

DIN EN ISO 22125-2



ICS 13.060.60; 17.240

Einsprüche bis 2019-10-30

Entwurf**Wasserbeschaffenheit –
Technetium 99 –****Teil 2: Verfahren mittels Massenspektrometrie und induktiv gekoppeltem
Plasma (ICP-MS) (ISO/FDIS 22125-2:2019);
Deutsche und Englische Fassung FprEN ISO 22125-2:2019**Water quality –
Technetium-99 –Part 2: Test method using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)
(ISO/FDIS 22125-2:2019);
German and English version FprEN ISO 22125-2:2019Qualité de l'eau –
Technétium-99 –Partie 2: Méthode d'essai par spectrométrie de masse couplée à un plasma induit (ICP-MS)
(ISO/FDIS 22125-2:2019);
Version allemande et anglaise FprEN ISO 22125-2:2019**Anwendungswarnvermerk**

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-08-30 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs
besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an naw@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW), 10772 Berlin, Saatwinkler Damm 42/43, 13627 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW)

Gesamtumfang 62 Seiten

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (FprEN ISO 22125-2:2019) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 147 „Water quality“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 230 „Wasseranalytik“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Unterausschuss NA 119-01-03-08 UA „Radioaktivitätsmessung im Wasser“ des Arbeitsausschusses NA 119-01-03 AA „Wasseruntersuchung“ im DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 3696	siehe	DIN ISO 3696
ISO 5667-1	siehe	DIN EN ISO 5667-1
ISO 5667-3	siehe	DIN EN ISO 5667-3
ISO 5667-4	siehe	DIN 38402-12
ISO 5667-5	siehe	DIN ISO 5667-5
ISO 5667-6	siehe	DIN EN ISO 5667-6
ISO 5667-9	siehe	DIN 38402-16
ISO 5667-10	siehe	DIN 38402-11
ISO 5667-14	siehe	DIN EN ISO 5667-14
ISO 10703	siehe	DIN EN ISO 10703
ISO/IEC 17025	siehe	DIN EN ISO/IEC 17025
ISO 17294-2	siehe	DIN EN ISO 17294-2
ISO 80000-10	siehe	DIN EN ISO 80000-10

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN 38402-11, *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung — Allgemeine Angaben (Gruppe A) — Teil 11: Probenahme von Abwasser (A 11)*

DIN 38402-12, *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung — Allgemeine Angaben (Gruppe A) — Probenahme aus stehenden Gewässern (A 12)*

DIN 38402-16, *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung — Allgemeine Angaben (Gruppe A) — Probenahme aus dem Meer (A 16)*

DIN EN ISO 5667-1, *Wasserbeschaffenheit — Probenahme — Teil 1: Anleitung zur Erstellung von Probenahmeprogrammen und Probenahmetechniken*

DIN EN ISO 5667-3, *Wasserbeschaffenheit — Probenahme — Teil 3: Konservierung und Handhabung von Wasserproben*

DIN EN ISO 5667-6, *Wasserbeschaffenheit — Probenahme — Teil 6: Anleitung zur Probenahme aus Fließgewässern*

DIN EN ISO 5667-14, *Wasserbeschaffenheit — Probenahme — Teil 14: Anleitung zur Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle bei der Entnahme und Handhabung von Wasserproben*

DIN EN ISO 10703, *Wasserbeschaffenheit — Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Radionukliden — Verfahren mittels hochauflösender Gammaskpektrometrie*

DIN EN ISO/IEC 17025, *Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien*

DIN EN ISO 17294-2, *Wasserbeschaffenheit — Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) — Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope*

DIN EN ISO 80000-10, *Größen und Einheiten — Teil 10: Atom- und Kernphysik*

DIN ISO 3696, *Wasser für analytische Zwecke; Anforderungen und Prüfungen*

DIN ISO 5667-5, *Wasserbeschaffenheit — Probenahme — Teil 5: Anleitung zur Probenahme von Trinkwasser aus Aufbereitungsanlagen und Rohrnetzsystemen*

— Leerseite —

Wasserbeschaffenheit — Technetium 99 — Teil 2: Verfahren mittels Massenspektrometrie und induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) (ISO/FDIS 22125-2:2019)

Qualité de l'eau — Technétium-99 — Partie 2 : Méthode d'essai par spectrométrie de masse couplée à un plasma induit (ICP-MS) (ISO/FDIS 22125-2:2019)

Water quality — Technetium-99 — Part 2: Test method using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) (ISO/FDIS 22125-2:2019)

ICS:

Deskriptoren:

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp:
Dokumentstufe: parallele formelle Abstimmung vorgelegt
Dokumentsprache: D

STD Version 2.9p

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen	9
3.1 Begriffe	9
3.2 Symbole und Abkürzungen	9
4 Kurzbeschreibung des Verfahrens	12
5 Probenahme, Handhabung und Lagerung	12
6 Durchführung	13
6.1 Probenvorbereitung für die Messung	13
6.2 Messung der Probe	13
7 Qualitätssicherungs- und Qualitätskontrollprogramm	13
7.1 Allgemeines	13
7.2 Variablen, die die Messung beeinflussen könnten	14
7.3 Überprüfung der Geräte	14
7.4 Verunreinigung	14
7.5 Prüfung auf Störungen	14
7.6 Überprüfung des Verfahrens	14
7.7 Nachweis der Eignung der analysierenden Person	15
8 Angabe der Ergebnisse	15
8.1 Verwendung von Re, ⁹⁷ Tc oder ⁹⁸ Tc als Ausbeutetracer	15
8.1.1 Berechnung der zugesetzten Tracermasse und des Analyten	15
8.1.2 Bias der Messung	16
8.1.3 Massenkonzentration der Probe	16
8.1.4 Nachweisgrenze	16
8.1.5 Bestimmungsgrenze	16
8.2 Verwendung von ^{95m} Tc, ^{97m} Tc oder ^{99m} Tc als Ausbeutetracer	17
8.2.1 Berechnung der zugesetzten Traceraktivität, Masse des Analyten und Masse des internen Standards	17
8.2.2 Wiederfindung nach dem Reinigungsschritt	18
8.2.3 Bias der Messung	18
8.2.4 Massenkonzentration der Probe	18
8.2.5 Nachweisgrenze	18
8.2.6 Bestimmungsgrenze	18
8.2.7 Umrechnung der Massenkonzentration auf die Aktivitätskonzentration	19
8.2.8 Umrechnung der Massenkonzentration auf die Volumeneinheit	19
8.3 Korrektur der Anwesenheit von ⁹⁹ Tc im Tracer	19
9 Prüfbericht	20
Anhang A (informativ) Verfahren 1 — TEVA ¹ -Harz	21

A.1	Kurzbeschreibung des Verfahrens.....	21
A.2	Reagenzien und Geräte.....	21
A.2.1	Reagenzien.....	21
A.2.2	Geräte.....	22
A.3	Durchführung	22
A.3.1	Probenvorbereitung.....	22
A.3.2	Probenreinigung durch Extraktionschromatographie	22
A.3.3	Probenvorbereitung für die ICP-MS-Messung	23
A.3.4	Messung	23
Anhang B (informativ) Verfahren 2 — TRU²-Harz.....		24
B.1	Kurzbeschreibung des Verfahrens.....	24
B.2	Reagenzien und Geräte.....	24
B.2.1	Reagenzien.....	24
B.2.2	Geräte.....	25
B.3	Durchführung	25
B.3.1	Probenvorbereitung.....	25
B.3.2	Calciumphosphat-Präzipitation.....	26
B.3.3	Probenreinigung durch Extraktionschromatographie	26
B.3.4	Messung	26
Anhang C (informativ) Verfahren 3 — Anionenaustauscherharz		28
C.1	Kurzbeschreibung des Verfahrens.....	28
C.2	Reagenzien und Geräte.....	28
C.2.1	Reagenzien.....	28
C.2.2	Geräte.....	29
C.3	Durchführung	29
C.3.1	Probenvorbereitung.....	29
C.3.2	Probenreinigung durch Anionenaustauscherchromatographie	29
C.3.3	Probenvorbereitung für die ICP-MS-Messung	30
C.3.4	Messung	30
Literaturhinweise.....		31

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (FprEN ISO 22125-2:2019) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 147 „Water quality“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 230 „Wasseranalytik“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen formellen Abstimmung vorgelegt.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/FDIS 22125-2:2019 wurde von CEN als FprEN ISO 22125-2:2019 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Themen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 147, *Water quality*, Unterkomitee SC 3, *Radioactivity measurements*, erarbeitet.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 22125 ist auf der ISO-Internetseite abrufbar.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

Einleitung

Radioaktivität aus natürlich vorkommenden und anthropogenen Quellen ist in der gesamten Umwelt vorhanden. Daher können Wasserkörper (z. B. Oberflächengewässer, Grundwässer, Meerwasser) Radionuklide aus natürlichen oder anthropogenen Quellen enthalten:

- natürliche Radionuklide, einschließlich ^{40}K , ^3H , ^{14}C , und solche aus der Thorium- und Uran-Zerfallsreihe, insbesondere ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{234}U , ^{238}U , ^{210}Po und ^{210}Pb , können in Wässern aufgrund natürlicher Ursachen auftreten (z. B. Desorption aus Böden und Auswaschung durch Regenwasser) oder können durch technologische Prozesse unter Verwendung von natürlich auftretenden radioaktiven Materialien freigesetzt werden (z. B. Abbau und Aufbereitung von Mineralsanden oder Produktion und Anwendung von Phosphat-Düngern);
- anthropogene Radionuklide, wie Elemente der Transurane (Americium, Plutonium, Neptunium, Curium), ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr und gamma-strahlende Radionuklide, können ebenfalls in natürlichen Wässern vorkommen. Kleine Mengen dieser Radionuklide können ebenfalls in natürlichen Wässern als Ergebnis genehmigter betrieblicher Freisetzungen in die Umwelt über Einleitungen aus Einrichtungen zur Gewinnung nuklearer Energie vorkommen. Radionuklide werden ebenfalls über die medizinische und industrielle Anwendung in ungekapselter Form in die Umwelt freigesetzt. Sie werden im Wasser auch als Ergebnis von Kontaminationen durch Fallouts aus der Explosion von Nuklearwaffen in der Atmosphäre und Störfällen, wie solchen, die in Tschernobyl und Fukushima erfolgt waren, gefunden.

Radionuklidaktivitätskonzentrationen in Wasserkörpern können aufgrund lokaler geologischer und klimatischer Bedingungen variieren und können lokal und zeitweise durch Freisetzungen aus Nukleareinrichtungen während geplanter, tatsächlicher und notfallbedingter Expositionssituationen [1] erhöht sein. Trinkwasser kann daher Radionuklide in Aktivitätskonzentrationen enthalten, die ein Risiko für die menschliche Gesundheit darstellen könnten.

Radionuklide in flüssigen Einleitungen werden üblicherweise vor der Einleitung in die Umwelt [2] und in Wasserkörper kontrolliert. Die Radioaktivität von Trinkwasser wird nach den Empfehlungen der World Health Organization (WHO) [3] überwacht, sodass geeignete Maßnahmen getroffen werden können, um negative Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung abzuwenden. Unter Befolgung dieser internationalen Empfehlungen werden durch nationale Rechtsvorschriften üblicherweise zulässige Grenzwerte für Radionuklidkonzentrationen in flüssigen Einleitungen in die Umwelt und Radionuklid-Richtwerte für Wasserkörper und Trinkwasser für geplante, tatsächliche und notfallbedingte Expositionssituationen festgelegt. Die Übereinstimmung mit solchen Grenzwerten kann mittels Messergebnissen und den dazu gehörenden Messunsicherheiten, entsprechend ISO/IEC Guide 98-3 und ISO 5667-20 [4] geprüft werden.

In Abhängigkeit von der Expositionssituation bestehen unterschiedliche Grenzwerte und Richtwerte, die für Maßnahmen zur Verminderung von Gesundheitsrisiken gelten. Zum Beispiel beträgt der Richtwert der WHO-Leitlinien in einer geplanten oder tatsächlichen Situation für Trinkwasser $100 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ für die ^{99}Tc -Aktivitätskonzentration [3].

ANMERKUNG 1 Der Richtwert ist die Aktivitätskonzentration, die mit der Aufnahme von 2 l/d Trinkwasser über den Zeitraum von einem Jahr auftritt und zu einer effektiven Dosis von 0,1 mSv/a bei Erwachsenen führt. Dies ist eine effektive Dosis, die nicht Anlass zu nachweisbaren negativen gesundheitlichen Wirkungen gibt [3].

Für den Fall eines nuklearen Notfalls wird in den Leitlinienwerten des Codex Alimentarius der WHO [5] erwähnt, dass die Aktivitätskonzentration für ^{99}Tc nicht größer als $10\,000 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ sein darf.

ANMERKUNG 2 Die Leitlinienwerte des Codex Alimentarius (en: Codex Guidelines Levels) gelten für Radionuklide in für die menschliche Ernährung bestimmten Lebensmitteln, die international gehandelt werden und nach einem nuklearen oder radiologischen Notfall kontaminiert worden sind. Diese Leitlinienwerte gelten für Lebensmittel nach der Rekonstituierung bzw. im verzehrfertigen Zustand, d. h. sie gelten nicht für getrocknete oder konzentrierte Lebensmittel und basieren auf einem Eingreifschwellenwert von 1 mSv je Jahr für die allgemeine Öffentlichkeit (Kinder und Erwachsene) [5].

Daher kann das Prüfverfahren so angepasst werden, dass die charakteristischen Grenzen, Entscheidungsschwellenwert, Nachweisgrenze und Messunsicherheiten sicherstellen, dass die Radionuklidaktivitätskonzentrationen verifizierbar unterhalb der Richtwerte liegen, die von einer nationalen Behörde zur Einhaltung in geplanten Routine-Situationen oder in Notfallsituationen festgelegt sind [5] [6] [7].

Üblicherweise können die Prüfverfahren für die Messung der Aktivitätskonzentration der Radionuklide entweder in Abwasser vor der Endlagerung und Einleitungen vor deren Freisetzung in die Umwelt angepasst werden. Die Untersuchungsergebnisse setzen den Betreiber der Anlage/Einrichtung in die Lage, vor der Freisetzung von Abwasser/Einleitungen zu verifizieren, dass Radioaktivitätskonzentrationen nicht die behördlichen Grenzen überschreiten.

Die in diesem Dokument beschriebenen Prüfverfahren dürfen sowohl in geplanten, tatsächlichen und notfallbedingten Expositionssituationen als auch für Abwasser und Einleitungen mit besonderen Modifikationen, die die Gesamtmessunsicherheit, die Nachweisgrenze und den Schwellenwert erhöhen könnten, angewendet werden.

Die Prüfverfahren dürfen für Wasserproben nach geeigneter Probenahme, Probenbehandlung und Vorbereitung der Untersuchungsprobe verwendet werden (siehe betreffenden Teil der Normenreihe ISO 5667).

Dieses Dokument wurde als Antwort auf den Bedarf von Prüflaboren entwickelt, die diese Messungen durchführen, die in einigen Fällen von nationalen Behörden gefordert werden, da diese Labore möglicherweise eine besondere Akkreditierung für die Messung von Radionukliden in Trinkwasserproben erlangen müssen.

Dieses Dokument gehört zu einer Reihe von Internationalen Normen über Prüfverfahren für die Messung von Aktivitätskonzentrationen von Radionukliden in Wasserproben.

WARNUNG — Personen, die dieses Dokument anwenden, sollten mit der üblichen Laborpraxis vertraut sein. Dieses Dokument gibt nicht vor, alle unter Umständen mit der Anwendung des Verfahrens verbundenen Sicherheitsaspekte anzusprechen. Es liegt in der Verantwortung des Anwenders, geeignete Verhaltensregeln zur Sicherheit und Gesundheit festzulegen und die Gültigkeit etwaiger anderer Einschränkungen zu bestimmen.

WICHTIG — Es ist erforderlich, bei den Untersuchungen nach diesem Prüfverfahren Fachleute einzuschalten.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt ein Verfahren zur Messung von ^{99}Tc in allen Wasserarten durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (en: inductively coupled plasma mass spectrometry; ICP-MS) fest.

Das Verfahren ist auf Untersuchungsproben von Versorgungs-/Trinkwasser, Regenwasser, Oberflächen- und Grundwasser sowie Kühlwasser, Prozesswasser, häusliches und gewerbliches Abwasser nach geeigneter Probenahme, Probenbehandlung und Vorbereitung der Untersuchungsprobe anwendbar. Es ist eine Filtration der Untersuchungsprobe notwendig.

Die Nachweisgrenze hängt vom Probenvolumen und dem verwendeten Gerät ab. Das in diesem Dokument beschriebene Verfahren hat, bei Verwendung derzeit verfügbarer ICP-MS-Geräte, eine Nachweisgrenze von etwa $0,2 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $0,5 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ (entsprechend $0,1 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $0,3 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$); dies liegt unter den WHO-Kriterien für den sicheren Verzehr von Trinkwasser ($100 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$) [3]. Das in diesem Dokument beschriebene Verfahren ist nicht für die Bestimmung von ^{99}Tc im Ultraspurenbereich vorgesehen.

In diesem Dokument werden die Massenkonzentrationswerte bezogen auf die Masseneinheit statt auf die Volumeneinheit der Probe ausgedrückt, wie dies üblicherweise bei vergleichbaren Standards der Fall ist. Der Grund dafür ist, dass ^{99}Tc in verschiedenen Matrixtypen wie Süßwasser oder Meerwasser gemessen wird, die hinsichtlich der Dichte signifikant unterschiedlich sind. Durch Messen des Probenvolumens können die Massenkonzentrationswerte auf einfache Weise auf die Volumeneinheit der Probe bezogen umgerechnet werden. Dies führt allerdings zur Erhöhung der Messunsicherheit des Massenkonzentrationsergebnisses.

Das in diesem Dokument beschriebene Verfahren ist bei Notfallsituationen anwendbar; dies gilt jedoch nicht, wenn $^{99\text{m}}\text{Tc}$ in Mengen vorhanden ist, die eine Interferenz verursachen könnten.

Die Analyse von Tc, das an Schwebstoffen adsorbiert ist, wird nicht durch dieses Verfahren abgedeckt.

Es liegt in der Verantwortung des Anwenders, die Validität dieses Prüfverfahrens für die zu prüfenden Wasserproben sicherzustellen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

ISO/IEC Guide 99, *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*

ISO 3696, *Water for analytical laboratory use — Specification and test methods*

ISO 5667-1, *Water quality — Sampling — Part 1: Guidance on the design of sampling programmes and sampling techniques*

ISO 5667-3, *Water quality — Sampling — Part 3: Preservation and handling of water samples*

ISO 5667-10, *Water quality — Sampling — Part 10: Guidance on sampling of waste waters*

ISO 10703, *Water quality — Determination of the activity concentration of radionuclides — Method by high resolution gamma-ray spectrometry*

ISO 11929 (all parts), *Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation — Fundamentals and application*

ISO/IEC 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

ISO 17294-2, *Water quality — Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) — Part 2: Determination of selected elements including uranium isotopes*

ISO 20042, *Measurement of radioactivity — Gamma emitting radionuclides — Generic test method using gamma spectrometry*

ISO 80000-10, *Quantities and units — Part 10: Atomic and nuclear physics*

3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 80000-10, ISO 11929, ISO/IEC Guide 98-3 und ISO/IEC Guide 99.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

3.2 Symbole und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Symbole und Bezeichnungen nach ISO 80000-10, ISO 11929, ISO/IEC Guide 98-3 und ISO/IEC Guide 99 sowie die folgenden Symbole und Bezeichnungen.

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit (Symbol)	Definition
α	Bias der Messung	—	α ist eine Konstante, die es ermöglicht, die systematische Abweichungskomponente (Bias) der Signalintensität zwischen dem Tracer oder internen Standard und dem Analyten zu korrigieren
C	Aktivitätskonzentration	Bq · kg ⁻¹	entspricht der Aktivitätskonzentration ρ , gemessen für ein gegebenes Radionuklid
C _s	spezifische Aktivität	Bq · g ⁻¹	Aktivität, die einem Gramm des Radionuklids entspricht

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit (Symbol)	Definition
DL	Nachweisgrenze, in Massenkonzentration	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	DL ist die niedrigste Massenkonzentration, die statistisch als unterschiedlich von der einer Blindprobe angesehen werden kann
DL_C	Nachweisgrenze, in Aktivitätskonzentration	$\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$	DL ist die niedrigste Aktivitätskonzentration, die statistisch als unterschiedlich von der einer Blindprobe angesehen werden kann
LOQ	Bestimmungsgrenze, in Massenkonzentration	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	LOQ ist die niedrigste Massenkonzentration, die mit statistischer Sicherheit quantifiziert werden kann
LOQ_C	Bestimmungsgrenze, in Aktivitätskonzentration	$\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$	LOQ ist die niedrigste Aktivitätskonzentration, die mit statistischer Sicherheit quantifiziert werden kann
m	Masse der Probe	kg	Masse der untersuchten Wasserprobe
m/z	Masse-zu-Ladungs-Verhältnis	—	Verhältnis von Masse zu Ladung, gemessen mittels ICP-MS
m_A	Masse des Analyten	g	Masse des Analyten, die zu einer aufgestockten Lösung zugegeben wird
m_{As}	Masse der Analytlösung	g	Masse der Analytlösung, die zu einer Kontrollprobe zugegeben wird oder zur Berechnung der Messung dient
m_{IS}	Masse des internen Standards	g	Masse des internen Standards, die zur Blindprobe und zur Probe zugegeben wird
m_{ISS}	Masse der internen Standardlösung	g	Masse der internen Standardlösung, die zu einer Blindprobe oder einer Probe zugegeben wird
m_T	Tracermasse	g	Masse des Tracers, die zur Blindprobe und zur Probe zugegeben wird
m_{TB}	Tracermasse des Reagenzien-Blindwerts	g	Masse des Tracers, die zur Reagenzien-Blindprobe zur Berechnung von N_{net} zugegeben wird
m_{TS}	Masse der Tracerlösung	g	Masse der Tracerlösung, die zu einer Blindprobe oder einer Untersuchungsprobe gegeben wird
N	Zählimpulse	Zählimpulse	Anzahl der direkt erhaltenen Impulse, wenn die ICP-MS-Messung einer Probe bei einem gegebenen Masse-zu-Ladungs-Verhältnis durchgeführt wird
N_0	Zählimpulse der Blindprobe	Zählimpulse	Anzahl der direkt erhaltenen Impulse, wenn die ICP-MS-Messung einer Blindprobe bei einem gegebenen Masse-zu-Ladungs-Verhältnis durchgeführt wird
$\overline{N_0}$	Durchschnittliche Anzahl der Zählimpulse von Blindproben	Zählimpulse	durchschnittliche Anzahl der direkt erhaltenen Impulse, wenn die ICP-MS-Messung für mehrere Blindproben bei einem gegebenen Masse-zu-Ladungs-Verhältnis durchgeführt wird
N_{net}	Netto-Zählimpulse	Zählimpulse	$N - N_0$

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit (Symbol)	Definition
N_{netIS}	Netto-Zählimpulse des internen Standards	Zählimpulse	bei der Masse des internen Standards
N_{netT}	Netto-Impulszahl des Tracers	Zählimpulse	bei der Masse des Tracers
N_{sp}	Zählimpulse der aufgestockten Reagenzien-Blindprobe	Zählimpulse	Zählrate der aufgestockten Reagenzien-Blindprobe zur Berechnung von N_{net}
N_{T}	^{99}Tc -Zählimpulse aus dem Tracer	Zählimpulse	^{99}Tc , das im Tracer als Verunreinigung enthalten ist
N_{us}	Zählimpulse der nicht aufgestockten Reagenzien-Blindprobe	Zählimpulse	Zählrate der nicht aufgestockten Reagenzien-Blindprobe zur Berechnung von N_{net}
R_{c}	chemische Wiederfindung	—	Wiederfindung nach dem Reinigungsschritt, gemessen mittels Gamma-Spektrometrie
S	Standardabweichung	Zählimpulse	
s_{N0}	Standardabweichung	Zählimpulse	Standardabweichung, die mit den bei der Messung von 10 Analysenteilproben einer Blindprobe erhaltenen Werten verbunden ist
U	erweiterte Unsicherheit	—	Produkt aus der Standardunsicherheit und dem Erweiterungsfaktor k , wobei $k = 1, 2, \dots$, $U = k \cdot u$
μ	Standardunsicherheit	—	Messunsicherheit einer Größe wie Masse, Zählimpulse usw.
$\mu[\text{C}]$	Standardunsicherheit der Aktivitätskonzentration	$\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$	Standardunsicherheit, die mit dem Messergebnis der Aktivitätskonzentration verbunden ist
$\mu[\rho]$	Standardunsicherheit der Massenkonzentration	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Standardunsicherheit, die mit dem Messergebnis der Massenkonzentration verbunden ist
ρ	Massenkonzentration	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Masse des Analyten für ein gegebenes Radionuklid je Masseneinheit der Probe
ρ_{A}	Massenkonzentration der Analyt- (^{99}Tc -)Standardlösung	$\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Masse des Analyten für ein gegebenes Radionuklid je Volumeneinheit der Probe der Standardlösung
ρ_{T}	Massenkonzentration der Tracerlösung	$\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Masse des Tracers für ein gegebenes Radionuklid je Volumeneinheit der Probe der Tracerlösung

4 Kurzbeschreibung des Verfahrens

Das Element Technetium stammt hauptsächlich aus anthropogenen Quellen, es kommt in Spuren aber auch in Uranerzen vor. Es besitzt kein stabiles Isotop. ^{99}Tc ist ein bedeutendes Spaltprodukt von ^{235}U (ungefähr 6 % Ausbeute [8]) mit einer maximalen Beta-Energie von $(294 \pm 1) \text{ keV}$ und einer Halbwertszeit von $(2,1 \pm 0,1) \times 10^5$ Jahren [9].

Zur Bestimmung von ^{99}Tc in Wasser wird eine Wasserprobe genommen, filtriert, angesäuert und oxidiert (siehe Abschnitt 5 zu Probenahme und Lagerung).

Vor der chemischen Trennung wird ein Tracer zugesetzt, um die Verluste während des Reinigungsschritts zu berücksichtigen. Es wird genügend Tracer zugegeben, sodass eine gute statistische Präzision erhalten und eine leichte Unterscheidbarkeit von einer Blindprobe erreicht wird. Tracer, die verwendet werden können, sind stabiles Re, $^{95\text{m}}\text{Tc}$, $^{97\text{m}}\text{Tc}$, ^{97}Tc , ^{98}Tc und $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

Die Tc-Isotope $^{95\text{m}}\text{Tc}$ und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ sind am einfachsten im Handel erhältlich. ^{97}Tc und ^{98}Tc sind derzeit kommerziell nicht erhältlich. Die Isotope $^{95\text{m}}\text{Tc}$, $^{97\text{m}}\text{Tc}$ und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ haben eine kurze radiologische Halbwertszeit und können nicht als interner Standard (IS) verwendet werden (sie werden nicht durch die ICP-MS erfasst), um die Schwankungen des Signals durch das ICP-MS-Messgerät zu korrigieren; daher wird ein interner Standard wie ^{115}In vor der Messung zugegeben. Bei Verwendung von $^{99\text{m}}\text{Tc}$ sollte der Standard so wenig ^{99}Mo wie möglich enthalten [10]. Die Aktivitäten von $^{95\text{m}}\text{Tc}$ und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ werden durch Gamma-Spektrometrie nach ISO 10703 und ISO 20042 gemessen.

Stabiles Re wird aufgrund seiner ähnlichen Reaktivität oft als Ausbeutetracer bei Tc-Messungen eingesetzt [8]. Es hat die Vorteile der leichten Verfügbarkeit und der Stabilität, und es kann mittels ICP-MS gemessen werden. Tc und Re zeigen bei Erwärmung in saurer Lösung ein unterschiedliches Verhalten: Tc ist flüchtiger [11] [12]; folglich kann Re nicht als Ausbeutetracer verwendet werden, wenn bei dem Verfahren ein Eindampfungsschritt vorgesehen ist.

Die potentiellen Störstoffkomponenten für die Messung von ^{99}Tc mittels ICP-MS werden chemisch entfernt. Die beiden wesentlichen Störstoffkomponenten sind $^{98}\text{MoH}^+$ und $^{99}\text{Ru}^+$. Verfahren zur Reinigung von ^{99}Tc werden detailliert in den Anhängen A bis C beschrieben.

Abschließend wird ^{99}Tc mittels ICP-MS gemessen und die Massen- oder Aktivitätskonzentration von ^{99}Tc berechnet und dokumentiert (weitere Details siehe 6.2).

5 Probenahme, Handhabung und Lagerung

Die Probenahme sowie die Handhabung und Lagerung des Wassers müssen wie in ISO 5667-1, ISO 5667-3 und ISO 5667-10 festgelegt erfolgen; Richtlinien für die verschiedenen Wasserarten sind den Literaturhinweisen [13] bis [20] zu entnehmen. Es ist wichtig, dass das Labor eine wirklich repräsentative Probe empfängt, die während des Transports oder der Lagerung nicht beschädigt oder verändert wurde.

Die Probe wird durch $0,45\text{-}\mu\text{m}$ -Filter filtriert, um Schwebstoffe zu entfernen. Es kann auch ein Filter mit kleinerer Porengröße verwendet werden, die Filtration könnte dann jedoch etwas schwieriger und zeitaufwendiger sein. Technetium (VII) adsorbiert nicht stark an Kunststoff- oder Glasbehälter, aber es könnte durch organische Substanzen in der Probe zu Technetiumoxid (TcO_2) reduziert werden. Nach der Filtration wird die Probe angesäuert, und zwar durch Zugabe von Salpetersäure (HNO_3) auf eine Konzentration von $0,01 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ HNO_3 . Anschließend wird Wasserstoffperoxid (H_2O_2) zugegeben, um Tc in Form von TcO_4^- zu erhalten und seine Adsorption an die Gefäßwandung herabzusetzen. Es wird eine H_2O_2 -Zugabe empfohlen, sodass in der Probe eine Konzentration von $0,02 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ gegeben ist.

6 Durchführung

6.1 Probenvorbereitung für die Messung

Die Proben sowie eine, wie in Abschnitt 5 angegeben, mit ultrareinem Wasser vorbereitete Blindprobe filtrieren, ansäuern und oxidieren. Für alle beschriebenen Verfahren ist mindestens eine Blindprobe, die den Tracer enthält, erforderlich. Es kann jedoch auch der Durchschnittswert von mehreren Blindproben verwendet werden. Darüber hinaus ermöglicht die Messung von Blindproben in regelmäßigen Zeitintervallen, schnell ein Problem beim Hintergrund-Signal (Nulleffekt) zu erkennen, wenn die Proben gemessen werden (hinsichtlich eines Qualitätssicherungs- und Qualitätskontrollprogramm siehe Abschnitt 7).

Den Tracer nach einem der in den Anhängen A bis C beschriebenen Reinigungsverfahren zugeben. Es kann ein gleichwertiges Verfahren angewendet werden; dieses muss aber alle in diesem Dokument genannten Kriterien erfüllen.

Die Proben von potentiellen Störstoffkomponenten durch Anwendung eines der in den Anhängen A, B oder C beschriebenen Verfahren reinigen.

Nur für die Tracer ^{95m}Tc , ^{97m}Tc und ^{99m}Tc die Wiederfindung mittels Gamma-Spektrometrie bestimmen und den internen Standard zur Probe geben.

Die Signalintensität des ^{99}Tc sowie des Tracers oder internen Standards mittels ICP-MS messen.

6.2 Messung der Probe

Die Signalintensität des ^{99}Tc und des Tracers oder internen Standards wird mithilfe des ICP-MS-Geräts gemessen. Die Massenkonzentration von ^{99}Tc sowie des Tracers oder eingesetzten internen Standards wird gemessen. Dabei sollten die vom Hersteller zur Verfügung gestellten Anweisungen zum Gebrauch des ICP-MS-Geräts sowie die in ISO 17294-2 beschriebenen Schritte befolgt werden.

Die Nachweisempfindlichkeit, die instrumentelle Nachweisgrenze und die Präzision der Messung sollten für jede mit dem Gerät durchgeführte Analyse bestimmt werden. Die Störstoffkomponenten für die interessierenden Massen sollten in einer separaten Tabelle ausgewiesen werden. Der Bias der Messung sollte für jede Messung bestimmt werden.

Eine Spülsequenz, durch die die Signalintensität des Analyten sowie von Tracer oder internem Standard wieder auf das Nulleffekt-Niveau zurückgebracht wird, muss nach jeder Messung durchgeführt werden. Bei der Messung von Tc und Re mittels ICP-MS treten häufig Memory-Effekte auf. Das Probeneinlass-System darf mit einer Lösung HNO_3 (z. B. 2 %), gefolgt von Wasser gespült werden. Die dazu verwendete Säure und das Wasser sind mindestens von einem für die ICP-MS geeigneten Qualitätsgrad. Anschließend sollte eine Blindwertlösung verarbeitet werden, um zu bestätigen, dass sämtliche Reste von Tc und Re aus dem System entfernt wurden.

7 Qualitätssicherungs- und Qualitätskontrollprogramm

7.1 Allgemeines

Die Tätigkeiten zur Qualitätskontrolle müssen den Anforderungen von ISO/IEC 17025 entsprechen. Die Messverfahren müssen von entsprechend qualifizierten Mitarbeitern und unter Anwendung eines Qualitätssicherungsprogramms durchgeführt werden.

7.2 Variablen, die die Messung beeinflussen könnten

Besondere Sorgfalt muss einer möglichst vollständigen Einschränkung des Einflusses von Parametern gelten, die eine systematische Abweichungskomponente (Bias) bei der Messung darstellen und zu einem nicht repräsentativen Ergebnis führen können. Das Versäumnis, ausreichende Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen, kann die Anwendung von Korrekturfaktoren auf das Messergebnis erforderlich machen.

Einflussgrößen können die folgenden Phasen des Messprozesses beeinflussen: Probenahme, Transport und Lagerung, Reagenzien, Transfer und die Messung.

7.3 Überprüfung der Geräte

Die wesentlichen Geräteparameter (Nachweiseffizienz, Nulleffekt) müssen in regelmäßigen Zeitabständen im Rahmen eines vom Labor festgelegten Qualitätssicherungsprogramms und entsprechend den Anweisungen des Herstellers überprüft werden.

7.4 Verunreinigung

Die Reagenzien sind durch die regelmäßig durchgeführten Analysen von Reagenzien-Blindproben auf Verunreinigung zu überprüfen. Die Laborverfahren müssen sicherstellen, dass Verunreinigungen im Labor und der Geräte ebenso vermieden werden wie eine Kreuzkontamination der Proben.

7.5 Prüfung auf Störungen

Es liegt in der Verantwortung des Anwenders sicherzustellen, dass alle potentiellen Störstoffkomponenten entfernt wurden. Die Entfernung potentieller Störstoffkomponenten wird durch den Dekontaminationsfaktor des Verfahrens und die instrumentelle Leistungsfähigkeit begrenzt.

Die wesentlichen Störstoffkomponenten für die Messung von ^{99}Tc mittels ICP-MS sind $^{98}\text{MoH}^+$ und $^{99}\text{Ru}^+$. Es entspricht guter Praxis, diese Störstoffkomponenten während des Messschritts zu kontrollieren, um ihren Einfluss auf m/z 99 zu beurteilen. Mo und Ru können bei einem m/z von 95 bzw. 101 ohne Interferenzen gemessen werden. Falls Mo und/oder Ru einen Einfluss auf m/z 99 hat bzw. haben, sollten die erhaltenen Ergebnisse als ungültig angesehen werden, es sei denn es wird eine entsprechende Korrektur vorgenommen. Da Mo und Ru verschiedene natürliche Isotope besitzen, ist es möglich, anhand des Häufigkeitsverhältnisses dieser natürlichen Isotope ihren Einfluss auf m/z 99 zu korrigieren. Eine derartige Korrektur wirkt sich auf die Präzision der Messung und die Nachweisgrenze des Verfahrens aus. Sie sollte daher nur angewendet werden, sofern dies erforderlich ist.

7.6 Überprüfung des Verfahrens

Eine Blindwertlösung sollte nach einem konstanten Intervall innerhalb einer Probenserie gemessen werden. Der erhaltene Blindwert muss von den erhaltenen Probenwerten subtrahiert werden. Wenn der Blindwert den erwarteten Nulleffekt-Wert (innerhalb der Messgrenzen) überschreitet, sind die Empfehlungen des Geräteherstellers zu befolgen und die Spülsequenz muss verbessert werden. Darüber hinaus sind alle Messergebnisse, die vor dem fehlerhaften Blindwert erhalten wurden, und der letzte gültige Blindwert als ungültig anzusehen; folglich sollte im Idealfall eine Blindwertlösung nach jeder Probenmessung gemessen werden.

Eine Qualitätskontroll-Lösung sollte nach einem konstanten Intervall innerhalb einer Probenserie gemessen werden. Es ist zu überprüfen, dass der Konzentrationswert nicht von dem erwarteten Wert (innerhalb der Messgrenzen) abweicht. Falls die Abweichung die festgelegten Messgrenzen (bei optimaler Empfindlichkeit, optimaler Stabilität) überschreitet, sind die Empfehlungen des Geräteherstellers zu befolgen und es ist eine erneute Optimierung der Parameter durchzuführen. Darüber hinaus sind alle Messergebnisse, die vor der fehlerhaften Kontrolle erhalten wurden, und die letzte gültige Kontrolle als ungültig anzusehen; folglich sollte im Idealfall ein Kontrollansatz vor jeder Probenmessung gemessen werden.

Es sollte eine regelmäßige Überprüfung der Genauigkeit des Verfahrens durchgeführt werden. Dies kann durch Folgendes erreicht werden:

- Teilnahme an Ringvergleichen;
- Analyse von Referenzmaterialien;
- Analyse von aufgestockten Materialien.

Die Wiederholpräzision des Verfahrens sollte ebenfalls überprüft werden (z.B. durch wiederholte Messungen).

7.7 Nachweis der Eignung der analysierenden Person

Wenn ein/-e Analytiker/-in dieses Verfahren zuvor noch nie durchgeführt hat, sollte eine Untersuchung der Genauigkeit und systematischen Abweichung (des Bias) durch Messung eines Referenz- oder aufgestockten Materials als Doppelbestimmung durchgeführt werden. Vom Labor sollten Annahmekriterien festgelegt werden.

Eine ähnliche Untersuchung sollte von den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die routinemäßig dieses Verfahren anwenden, durchgeführt werden, und zwar nach vom Labor festgelegten regelmäßigen Zeitintervallen. Die Annahmekriterien sollten festgelegt werden.

8 Angabe der Ergebnisse

8.1 Verwendung von Re, ^{97}Tc oder ^{98}Tc als Ausbeutetracer

8.1.1 Berechnung der zugesetzten Tracermasse und des Analyten

Die Probenaktivität wird mithilfe eines Tracers bestimmt, der dazu dient, Verluste während der Probenvorbereitung zu korrigieren. Der Tracer dient auch der Korrektur instrumenteller Abweichungen während der Messung. Die Konzentration der Tracerlösung (ρ_T) muss bekannt und idealerweise mit großer Präzision bestimmt worden sein. Üblicherweise werden zertifizierte Lösungen eingesetzt. Eine festgelegte Menge des Tracers wird zu jeder Probe hinzugegeben und die Masse der zugegebenen Lösung (m_{Ts}) wird protokolliert. Die Tracermasse, die zu jeder Probe hinzugegeben wird (m_T), kann nach Gleichung (1) berechnet werden:

$$m_T = \rho_T m_{Ts} \quad (1)$$

Die Messunsicherheit bezüglich m_T kann nach Gleichung (2) berechnet werden:

$$\mu(m_T) = m_T \sqrt{\mu_{\text{rel}}^2(\rho_T) + \mu_{\text{rel}}^2(m_{Ts})} \quad (2)$$

Um den Bias der Messung zu berechnen und den Kontrollansatz oder aufgestockte Proben, die den Tracer enthalten, vorzubereiten, muss eine bekannte Menge ^{99}Tc zur Probe hinzugegeben werden. Zu diesem Zweck ist eine Lösung mit bekannter Konzentration an ^{99}Tc (ρ_A), die idealerweise mit großer Präzision bestimmt wurde, erforderlich. Die Masse der zugegebenen ^{99}Tc -Lösung wird protokolliert. Die Masse des zugegebenen ^{99}Tc (m_A) kann nach Gleichung (3) berechnet werden:

$$m_A = \rho_A m_{As} \quad (3)$$

Die Messunsicherheit bezüglich m_A kann nach Gleichung (4) berechnet werden:

$$\mu(m_A) = m_A \sqrt{\mu_{\text{rel}}^2(\rho_A) + \mu_{\text{rel}}^2(m_{As})} \quad (4)$$