

The MAK Collection for Occupational Health and Safety

Beryllium und seine anorganischen Verbindungen – Bestimmung von Beryllium in Urin mittels Atomabsorptionsspektrometrie

Biomonitoring-Methode

R. Paul¹, L. T. Budnik², T. Göen^{3,*}, A. Hartwig^{4,*}, MAK Commission^{5,*}

¹ Methodenentwicklung, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Fachbereich 4 – Gefahrstoffe und biologische Arbeitsstoffe, Gruppe 4.2 Medizinischer Arbeitsschutz, Biomonitoring, Nöldnerstraße 40/42, 10317 Berlin

² Methodenprüfung, Zentralinstitut für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin (ZfAM), Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, Marckmannstraße 129 b, Haus 3, 20539 Hamburg

³ Leitung der Arbeitsgruppe „Analysen in biologischem Material“ der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Institut und Poliklinik für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, Schillerstraße 25 und 29, 91054 Erlangen

⁴ Vorsitz der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Institut für Angewandte Biowissenschaften, Abteilung Lebensmittelchemie und Toxikologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Adenauerring 20a, Geb. 50.41, 76131 Karlsruhe

⁵ Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Kennedyallee 40, 53175 Bonn

* E-Mail: T. Göen (thomas.goen@fau.de), A. Hartwig (andrea.hartwig@kit.edu), MAK Commission (arbeitsstoffkommission@dfg.de)

Keywords: Beryllium; Biomonitoring; Urin; AAS

Citation Note: Paul R, Budnik LT, Göen T, Hartwig A, MAK Commission. Beryllium und seine anorganischen Verbindungen – Bestimmung von Beryllium in Urin mittels Atomabsorptionsspektrometrie. Biomonitoring-Methode. MAK Collect Occup Health Saf [Original-Ausgabe. Weinheim: Wiley-VCH; 2017 Okt;2(4):1710-1729]. Korrigierte Neuveröffentlichung ohne inhaltliche Bearbeitung. Düsseldorf: German Medical Science; 2026. https://doi.org/10.34865/bi743993d0022_w

Neuveröffentlichung (Online): 07 Aug 2026

Vormals erschienen bei Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; <https://doi.org/10.1002/3527600418.bi743993d0022>

Manuskript abgeschlossen: 03 Nov 2011

Erstveröffentlichung (Online): 27 Okt 2017

Zur Vermeidung von Interessenkonflikten hat die Kommission *Regelungen und Maßnahmen* etabliert.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.

Beryllium and its inorganic compounds – Determination of beryllium in urine by atomic absorption spectrometry

[Beryllium und seine anorganischen Verbindungen – Bestimmung von Beryllium in Urin mittels Atomabsorptionsspektrometrie]

Biomonitoring Methods in German language

R. Paul¹, L.T. Budnik², T. Göen^{3,*}, A. Hartwig^{4,*}, MAK Commission^{5,*}

DOI: 10.1002/3527600418.bi743993d0022

Abstract

The working group „Analyses in Biological Materials“ of the Permanent Senate Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area verified the present biomonitoring method. This procedure describes a method for the determination of beryllium in urine by means of atomic absorption spectrometry using the graphite furnace technique with a pyrolytically coated graphite tube and Zeeman background correction. The acidified samples are homogenized and injected into the graphite tube without further sample preparation using an autosampler. Magnesium nitrate is used as a matrix modifier. After drying, pyrolysis and atomization, the absorbance is measured at 234.9 nm. The beryllium concentration is quantified using either a calibration curve (method I) or the standard addition method (method II). The method was extensively validated and the reliability data were confirmed by independent laboratories, which have established and cross-checked the whole procedure.

Keywords

Beryllium; Urin; Biomonitoring; Analysen in biologischem Material; Atomabsorptionsspektrometrie; AAS

Author Information

¹ Entwickler der Methode, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Fachbereich 4 – Gefahrstoffe und biologische Arbeitsstoffe, Gruppe 4.2 Medizinischer Arbeitsschutz, Biomonitoring, Nöldnerstraße 40/42, 10317 Berlin

² Prüfer der Methode, Zentralinstitut für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin (ZfAM), Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, Marckmannstraße 129 b, Haus 3, 20539 Hamburg

³ Leiter der Arbeitsgruppe „Analysen in biologischem Material“, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Institut und Poliklinik für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schillerstraße 25 und 29, 91054 Erlangen

⁴ Vorsitzende der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Institut für angewandte Biowissenschaften, Abteilung Lebensmittelchemie und Toxikologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Adenauerring 20a, Geb. 50.41, 76131 Karlsruhe

⁵ Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Kennedyallee 40, 53175 Bonn

* Email: T. Göen (thomas.goen@fau.de), A. Hartwig (andrea.hartwig@kit.edu), MAK Commission (arbeitsstoffkommission@dfg.de)

Beryllium und seine anorganischen Verbindungen – Bestimmung von Beryllium in Urin mittels Atomabsorptionsspektrometrie

Matrix:	Urin
Arbeitsstoffe:	Beryllium und seine anorganischen Verbindungen
Analyt. Messprinzip:	Atomabsorptionsspektrometrie
Abgeschlossen im:	November 2011

Übersicht über die mit dieser Methode erfassbaren Parameter und die entsprechenden Arbeitsstoffe:

Arbeitsstoff	CAS	Parameter	CAS
Beryllium und seine anorganischen Verbindungen	7440-41-7	Beryllium	7440-41-7

Zusammenfassung

Das Verfahren beschreibt die Bestimmung von Beryllium im Harn nach elektrothermischer Atomisierung im pyrolytisch beschichteten Graphitrohr und Atomabsorptionsspektrometrie mit Zeeman-Untergrundkompensation. Die Proben werden angesäuert, homogenisiert und in der Regel ohne weitere Vorbereitung mit einem automatischen Probegeber unter Zugabe eines Modifiers in das Graphitrohr dosiert. Als Modifier dient Magnesiumnitrat. Nach Trocknung der Probe und nachfolgender thermischer Pyrolyse wird das Beryllium atomisiert und die Absorption bei 234,9 nm gemessen.

Die Bestimmung der Analytkonzentration kann sowohl mit Hilfe einer Kalibriergeraden (Methode I) als auch mit dem Standardadditionsverfahren (Methode II) erfolgen.

Zuverlässigkeitskriterien der Methode

Da die Kalibrierung mittels Kalibriergerade (Methode I) oder Standardaddition (Methode II) erfolgen kann, wurden die Validierungsdaten für beide Quantifizierungsmöglichkeiten bestimmt.

1712 Biomonitoring Methods

Beryllium

Präzision in der Serie (Methode I):	Standardabweichung (rel.) Streubereich bei einer dotierten Konzentration von 40 ng Be pro Liter Urin und n = 12 Bestimmungen	$s_w = 7,85 \%$ $u = 17,3 \%$
Präzision in der Serie (Methode II):	Standardabweichung (rel.) Streubereich bei einer dotierten Konzentration von 40 ng Be pro Liter Urin und n = 13 Bestimmungen	$s_w = 7,41 \%$ $u = 16,1 \%$
Präzision von Tag zu Tag (Methode I):	Standardabweichung (rel.) Streubereich bei einer dotierten Konzentration von 40 ng Be pro Liter Urin und n = 11 Bestimmungen	$s_w = 14,3 \%$ $u = 31,9 \%$
Präzision von Tag zu Tag (Methode II):	Standardabweichung (rel.) Streubereich bei einer dotierten Konzentration von 40 ng Be pro Liter Urin und n = 10 Bestimmungen	$s_w = 5,83 \%$ $u = 13,2 \%$
Richtigkeit (Methode I):	Wiederfindungsrate (rel.) bei einer dotierten Konzentration von 40 ng Be pro Liter Urin und n = 12 Bestimmungen	$r = 87,5 \%$
Richtigkeit (Methode II):	Wiederfindungsrate (rel.) bei einer dotierten Konzentration von 40 ng Be pro Liter Urin und n = 13 Bestimmungen	$r = 102 \%$
Nachweisgrenze:	1,8 ng Be pro Liter Urin	
Bestimmungsgrenze:	6,8 ng Be pro Liter Urin	

Allgemeine Informationen zu Beryllium und seinen anorganischen Verbindungen

Beryllium (molekulare Masse 9,0122 g, Ordnungszahl 4, Schmelzpunkt 1287 °C) ist ein silberweißes, sehr hartes und sprödes Leichtmetall, das in seinem chemischen Verhalten dem Aluminium sehr ähnlich ist. Mit einem durchschnittlichen Anteil von etwa 2 bis 5 mg/kg in der Erdkruste gehört Beryllium zu den weniger häufigen Elementen. Für die Gewinnung von Beryllium kommen im Wesentlichen nur die Silikate Beryll und Bertrandit in Betracht, die einen ausreichenden Gehalt an Beryllium besitzen.

Beryllium und seine Verbindungen finden mannigfaltige Verwendung in vielen modernen Industriezweigen. So sind Berylliumlegierungen extrem leicht und trotzdem sehr hart. Sie weisen sich durch hohe Steifigkeit, große Ermüdungsresistenz und hervorragende thermische sowie elektrische Leitfähigkeit aus [IARC 1993].

Reines Beryllium und Legierungen mit höheren Berylliumgehalten werden vor allem in der Luft- und Raumfahrttechnik, in der Rüstungstechnik, der Kerntechnik und dem wissenschaftlichen Gerätebau verwendet.

Der weitaus größte Teil des Berylliums wird allerdings in Kupferlegierungen mit Berylliumgehalten unter 2 % eingesetzt. Aus diesen Legierungen werden vor allem

Bauteile für elektrische und elektronische Geräte wie Schalter, Stecker, Kabelverbinder oder Federn gefertigt. Weiterhin wird Beryllium als Berylliumoxid in Keramiken in der Funk-, Mobilfunk- und Lasertechnik sowie im wissenschaftlichen Gerätebau eingesetzt. Die IARC-Monographie [IARC 1993] bietet einen guten Überblick über die physikalisch-chemischen Eigenschaften sowie die industrielle Verwendung von Beryllium und seinen Verbindungen.

Beryllium und seine Verbindungen sind giftig und können eine ernste Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen. Epidemiologisch wurde ein Zusammenhang zwischen einer beruflichen Berylliumexposition und dem Auftreten von Lungenkrebs ermittelt. Deshalb hat die Kommission Beryllium und anorganische Berylliumverbindungen in die Kategorie I der krebserzeugenden Arbeitsstoffe eingestuft. Darüber hinaus besteht die Gefahr einer Sensibilisierung der Atemwege und der Haut [DFG 2017]. Auf europäischer Ebene wurden Beryllium und seine anorganischen Verbindungen als Karzinogene der Gruppe 1B eingestuft [EG 2008] und auch von der International Agency for Research on Cancer (IARC) aufgrund epidemiologischer Daten als krebserzeugend beim Menschen klassifiziert [IARC 1993].

Die natürliche Belastung mit Beryllium aus der Umwelt ist sehr gering. Die tägliche Aufnahme über die Nahrung und die Luft wurde von der US EPA mit 423 ng abgeschätzt, wobei 420 ng über Lebensmittel und Trinkwasser und lediglich 3 ng inhalativ aufgenommen werden [US EPA 1998]. Da Beryllium in Tabak enthalten ist, können Raucher im Vergleich zu Nichtraucher erhöhten Berylliumwerten aufweisen [ATSDR 2002; Minoia et al. 1990; Morton et al. 2011].

Der beruflichen Berylliumexposition kommt eine größere Bedeutung zu, wobei hier der inhalative Aufnahmeweg im Vordergrund steht. Die Aufnahme von Beryllium über die intakte Haut trägt nur unwesentlich zur Gesamtbelastung beruflich exponierter Personen bei. Die Resorption nach oraler Aufnahme ist gering [ATSDR 2002; WHO 1990]. Die einmalige Exposition gegenüber hohen Berylliumkonzentrationen ($>100 \mu\text{g Beryllium}/\text{m}^3$) kann zu einer akuten Berylliumerkrankung führen. Bei wiederholter Exposition gegenüber niedrigen Berylliumkonzentrationen kann die chronische Berylliumerkrankung, die Berylliose, ausgelöst werden. Dabei kommt es neben funktionellen Einschränkungen der Lunge auch zu systemischen Effekten [Greim 2003; Lehnert und Greim 2003].

Die Verhüttung und industrielle Weiterverarbeitung von Berylliummineralien stellen die größten Gefahrenquellen dar. In der Europäischen Union wird jedoch kein Beryllium hergestellt [Cherrie et al. 2011], stattdessen werden Beryllium und Berylliumhalbzeuge in die EU importiert und weiterverarbeitet. Eine in Frankreich durchgeführte Studie weist auf die Industriezweige und Technologien hin, in denen mit den höchsten Belastungen zu rechnen ist [Vincent et al. 2009]. Dazu gehören in erster Linie thermische Prozesse, wie das Schmelzen und Gießen von Nichteisenmetallen, aber auch mechanische Verfahren, bei denen berylliumhaltige Stäube entstehen können.

Die Elimination von Beryllium erfolgt in erster Linie renal und nur ein geringer Teil wird über die Faeces ausgeschieden. In tierexperimentellen Untersuchungen an Meerschweinchen wurde gefunden, dass die maximale renale Berylliumausscheidung 10 bis 30 Stunden nach Expositionsende erreicht wird [Stiefel et al. 1980]. Da die Berylliumresorption von zahlreichen Einflussfaktoren abhängt, konnten bislang keine allgemeingültigen Korrelationen zwischen Beryllium in der Luft und im Urin abge-

leitet werden. Jedoch ist eine erhöhte Konzentration im Urin ein Indikator für eine vorübergehende Berylliumaufnahme und somit ein geeigneter Biomarker für eine berufliche Berylliumexposition [Drexler und Hartwig 2010; Lehnert und Greim 2003].

In Urinproben von beruflich nicht belasteten Erwachsenen in Europa konnte auch bei Einsatz der hochempfindlichen ICP-MS-Methodik Beryllium nur in Einzelfällen nachgewiesen werden. Aufgrund dieser Messungen wurde ein Biologischer Arbeitsstoff-Referenzwert (BAR) von 0,05 µg Beryllium/L Urin festgesetzt [DFG 2017; Drexler und Hartwig 2010].

Details zur Bewertung des Berylliums und seiner anorganischen Verbindungen können den toxikologisch-arbeitsmedizinischen Begründungen der Kommission entnommen werden [Greim 2003]. Eine ausführliche Darstellung der durch Beryllium und seine anorganischen Verbindungen hervorgerufenen Erkrankungen ist ebenfalls der toxikologisch-arbeitsmedizinischen Begründung der Kommission [Greim 2003] sowie der Dokumentation des „Scientific Committee on Occupational Exposure Limits“ (SCOEL) [SCOEL 2017] zu entnehmen.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlage des Verfahrens	1715
2	Geräte, Chemikalien und Lösungen	1715
2.1	Geräte	1715
2.2	Chemikalien	1715
2.3	Lösungen	1716
2.4	Vergleichsstandards	1716
2.5	Reinigung der Geräte und Prüfung auf Kontaminationsfreiheit	1717
3	Probenahme und Probenaufbereitung	1717
3.1	Probenahme	1717
3.2	Probenaufbereitung	1718
4	Instrumentelle Arbeitsbedingungen	1718
4.1	Atomabsorptionsspektrometer	1718
5	Analytische Bestimmung	1719
6	Kalibrierung	1719
6.1	Kalibriergerade (Methode I)	1719
6.2	Standardaddition (Methode II)	1719
7	Berechnung der Analysenergebnisse	1720
7.1	Kalibriergerade (Methode I)	1720
7.2	Standardaddition (Methode II)	1720
8	Standardisierung der Messergebnisse und Qualitätssicherung	1720
9	Beurteilung des Verfahrens	1721
9.1	Präzision	1721
9.2	Richtigkeit	1722
9.3	Nachweis- und Bestimmungsgrenzen	1722
9.4	Störeinflüsse	1722
10	Diskussion der Methode	1723
11	Literatur	1724
12	Anhang	1726

1 Grundlage des Verfahrens

Das Verfahren beschreibt die Bestimmung von Beryllium im Harn nach elektrothermischer Atomisierung im pyrolytisch beschichteten Graphitrohr und Atomabsorptionsspektrometrie mit Zeeman-Untergrundkompensation. Die Proben werden angesäuert, homogenisiert und in der Regel ohne weitere Vorbereitung mit einem automatischen Probengeber unter Zugabe eines Modifiers in das Graphitrohr dosiert. Als Modifier dient Magnesiumnitrat. Nach Trocknung der Probe und nachfolgender thermischer Pyrolyse wird das Beryllium atomisiert und die Absorption bei 234,9 nm gemessen. Die Bestimmung der Analytkonzentration kann sowohl mit Hilfe einer Kalibriergeraden (Methode I) als auch mit dem Standardadditionsverfahren (Methode II) erfolgen.

2 Geräte, Chemikalien und Lösungen

2.1 Geräte

- Atomabsorptionsspektrometer mit Zeeman-Untergrundkompensation (z. B. Thermo Solarar MQZ, Thermo Scientific)
- Autosampler mit automatischer Reagens- und Probendosierung (z. B. Graphitrohrprobengeber FS95, Thermo Scientific)
- Berylliumhohlkathodenlampe oder elektrodenlose Entladungslampe bei entsprechender Gerätekonfiguration (z. B. Thermo Scientific)
- Graphitrohr, pyrolytisch beschichtet, mit oder ohne Plattform (z. B. Omega- oder ELC-Küvette, Thermo Scientific)
- Mikroliterpipetten, variabel zwischen 100 µL und 1000 µL (z. B. Eppendorf)
- verschiedene Messkolben (z. B. Brand)
- Vortex (z. B. VTX-3000 L Mixer UZUSIO, LMS, Japan)
- Laborzentrifuge (z. B. Heraeus Megafuge, Thermo Scientific)
- Ultraschallbad für die Probenhomogenisierung (z. B. Bandelin Sonorex RK 102)
- Gefäße für den Probenwechsler (Proben- und Reagenziengefäße, gerätespezifisch)
- Kunststoffgefäße für die Proben- und Reagenzienaufbewahrung

2.2 Chemikalien

Wenn nicht anders angegeben, sind alle genannten Chemikalien mindestens in p. a.-Qualität zu verwenden.

- Beryllium-Standardlösung CertiPUR 1000 mg/L (z. B. Merck, Nr. 170207)
- Magnesium-Matrixmodifier $10 \pm 0,2$ g/L (z. B. Merck, Nr. 105813)
- hochreines Wasser
- Salpetersäure 65 % Suprapur (z. B. Merck, Nr. 100441)
- Essigsäure 96 % zur Analyse EMSURE (z. B. Merck, Nr. 100062)
- Argon $\geq 99,999$ mol-% (z. B. Alphagaz 1, Air Liquide)

2.3 Lösungen

- HNO_3 -Reinigungslösung
Zur Herstellung der HNO_3 -Reinigungslösung werden gleiche Volumina hochreinen Wassers und 65 %-iger Salpetersäure vorsichtig gemischt.
- Salpetersäure, 2 %
In einem 1000 mL-Messkolben werden 500 mL Reinstwasser vorgelegt und 31 mL 65 %-ige HNO_3 hinzu pipettiert. Der Messkolben wird mit Reinstwasser bis zur Marke aufgefüllt.
- Matrixmodifier 0,1 %
100 μL Magnesium-Matrixmodifier ($c(\text{Mg}) = 10 \pm 0,2 \text{ g/L}$) werden mit 900 μL 2 %-iger HNO_3 in einem Probengefäß verdünnt und intensiv gemischt. Die Lösung ist täglich frisch anzusetzen.
- Qualitätskontrollmaterial
Qualitätskontrollmaterial, z. B. Recipe ClinChek® Kontrollurin für Spurenelemente Level 1 und Level 2 (Recipe, Nr. 8849)

2.4 Vergleichsstandards

Stammlösungen

- Stammlösung 1 (1 mg/L)
In einen 100 mL-Messkolben werden 100 μL Beryllium-Standardlösung pipettiert. Der Messkolben wird mit 2 %-iger Salpetersäure bis zur Marke aufgefüllt. Die so angesetzte Lösung ist bei 4 °C mindestens acht Wochen haltbar.
- Stammlösung 2 (1 $\mu\text{g/L}$)
In einen 100 mL-Messkolben werden 100 μL der Stammlösung 1 pipettiert. Der Messkolben wird mit 2 %-iger Salpetersäure bis zur Marke aufgefüllt. Die so angesetzte Lösung ist bei 4 °C mindestens acht Wochen haltbar.

Arbeitslösung für den Autosampler

- Arbeitslösung (250 ng/L)
200 μL der Stammlösung 2 werden in einem Probengefäß mit 600 μL 2 %-iger HNO_3 verdünnt und intensiv gemischt. Die Lösung ist täglich frisch herzustellen.

Die zur Kalibrierung verwendeten Vergleichslösungen werden sowohl für die Kalibrierung mittels Kalibriergerade (Methode I) als auch mittels Standardaddition (Methode II) automatisch vom Graphitrohrprobengeber dosiert. Dazu wird der Autosampler des Atomabsorptionsspektrometers mit den Proben, der Arbeitslösung und den Reagenzien (2 %-ige Salpetersäure, Matrixmodifier) beschickt.

Optional kann die Herstellung der Kalibrierstandards für Methode I auch manuell entsprechend Tabelle 1 durchgeführt werden. Für die Standardaddition sind die Additionsschritte anhand der Probenextinktion festzulegen (siehe Abschnitt 6.2). Diese sind so zu wählen, dass die Extinktion nach dem letzten Schritt etwa der doppelten bis dreifachen Extinktion der Urinprobe entspricht.

Tab. 1 Pipettierschema zur Herstellung der Kalibrierstandards (Methode I).

Kalibrierpunkt	Dotierung [ng/L]	2 %-ige HNO ₃ [μL]	Stammlösung 2 [μL]
K0	0	1000	0
K1	10	990	10
K2	20	980	20
K3	40	960	40
K4	60	940	60
K5	70	930	70
K6	90	910	90

2.5 Reinigung der Geräte und Prüfung auf Kontaminationsfreiheit

Für die Reinigung der verwendeten Gefäße wird die nach Abschnitt 2.3 angesetzte HNO₃-Reinigungslösung eingesetzt. Die HNO₃-Reinigungslösung muss mindestens zwei Stunden einwirken. Anschließend wird mit hochreinem Wasser gespült und getrocknet.

Die Kontaminationsfreiheit der Gefäße und Einmalmaterialien (z.B. Pipetten, Probengefäße usw.) muss in Stichproben geprüft werden. Glasgefäße stellen eine mögliche Kontaminationsquelle dar und sollten deshalb nicht verwendet werden. Auch alle verwendeten Chemikalien sind auf eventuelle Blindwerte zu prüfen.

3 Probenahme und Probenaufbereitung

3.1 Probenahme

Die Vermeidung von Verunreinigungen bei der Probengewinnung und während des gesamten Analysenverlaufes spielt eine entscheidende Rolle für die Qualität der Analysenergebnisse. Bei handelsüblichen Urinbechern konnten bisher keine Kontaminationen mit Beryllium festgestellt werden.

Als Untersuchungsmaterial wird Spontanurin verwendet. Die Proben werden nach Expositions- oder Schichtende oder bei mehreren vorangegangenen Schichten mit Exposition, am Morgen, der auf die letzte Schicht folgt, genommen [Drexler und Hartwig 2010]. Bei der Gewinnung der Urinproben muss darauf geachtet werden, dass sie in einer geeigneten sauberen Umgebung mit großer Sorgfalt erfolgt.

Die Proben werden nach der Probenahme mit Essigsäure angesäuert (1 mL Essigsäure je 100 mL Urin) und im Kühlschrank (4 °C) gelagert. Unter diesen Bedingungen sind die Proben mindestens vier Wochen stabil. Für eine längere Lagerdauer sind die Proben bei –24 °C einzufrieren.

3.2 Probenaufbereitung

Eingefrorene Proben werden bei Raumtemperatur oder bei ca. 40 °C aufgetaut. Vor der Entnahme von Teilmengen sind die Urinproben im Ultraschallbad zu homogenisieren. Jeweils 1 mL der Urinprobe wird in ein Probengefäß pipettiert und dieses in den Autosampler gestellt.

4 Instrumentelle Arbeitsbedingungen

4.1 Atomabsorptionsspektrometer

Wellenlänge:	234,9 nm
Spektrale Spaltbreite:	0,5 nm
Lampenstrom:	50 bis 80 % (nach Herstellerangabe)
Inertgas:	Argon
Messart:	Peakhöhe
Graphitrohr:	mit Plattform (Omega)
Untergrundkorrektur:	Zeeman
Matrixmodifier:	10 µL
Standardvorbereitung:	konstantes Volumen

Die instrumentellen Bedingungen sind für Analysen mit Methode I bzw. II bis auf das injizierte Probenvolumen identisch.

Probenvolumen Methode I: 35 µL

Probenvolumen Methode II: 25 µL

Das Temperaturprogramm und der Inertgasfluss sind geräteabhängig zu optimieren. Das in Tabelle 2 dargestellte Programm wurde für das System Solaar MQZ mit Graphitrohrprobengeber FS95 (Thermo Scientific) optimiert. Gegebenenfalls sind bei Geräten anderer Hersteller weitere Einstellungen erforderlich.

Tab. 2 Angaben zum verwendeten Ofenprogramm.

Analysenphase	Dauer [s]	Temperatur [°C]	Temperatur- anstieg [°C/s]	Gas	Gasfluss [L/min]
Trocknung	45	135	2	Argon	0,2
Pyrolyse	20	1400	150	Argon	0,2
Atomisierung	3	2700	0	Argon	aus
Ausheizen	3	2700	0	Argon	0,2

5 Analytische Bestimmung

Für die analytische Bestimmung wird der Autosampler des Atomabsorptionsspektrometers zunächst mit den nach Abschnitt 3.2 vorbereiteten Proben, der Arbeitslösung (siehe Abschnitt 2.4) und den Reagenzien (2 %-ige Salpetersäure, Matrixmodifizier, siehe Abschnitt 2.3) beschickt. Der Autosampler dosiert die Lösungen und Reagenzien und pipettiert die Proben in das Graphitrohr. Die Berylliumgehalte der Proben werden mittels Atomabsorptionsspektrometrie bestimmt.

6 Kalibrierung

6.1 Kalibriergerade (Methode I)

Für Messungen im unteren Konzentrationsbereich (10 bis ca. 75 ng/L) oder um einen Überblick über die Probengehalte zu gewinnen, ist die Kalibriergeradenmethode zu empfehlen. Liegen die Probenkonzentrationen oberhalb des kalibrierten Bereiches kann die Probe verdünnt, eine erneute Kalibrierung mit erweitertem Messbereich durchgeführt oder mit dem Standardadditionsverfahren gemessen werden. Bei Einführung des Verfahrens und in regelmäßigen Abständen, jedoch mindestens einmal jährlich, wird die Analysenfunktion mit sechs Kalibrierpunkten ermittelt. Dazu wird die Arbeitslösung nach Abschnitt 2.4 in den Graphitrohrprobengeber positioniert. Die Konzentrationen von 10, 20, 40, 60, 70 und 90 ng/L werden automatisch vom Probengeber dosiert. Für jeden Kalibrierpunkt wird eine dreifache Messung durchgeführt. Alternativ kann die Herstellung der Kalibrierlösungen auch manuell erfolgen (Tabelle 1). Im Anhang ist beispielhaft eine Kalibriergerade dargestellt (Abbildung 1).

In der täglichen Routine wird für jede Serie eine Dreipunktkalibrierung (z. B. 10, 30 und 80 ng/L) durchgeführt, wobei jede Konzentration und der Blindwert dreimal gemessen werden. Die Kalibriergerade ist am Ende jeder Serie zu überprüfen.

Eine Bestimmung mit Kalibriergerade hat den Vorteil, dass mit einer größeren Probenmenge (35 µL) gearbeitet werden kann als bei dem Standardadditionsverfahren, bei dem nur 25 µL Probe eingesetzt werden können.

6.2 Standardaddition (Methode II)

Das Standardadditionsverfahren wird mit drei Additionsschritten durchgeführt, in denen der Probe größer werdende Analytkonzentrationen zugegeben werden. Die Additionsschritte sind so zu wählen, dass die Extinktion nach dem letzten Schritt etwa der doppelten bis dreifachen Extinktion der Urinprobe entspricht. Aus diesen Messungen wird die Standardadditionsfunktion erzeugt. Bei modernen Atomabsorptionsspektrometern mit Autosampler wird die Standardaddition in der Regel über die Gerätesoftware programmiert.

Abbildung 2 im Anhang zeigt den Graphen einer Standardadditionsfunktion, die im Urin eines exponierten Gießers (Nichteisenbereich) mit einem Berylliumgehalt

von 58 ng/L durchgeführt wurde. Zudem sind in den Abbildungen 3 und 4 Atomisierungskurven des Standardadditionsverfahrens eines dotierten Urins sowie eines mit Beryllium belasteten Urins eines Beschäftigten dargestellt.

Die Kalibriergerade und die Standardadditionsfunktion werden von der Software berechnet und grafisch dargestellt. Neben der Analysenfunktion wird das Bestimmtheitsmaß angegeben. Das Bestimmtheitsmaß muss größer als 0,995 sein. Nichtlineare Analysenfunktionen werden nicht akzeptiert.

7 Berechnung der Analysenergebnisse

7.1 Kalibriergerade (Methode I)

Die Kalibrierstandards werden vermessen und die Kalibriergerade wird erhalten, indem die Extinktionswerte gegen die jeweiligen Berylliumkonzentrationen der Standards aufgetragen werden. Unter Verwendung der für die jeweilige Analysenserie erhaltenen Kalibrierfunktion wird die Analytkonzentration in ng/L Urin errechnet.

7.2 Standardaddition (Methode II)

Die Extinktion jeder Probe wird bestimmt. Die Konzentration des zudotierten Berylliums wird auf der Abszisse abgetragen und die Extinktion auf der Ordinate. Die Kalibriergerade, die durch die Messpunkte gelegt wird, wird verlängert und die Konzentration der zu vermessenden Probe am Schnittpunkt der Kalibriergerade mit der Abszisse abgelesen.

Normalerweise wird das Analysenergebnis von der Software automatisch errechnet.

8 Standardisierung der Messergebnisse und Qualitätssicherung

Die Anforderungen an die Qualitätssicherung bei Biomonitoringuntersuchungen sind in der Arbeitsmedizinischen Regel 6.2 [AfAMed 2013] geschildert. Zusätzlich wird gemäß den Richtlinien der Bundesärztekammer und den speziellen Vorbemerkungen dieses Bandes verfahren [Bader et al. 2010; Bundesärztekammer 2008], um die Qualität der Analysenergebnisse zu sichern.

Für die interne Qualitätskontrolle wird mindestens ein QC-Material je Serie mitgeführt, wobei die Konzentration im relevanten Messbereich liegen muss. Es kann beispielsweise Kontrollurin der Firma Recipe, das in zwei Konzentrationsniveaus angeboten wird, eingesetzt oder eigenes Kontrollmaterial hergestellt werden. Für die Herstellung von QC-Material wird Urin gesunder, nicht exponierter Personen ohne messbaren Berylliumgehalt mit einer definierten Menge Beryllium dotiert. Der Urin kann von mehreren Personen gesammelt und gemischt werden. Für die laufende Qualitätskontrolle wird der dotierte Urin in Aliquote aufgeteilt und eingefroren. Das so hergestellte QC-Material ist bei $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ mindestens ein Jahr haltbar.

Der Sollwert und die Toleranzbereiche des Qualitätskontrollmaterials werden im Rahmen einer Vorperiode (an zehn Tagen je eine Analyse des Kontrollmaterials) ermittelt [Bader et al. 2010].

Für die externe Qualitätskontrolle kann an Ringversuchen teilgenommen werden. So werden im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Arbeits- und Umweltmedizin e. V. (DGAUM) regelmäßig Ringversuche für arbeits- und umweltmedizinisch-toxikologische Analysen durchgeführt. In diesem Programm ist auch die Bestimmung von Beryllium in Urin enthalten.

9 Beurteilung des Verfahrens

9.1 Präzision

Zur Ermittlung der Präzision in Serie wurden Urinproben jeweils mit 10 ng und 80 ng Beryllium je Liter dotiert, aufgearbeitet und analysiert. Die Quantifizierung erfolgte dabei mittels Sechspunktkalibrierung (Methode I) nach Abschnitt 6.1. Bei zehnfacher Bestimmung dieser Urinproben ergaben sich die in Tabelle 3 dokumentierten Präzisionsdaten.

Tab. 3 Präzision in Serie für die Bestimmung von Beryllium in Urin (n = 10) (Methode I).

Dotierte Konzentration [ng/L]	Standardabweichung (rel.) [%]	Streubereich [%]
10	7,89	17,8
80	12,5	28,3

In der Routine wurde eine Dreipunktkalibrierung unter Einbeziehung des Blindwertes durchgeführt. Die Validierungsdaten zur Präzision in Serie und von Tag zu Tag, die unter diesen Bedingungen ermittelt wurden, sind den Tabellen 4 und 5 sowohl für Methode I als auch für Methode II zu entnehmen. Die verwendeten Berylliumlösungen wurden mit klarem Urin ohne messbaren Berylliumgehalt durch Aufstocken hergestellt.

Tab. 4 Präzision in Serie für die Bestimmung von Beryllium in Urin unter den in der Routineanalytik verwendeten Bedingungen mittels Methode I (n = 12) bzw. Methode II (n = 13).

	Dotierte Konzentration [ng/L]	Standardabweichung (rel.) [%]	Streubereich [%]
Präzision in Serie (Methode I)	40	7,85	17,3
Präzision in Serie (Methode II)	40	7,41	16,1

Tab. 5 Präzision von Tag zu Tag für die Bestimmung von Beryllium in Urin unter den in der Routineanalytik verwendeten Bedingungen mittels Methode I (n = 11) bzw. II (n = 10).

	Dotierte Konzentration [ng/L]	Standardabweichung (rel.) [%]	Streubereich [%]
Präzision von Tag zu Tag (Methode I)	40	14,3	31,9
Präzision von Tag zu Tag (Methode II)	40	5,83	13,2

9.2 Richtigkeit

Zur Bestimmung der Richtigkeit der Methode wurden Wiederfindungsversuche durchgeführt. Dazu wurde Urin in einer Konzentration von 40 ng/L mit Beryllium dotiert und unter Routinebedingungen analysiert. Die relativen Wiederfindungsraten lagen für die Quantifizierung mit Methode I im Mittel bei 87,5 % und für die Quantifizierung mit Methode II im Mittel bei 102 %.

9.3 Nachweis- und Bestimmungsgrenzen

Die Nachweisgrenze bzw. Bestimmungsgrenze wurde in Anlehnung an DIN 32 645 unter Verwendung von Sechspunktkalibrierungen berechnet. Aus der Standardabweichung der erhaltenen Kalibrierfunktion wurde die Nachweisgrenze zu 1,8 ng/L und die Bestimmungsgrenze zu 6,8 ng/L errechnet.

Da die Nachweisstärke vom Alterungszustand des Graphitrohres abhängt, ist die aktuell gültige Nachweis- und Bestimmungsgrenze für jede Serie bzw. Standardaddition aus der jeweiligen Kalibriergeraden zu berechnen. So wurde vom Entwickler der Methode innerhalb der Routineanalytik (n = 59) unter Verwendung von drei Kalibrierpunkten eine mittlere Nachweisgrenze von 3,17 ng/L (Bereich: 0,2–9,0 ng/L) bzw. eine mittlere Bestimmungsgrenze von 12,5 ng/L (Bereich 0,8–35,3 ng/L) bestimmt (Tabelle 6).

Tab. 6 Nachweis- und Bestimmungsgrenze für die Bestimmung von Beryllium in Urin.

	Sechspunktkalibrierung (n = 3) [ng/L]	Dreipunktkalibrierung in der Routine (n = 59) [ng/L]
Nachweisgrenze	1,8	3,17 (Bereich 0,2–9,0)
Bestimmungsgrenze	6,8	12,5 (Bereich 0,8–35,3)

9.4 Störeinflüsse

Die Leistungsfähigkeit der Methode wird vom Graphitrohr und von der Urinmatrix bestimmt.

Das Erreichen einer ausreichenden Präzision und Richtigkeit im niedrigen Konzentrationsbereich wird zum einen von der Qualität des Graphitrohrs und zum anderen von seiner Alterung beeinflusst. In der Regel werden optimale Ergebnisse nach Einbau eines neuen Rohres nach einer Konditionierungsphase erreicht. Da die Empfindlichkeit des Verfahrens bereits nach einer relativ geringen Anzahl von Messungen (ca. 300) deutlich nachlässt und das Graphitrohr ausgetauscht werden muss, wird in der Routine eine Dreipunktkalibrierung unter zusätzlicher Einbeziehung des Blindwertes durchgeführt.

Bei einzelnen Proben können durch Matrixeinflüsse stark streuende Ergebnisse auftreten. In diesem Fall ist ein UV-Aufschluss mit Wasserstoffperoxid zu empfehlen, wobei die eingesetzten Reagenzien und Gefäße auf Blindwertfreiheit geprüft werden müssen.

Methode I und Methode II können zur gegenseitigen Überprüfung von Messergebnissen genutzt werden. Die Anwendung der Untergrundkompensation mit dem Zeeman-Verfahren ist Bestandteil der Methode.

10 Diskussion der Methode

Da Beryllium in der Umwelt nur in äußerst geringen Konzentrationen vorkommt, ist die Hintergrundbelastung der Bevölkerung mit Beryllium sehr gering und lässt sich mit den hier beschriebenen Verfahren nicht erfassen. Allerdings können die hier beschriebenen optimierten und geprüften AAS-Methoden für den arbeitsmedizinisch-toxikologischen Konzentrationsbereich zuverlässig eingesetzt werden.

Sowohl bei der Probengewinnung als auch bei Transport und Lagerung muss darauf geachtet werden, dass keine Kontaminationen auftreten. Die Gefahr einer Kontamination aus der Umgebung ist eher gering, weil hier nur sehr geringe Berylliumkonzentrationen vorhanden sind. Allerdings muss bei der Probenahme eine arbeitsplatzbedingte Kontamination verhindert werden. Die Urinproben sollten daher nach dem Duschen und dem Anlegen der Straßenkleidung gewonnen werden.

Ansonsten müssen die analytischen Bedingungen bei der Bestimmung von Beryllium in Urin den Kriterien der Ultrapurenanalytik entsprechen. Vor allem sollten für die Gewinnung und Aufbewahrung der Urinproben und auch für die Aufbewahrung der Gebrauchslösungen keine Glasgefäße, sondern vorgereinigte Plastikgefäße verwendet werden.

Um die in dieser Methode beschriebene niedrige Nachweis- und Bestimmungsgrenze zu erreichen, ist ein leistungsfähiges Messgerät erforderlich. Dabei kann ein pyrolytisch beschichtetes Graphitrohr sowohl mit als auch ohne Plattform eingesetzt werden. Mit Atomabsorptionsspektrometern verschiedener Hersteller durchgeführte Vergleichsuntersuchungen zeigten, dass durch die Wahl des Graphitrohres die Verfahrenskenndaten optimiert werden können. Ebenfalls wurde der Zusatz von Triton X-100 (0,1 % in Wasser) zu den Proben getestet. Durch den Detergenszusatz verbesserten sich die Verfahrenskenndaten nicht.

Die Kalibriergeradenmethode (Methode I) besitzt gegenüber der Standardadditionsmethode (Methode II) den Vorteil, dass eine größere Probenanzahl mit demselben Graphitrohr analysiert werden kann. Bei stark streuenden Messwerten oder bei

offensichtlichen Matrixeinflüssen kann Methode II zur Absicherung der Ergebnisse dienen. Bei den hier beschriebenen Methoden verändern sich die Messbedingungen aufgrund der Graphitrohralterung kontinuierlich. Da auch ein neues Graphitrohr erst nach einer Konditionierungsphase optimale Ergebnisse liefert, kommt der Qualitätssicherung besondere Bedeutung zu.

Dazu gehören beim Kalibriergeradenverfahren die Rekalibrierung am Ende einer jeden Serie und das Mitführen von mindestens einem Qualitätskontrollstandard je Serie.

Unter anderem hängt auch die Nachweisstärke des Verfahrens vom Alterungszustand des Graphitrohres ab, so dass die Nachweis- und Bestimmungsgrenze für jede Serie bzw. Standardaddition variiert. Vom Entwickler der Methode wurde in der Routineanalytik eine mittlere Bestimmungsgrenze von 12,2 ng Beryllium pro Liter Urin (Bereich: 0,8–35,3 ng/L; $n = 59$) gefunden (siehe Abschnitt 9.3), die eine zuverlässige Erfassung des Biologischen Arbeitsstoff-Referenzwertes (BAR) von 0,05 µg Beryllium/L Urin zulässt. Der Unterschied zwischen der in Anlehnung an die DIN 32 645 und der im Rahmen der Routine ermittelten Bestimmungsgrenze ist mit Faktor zwei gering und das Verfahren als zuverlässig und routinetauglich einzustufen.

Verwendetes Messgerät:

Atomabsorptionsspektrometer Thermo Solaar MQZ mit Zeeman-Untergrundkompensation und Autosampler FS95, Thermo Scientific

11 Literatur

- AfAMed (Ausschuss für Arbeitsmedizin) (2013) Arbeitsmedizinische Regel 6.2: Biomonitoring. Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 5 vom 24. Februar 2014, S. 91
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (2002) Toxicological profile for beryllium. US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, GA, USA
<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/TP.asp?id=1441&tid=33>
- Bader M, Barr D, Gönen Th, Schaller KH, Scherer G, Angerer J, Arbeitsgruppe Analysen in biologischem Material (2010) Zuverlässigkeitskriterien einer analytischen Methode. In: Angerer J und Hartwig A (Hrsg): Analytische Methoden zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Band 2: Analysen in biologischem Material, 19. Lieferung, Wiley-VCH, Weinheim
<https://doi.org/10.1002/3527600418.bireliabd0019>
- Bundesärztekammer (2008) Richtlinien der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung laboratoriumsmedizinischer Untersuchungen. Dt Ärztebl 105: A341–355
- Cherrie JW, Gorman Ng M, Shafrir A, van Tongeren M, Searl A, Sanchez-Jimenez A, Mistry R, Sobey M, Corden C, Rushton L, Hutchings S (2011) Health, socio-economic and environmental aspects of possible amendments to the EU Directive on the protection of workers from the risks related to exposure to carcinogens and mutagens at work; Beryllium and beryllium compounds. IOM Research Project P937/99, Summary Report
- DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) (2017) MAK- und BAT-Werte-Liste 2017, Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Mitteilung Nr. 53,

- Wiley-VCH, Weinheim
<https://doi.org/10.1002/9783527812110>
- Drexler H, Hartwig A (Hrsg) (2010) Beryllium und seine anorganischen Verbindungen, Addendum, Biologische Arbeitsstoff-Toleranz-Werte (BAT-Werte), Expositionsäquivalente für krebserzeugende Arbeitsstoffe (EKA), Biologische Leitwerte (BLW) und Biologische Arbeitsstoff-Referenzwerte (BAR), 17. Lieferung, Wiley-VCH, Weinheim
<https://doi.org/10.1002/3527600418.bb744041verd0017>
- EG (2008) Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, geändert durch Verordnung (EG) Nr. 790/2009 der Kommission vom 10. August 2009 (EG-GHS-Verordnung) (ehemals Richtlinie 67/548/EWG mit Anpassungsrichtlinien in der jeweils gültigen Fassung)
- Greim H (Hrsg) (2003) Beryllium und seine anorganischen Verbindungen, Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten, 37. Lieferung, Wiley-VCH, Weinheim
<https://doi.org/10.1002/3527600418.mb744041verd0037>
- IARC (International Agency for Research on Cancer) (1993) Beryllium, Cadmium, Mercury, and Exposures in the Glass Manufacturing Industry. IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans, Band 58, IARC, Lyon, FR, 41–117
- Lehnert G, Greim H (Hrsg) (2003) Beryllium und seine anorganischen Verbindungen, Biologische Arbeitsstoff-Toleranz-Werte (BAT-Werte) und Expositionsäquivalente für krebserzeugende Arbeitsstoffe (EKA), 11. Lieferung, Wiley-VCH, Weinheim
<https://doi.org/10.1002/3527600418.bb744041verd0011>
- Minoia C, Sabbioni E, Apostoli P, Pietra R, Pozzoli L, Gallorini M, Nicolaou G, Alessio L, Capodaglio E (1990) Trace element reference values in tissues from inhabitants of the European community. I. A study of 46 elements in urine, blood and serum of Italian subjects. *Sci Total Environ* 95: 89–105
- Morton J, Leese E, Cotton R, Warren N, Cocker J (2011) Beryllium in urine by ICP-MS: a comparison of low level exposed workers and unexposed persons. *Int Arch Occup Environ Health* 84: 697–704
- SCOEL (Scientific Committee on Occupational Exposure Limits) (2017) Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for beryllium and inorganic beryllium compounds. SCOEL/REC/175, European Union, Luxemburg
<https://circabc.europa.eu/sd/a/33c8921a-1dbe-4410-909c-2d4c63d8fb1d/REC-175%20Beryllium%20and%20compounds.pdf>
- Stiefel T, Schulze K, Zorn H, Tölg G (1980) Toxicokinetic and toxicodynamic studies of beryllium. *Arch Toxicol* 45: 81–92
- US EPA (US Environmental Protection Agency) (1998) IRIS Toxicological Review of Beryllium and Compounds. US EPA, Washington, DC, USA
- Vincent R, Catani J, Créau Y, Frocaut AM, Good A, Goutet P, Hou A, Leray F, André-Lesage MA, Soyez A (2009) Occupational exposure to beryllium in French enterprises: a survey of airborne exposure and surface levels. *Ann Occup Hyg* 53: 363–372
- WHO (World Health Organization) (1990) Beryllium. IPCS (International Programme on Chemical Safety) Environmental Health Criteria 106, WHO, Genf

Entwickler der Methode: R. Paul

Prüfer der Methode: L. T. Budnik

1726 Biomonitoring Methods

Leiter der Arbeitsgruppe „Analysen in biologischem Material“, Deutsche Forschungsgemeinschaft: T. Göen

Vorsitzende der “Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe”, Deutsche Forschungsgemeinschaft: A. Hartwig

Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Deutsche Forschungsgemeinschaft: MAK Commission

12 Anhang

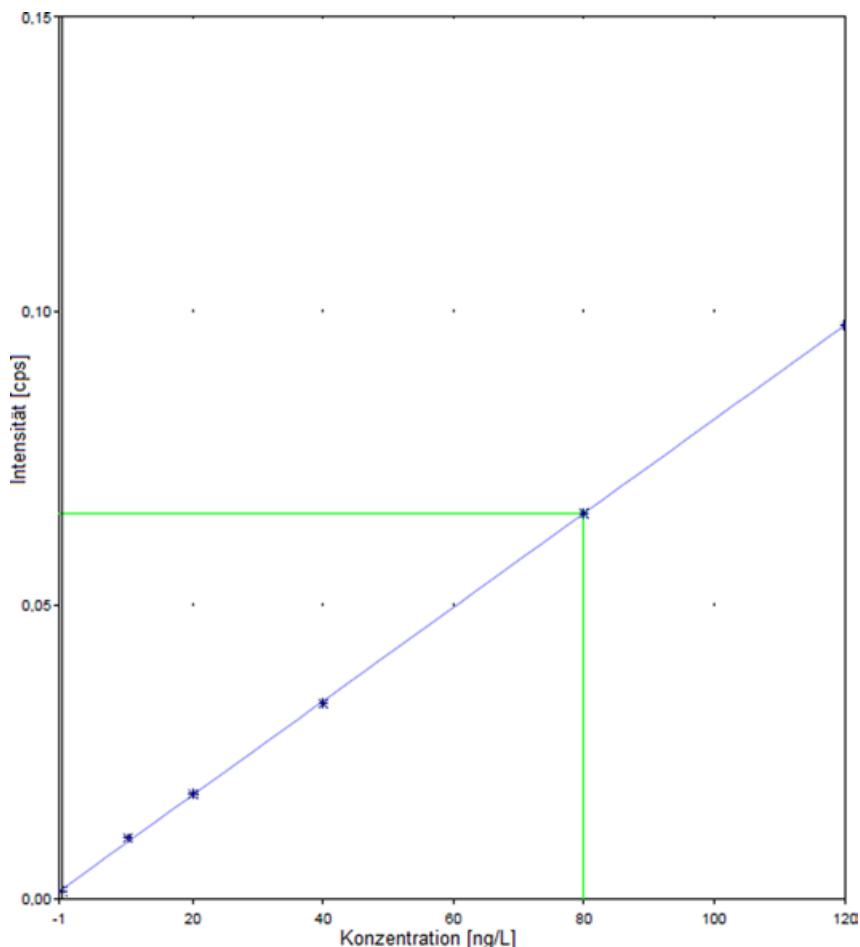


Abb. 1 Kalibrierfunktion von Beryllium in Urin (Methode I) im Konzentrationsbereich bis 120 ng/L (Omega-Küvette).

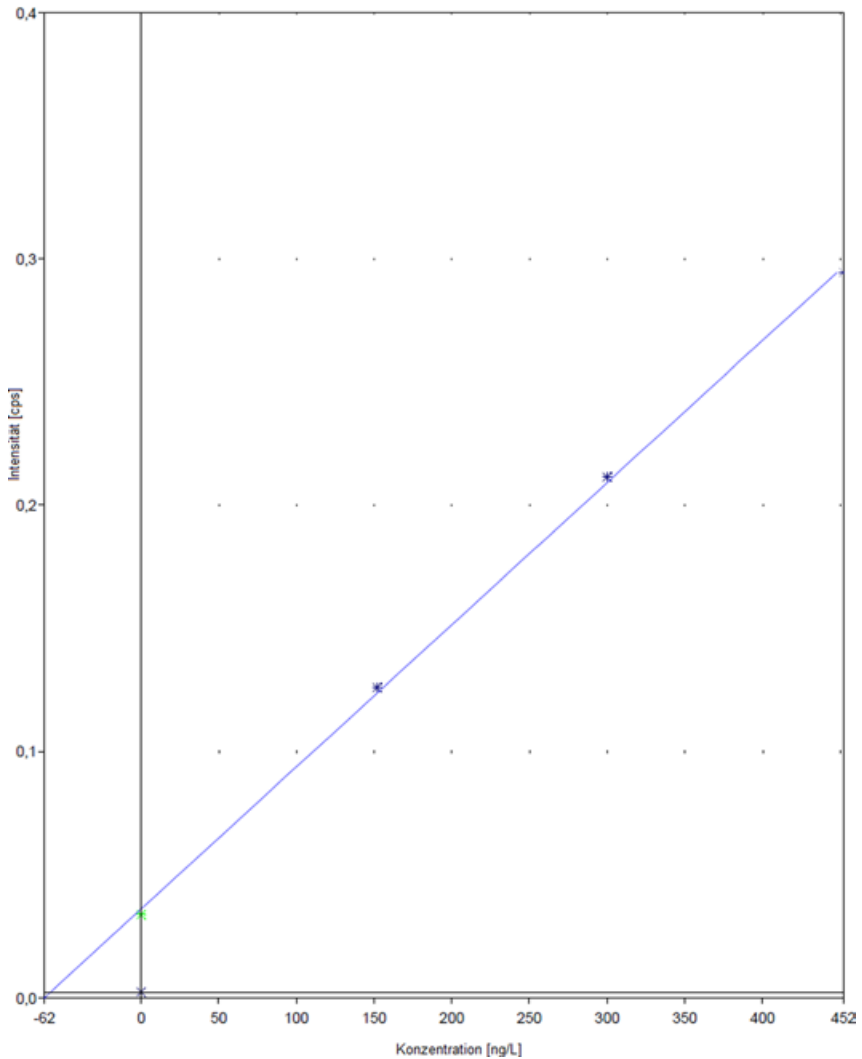


Abb. 2 Grafik einer Standardaddition in Urin eines exponierten Gießers (Nichteisenbereich) mit einem ermittelten Berylliumgehalt von 58 ng/L (ELC-Küvette).

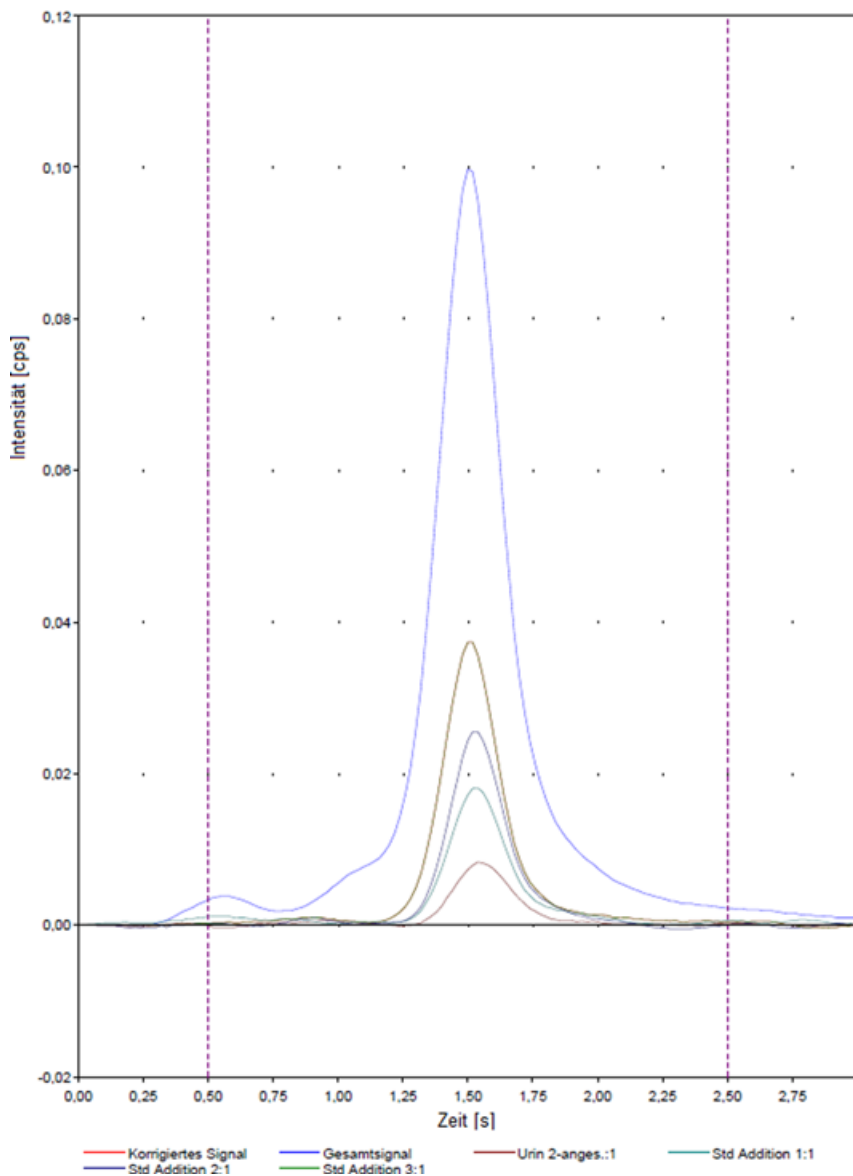


Abb. 3 Atomisierungskurven einer Standardaddition unter Verwendung einer mit 15 ng Beryllium/L dotierten Urinprobe (Omega-Küvette).

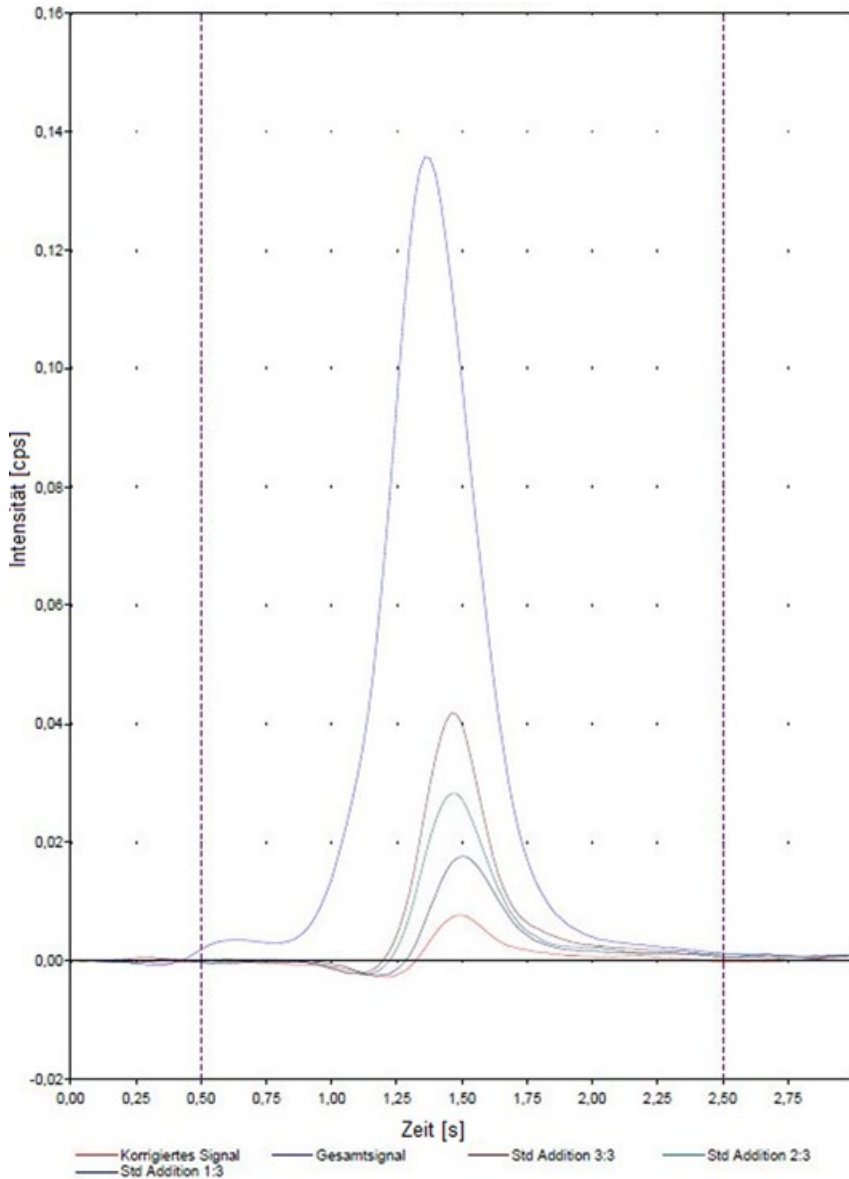


Abb. 4 Atomisierungskurven einer Standardaddition unter Verwendung von Urin eines exponierten Gießers (Nichteisenbereich) mit einem Berylliumgehalt von 13 ng/L (Omega-Küvette).