besonders kritisch, weil in frischem Fallout das Spaltprodukt Barium-140 ( $t_{1/2} = 12.8$  d) noch etwa viermal häufiger auftritt als Strontium-89, sein Folgeprodukt Lanthan-140 ( $t_{1/2} = 40$  h) mit dem Yttrium-90 abgetrennt wird und dieses so vortäuschen kann.

Im folgenden wird ein Nachweisverfahren für Strontium-90 und -89 durch eine Kombination von Laserspektroskopie und Massenspektrometrie vorgestellt<sup>[11a]</sup>. Das Verfahren wurde für Luftfilterproben entwickelt, weil in diesen die Zufuhr frischer Spaltprodukte am ehesten erkannt werden kann. Dabei sollen Konzentrationen von jeweils  $1 \times 10^8$  Atomen pro  $1000 \text{ m}^3$  Luft, entsprechend Mengen von  $1.5 \times 10^{-14} \text{ g}$  und Aktivitäten von  $80 \text{ mBq}$   ${}^{90}\text{Sr}$  und  $16 \text{ Bq}$   ${}^{89}\text{Sr}$ , noch gut erfaßt werden können. Dies waren typische Konzentrationen in Deutschland nach dem Tschernobyl-Unglück. Hauptproblem beim massenspektrometrischen und optischen Nachweis ist das Vorhandensein von bis zu  $10^{18}$  stabilen Strontium-Atomen (150 µg) – zu 82.6%  ${}^{88}\text{Sr}$  – in solchen Proben. Daher ist eine Selektivität von  $10^{10}$  für die nachzuweisenden Radioisotope gegenüber dem stabilen Strontium-88 erforderlich. Weiterhin wird eine Effizienz von  $10^{-5}$  für das gesamte Verfahren verlangt, um beim Vorliegen von  $10^8$  Atomen den statistischen Meßfehler klein zu halten. Für die Durchführung des Verfahrens soll, einschließlich Probenahme und chemischer Aufarbeitung, höchstens ein Tag benötigt werden, und die simultane Messung der beiden Isotope Strontium-90 und -89 soll möglich sein.

Wir verwenden eine Kombination von konventioneller magnetischer Massentrennung, kollinearer Laseranregung am schnellen Atomstrahl, Feldionisation der angeregten Atome und Teilchendetektion der Ionen (Abb. 1)<sup>[11b]</sup>.

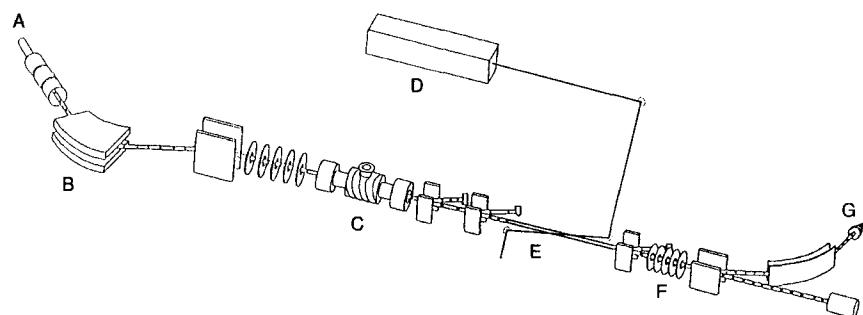


Abb. 1. Schematisch dargestellter Aufbau der Apparatur zur Laser-Massenspektrometrie. A = 33 keV-Ionenquelle, B = Massenseparator, C = Ladungsaustauschzelle, D = Argon-Ionen-Laser, E = optische Anregung, F = Feldionisation, G = Detektor.

Die chemisch isolierte Strontiumprobe wird in eine Ionquelle eingebracht, nach Umsetzung zum Oxid und Reduktion zum Element verdampft und an einer heißen Wolframoberfläche ionisiert. Die positiven Ionen werden extrahiert und auf eine Energie von 33 keV beschleunigt. Die Massenseparation in einem  $60^\circ$ -Sektorfeldmagneten führt bereits zu einer Abreicherung der stabilen Isotope um bis zu sieben Größenordnungen. Anschließend wird der Ionenstrahl in einer geheizten Zelle durch Ladungsaustausch an Cäsiumdampf neutralisiert und so ein Strahl aus schnellen Atomen gebildet. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Isotope in diesem Strahl bewirken eine künstliche Isotopieverschiebung (Doppler-Verschiebung) der Resonanzlinien bei der sich anschließenden optischen Anregung. Zusätzlich resultieren sehr geringe Linienbreiten<sup>[12]</sup>. Dies führt zu der geforderten Isotopenselektivität. Zum Durchstimmen über die Resonanzfrequenzen der Isotope werden die Ionen am Eingang zur Ladungsaustauschzelle durch ein Potential beschleunigt oder verlangsamt.

In der folgenden Strecke für die optische Anregung wird dem Atomstrahl ein UV-Laserstrahl aus einem kontinuierlichen Argon-Ionen-Laser fester Wellenlänge (364 nm) unter einem Winkel von  $2^\circ$  überlagert. Diese Geometrie gewährleistet alle Vorteile der Spektroskopie mit einem kollinearen Laserstrahl, verhindert aber, daß durch Stark-Effekt in den elektrischen Feldern die Selektivität beeinträchtigt wird<sup>[11b]</sup>. Durch Absorption eines Laserphotons werden die Strontiumisotope resonant und selektiv in einen energetisch hochliegenden Rydberg-Zustand angeregt. Diese angeregten Atome werden dann in einem elektrischen Feld ionisiert. Anschließend werden die dabei gebildeten Ionen (Resonanz-Ionen) aus der Strahlrichtung abgelenkt, durch einen Zylinderkondensator energieselektiv auf einen Teilchendetektor abgebildet und gezählt. Durch die Teilchendetektion wird die notwendige hohe Effizienz erreicht<sup>[13]</sup>.

Die Methode wurde zunächst an synthetischen Proben mit bekannten Gehalten an Strontium-90 und hohen Gehalten an stabilem Strontium von bis zu  $10^{18}$  Atomen getestet. Die Linien der optischen Resonanz für Strontium-90 und für ein natürliches Referenzisotop, Strontium-84 (0.56% Häufigkeit), wurden alternierend aufgenommen, wobei die gesamte Meßzeit von etwa einer Stunde zu 90% auf Strontium-90 entfiel. Aus der Zahl der gemessenen Ereignisse bei den beiden Resonanzfrequenzen ergibt sich das  ${}^{90}\text{Sr}/{}^{84}\text{Sr}$ -Verhältnis; mit dem Gehalt der ursprünglichen Probe an stabilem Strontium, der durch Röntgenfluoreszenzspektroskopie bestimmt wurde, wird dann die Absolutmenge an Strontium-90 in der Probe ermittelt. Der systematische Fehler der Methode beträgt ungefähr 10%, der statistische Fehler wird durch die Zählstatistik festgelegt. Mit der Methode konnten  $10^7$  Atome  ${}^{90}\text{Sr}$  neben  $10^{17}$  Atomen an stabilem Strontium noch nachgewiesen werden. Die geforderte

Isotopenselektivität von  $10^{10}$  wurde somit erreicht und die gewünschte Nachweisgrenze sogar unterschritten.

Die Bestimmung von Strontium-89 wird durch dessen Kernspin von  $\frac{5}{2}$  erschwert, der zu einer komplexen Hyperfeinaufspaltung der optischen Resonanzlinien führt; außerdem liegt Strontium-89 am Ausgang des Magneten direkt neben den häufigsten stabilen Isotop 88. Dadurch wird die Selektivität vermindert und die Nachweisgrenze um etwa eine Größenordnung verschlechtert. Bei synthetischen Proben konnten bisher  $10^9$  Atome  $^{89}\text{Sr}$  neben  $10^{16}$  Atomen an stabilem Strontium erfaßt werden.

Zur Demonstration der Einsatzfähigkeit des Verfahrens wurden Teilstücke eines Luftfilters verarbeitet und gemessen, das vom 15. bis 30. April 1986 bei der GSF in Neuherberg bei München während des Durchzugs der Tschernobyl-Wolke exponiert worden war. Der Gesamtdurchsatz betrug etwa  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$  Luft, die Teilstücke entsprachen jeweils etwa  $1000 \text{ m}^3$  Durchsatz. Ein Ergebnis ist in Abbildung 2 gezeigt. Gemessen wurden Gehalte von  $1.5 \times 10^9$  Atomen  $^{90}\text{Sr}$  pro Probe, entsprechend einer  $^{90}\text{Sr}$ -Konzentration von  $1.2 \text{ mBq m}^{-3}$  zum Zeitpunkt der Probenahme. Dieses Ergebnis stimmt sehr gut mit radiometrischen Messungen überein<sup>[14]</sup>, bei denen allerdings ein Großteil des Luftfilters eingesetzt werden mußte.

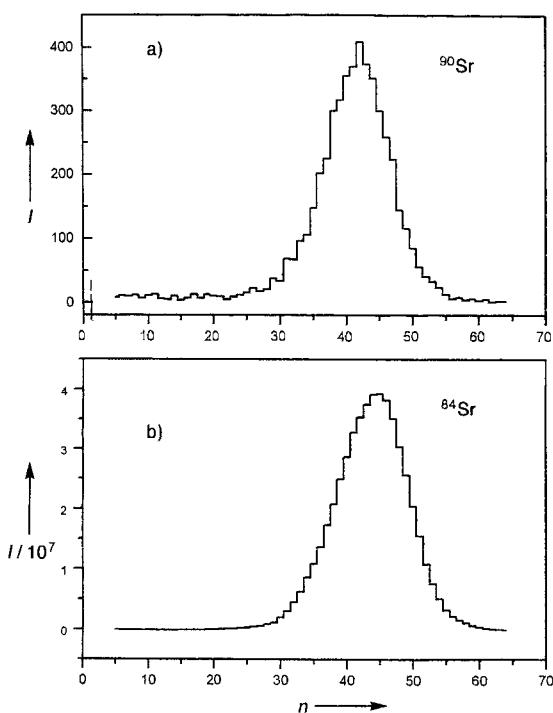


Abb. 2. Strontium-90 in einem während und nach dem Reaktorunglück in Tschernobyl bei der GSF in Neuherberg (bei München) exponierten Luftfilter. Resonanzsignale (Auftragung der Intensität  $I$  [Zahl der gemessenen Ereignisse] gegen die Kanalnummer  $n$ ) für  $^{90}\text{Sr}$  (a) und für das Referenzisotop, stabiles  $^{84}\text{Sr}$  (b). Gefunden wurde ein Gehalt an  $1.5 \times 10^9$  Atomen  $^{90}\text{Sr}$ , entsprechend einer Belastung der Luft von  $1.2 \text{ mBq m}^{-3}$  zum Zeitpunkt der Probenahme.

Die vorangehende chemische Trennung des Strontiums muß nicht sonderlich selektiv sein, da Spaltprodukte aus anderen Massenbereichen, wie Barium-140, durch die Massenselektion abgetrennt werden. Auch führen isobare stabile Verunreinigungen, wie Zirconium-90, wegen der hohen Elementselektivität der Laseranregung zu keiner signifikanten Beeinträchtigung, anders als bei der ebenfalls zum Nachweis von Strontiumisotopen vorgeschlagenen Beschleuniger-Massenspektrometrie<sup>[15, 15]</sup>. Die

wesentliche Anforderung an die chemische Trennung besteht im Verzicht auf größere Trägerzusätze für Strontium und Barium. Hierzu wurde ein Verfahren auf Grundlage der Flüssig-flüssig-Extraktion mit Krohnenethern ausgearbeitet.

Das Luftfilter wird dazu bei  $700^\circ\text{C}$  verascht und die Asche in 3 M Salpetersäure gelöst. Der Gehalt an stabilem Strontium wird nach Aufstocken auf  $10^{17}$  Atome durch Röntgenfluoreszenzspektroskopie mit einer Genauigkeit von besser als 5% bestimmt. Aus der verdünnten Probenlösung werden die Erdalkalimetallcarbonate mit Ammoniumcarbonat gefällt. Der Niederschlag wird in 6 M Salpetersäure aufgenommen und die Lösung mit Lithiumhydroxid auf  $\text{pH} = 3 - 5$  eingestellt. Nach Zusatz von Pikrat als Gegenion werden  $\text{Sr}^{2+}$  und  $\text{Ba}^{2+}$  mit Dicyclohexano[18]kron-6 extrahiert und so von  $\text{Ca}^{2+}$  getrennt. Nach Rückextraktion mit 3 M Salzsäure wird das  $\text{Ba}^{2+}$  mit Dibenzo[24]kron-8 wiederum in Gegenwart von Pikrat ausgeschüttelt. Das in der wäßrigen Phase verbleibende  $\text{Sr}^{2+}$  wird an einer Kationenaustauschersäule von Resten an Pikrat gereinigt, mit 6 M Salzsäure eluiert und das Eluat eingedampft. Nach Aufnehmen in 20  $\mu\text{L}$  3 M Salpetersäure wird die Strontiumfraktion in die Ionenquelle überführt. Mit Radiotraceren wurde eine chemische Ausbeute von durchschnittlich 70% gemessen. Dieser Trennungsgang ist auch für radiometrische Verfahren mit größerem Trägerzusatz geeignet.

Einzelheiten über die laserspektroskopischen Ergebnisse und das chemische Trennverfahren werden an anderer Stelle veröffentlicht<sup>[16]</sup>.

Eingegangen am 11. Juni 1994 [Z 7031]

**Stichworte:** Massenspektrometrie · Radionuclide · Strontium

- [1] a) M. Eisenbud, *Environmental Radioactivity*, Academic Press, Orlando, 1987; b) Lit. [1a], S. 405–424.
- [2] Lit. [1a], S. 320–331.
- [3] Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung. Jahresbericht 1983 (Hrsg.: Bundesminister des Inneren), Bonn, 1983, S. 72.
- [4] H. O. Denschlag, A. Diel, K.-H. Gläsel, R. Heimann, N. Kaffrell, U. Knitt, H. Menke, N. Trautmann, M. Weber, G. Herrmann, *Radiochim. Acta* 1987, 41, 163–172.
- [5] F. Arslan, M. Behrendt, W. Ernst, E. Finckh, G. Greb, F. Gumbmann, M. Haller, S. Hofmann, R. Karschnick, W. Kretschmer, G. Morgenroth, C. Pagsels, M. Schleicher, *Angew. Chem.* 1995, 107, 205; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 1995, 34, Nr. 2.
- [6] J. Alfaro, T. Apfel, H. Diercks, A. Knöchel, R. Sen Gupta, K. Tödter, *Angew. Chem.* 1995, 107, 207; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 1995, 34, Nr. 2.
- [7] H. Hötzl, G. Rosner, R. Winkler, *Radiochim. Acta* 1987, 41, 181–190.
- [8] Lit. [1a], S. 280.
- [9] G. Herrmann, G. Erdelen, *Radiochemische Methoden zur Bestimmung von Radionukliden* (Arbeitsanleitung): Strontium 89 und 90 (Hrsg.: Bundesminister für Atomenergie und Wasserwirtschaft), Gernsbach, Braunschweig, 1959.
- [10] K. Walter, G. Herrmann, N. Trautmann, *Radiochim. Acta* 1993, 62, 207–212.
- [11] a) G. Herrmann, H.-J. Kluge, G. Passler, N. Trautmann, K. Wendt, *Phys. Bl.* 1994, 50, 929–933; b) L. Monz, R. Hohmann, H.-J. Kluge, S. Kunze, J. Lantsch, E. W. Otten, G. Passler, P. Senne, J. Stenner, K. Stratmann, K. Wendt, K. Zimmer, G. Herrmann, N. Trautmann, K. Walter, *Spectrochim. Acta Part B* 1993, 48, 1655–1671.
- [12] R. Neugart in *Progress in Atomic Spectroscopy, Part D* (Hrsg.: H. J. Beyer, H. Kleinpoppen), Plenum, New York, 1987, S. 75–126.
- [13] a) V. S. Letokhov, *Laser Photoionization Spectroscopy*, Academic Press, Orlando, 1987; b) G. S. Hurst, M. G. Payne, *Principles and Applications of Resonance Ionization Spectroscopy*, Hilger, Bristol, 1988.
- [14] G. Rosner, persönliche Mitteilung, 1993. Wir danken Herrn Dr. Rosner, GSF Neuherberg, für die Überlassung der Filterstücke.
- [15] a) M. Baumgärtner, U. Emmerling, W. Ernst, E. Finckh, G. Fuchs, F. Gumbmann, M. Haller, R. Höpfl, R. Karschnick, W. Kretschmer, A. Rauscher, M. Schleicher, W. Schuster, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* 1990, 50, 286–290; b) D. Müller, B. Bante, T. Faestermann, A. Gillitzer, H. J. Körner, G. Korschinek, U. Büttner, *ibid.* 1992, 68, 313–318.
- [16] a) K. Zimmer, J. Stenner, H.-J. Kluge, J. Lantsch, L. Monz, E. W. Otten, G. Passler, R. Schwalbach, M. Schwarz, H. Stevens, K. Wendt, G. Herrmann, S. Nieß, N. Trautmann, K. Walter, B. A. Bushaw, *Appl. Phys. Sect. B* 1994, 59, 117–121; b) K. Walter, K. Christian, S. Nieß, G. Herrmann, N. Trautmann, unveröffentlicht.