
Sachstandsbericht

**Bestimmung der charakteristischen
Grenzen (Erkennungsgrenze, Nach-
weisgrenze und Grenzen des Vertrau-
ensbereichs) bei Kernstrahlungsmes-
sungen nach DIN ISO 11929 (2011-01)**

**Anwendungsbeispiele für die
KTA-Regeln der Reihe 1500**

KTA-GS-82 (Rev. 1)

November 2016

GESCHÄFTSSTELLE DES KERNTÉCHNISCHEN AUSSCHUSSES (KTA)
beim BUNDESAMT FÜR KERNTÉCHNISCHE ENTSORGUNGSSICHERHEIT
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Telefon: 03018/333-1626
Telefax: 03018/333-1625
Email: renate.volkmann@bfe.bund.de

Vorwort

Der KTA-Unterausschuss Strahlenschutztechnik (UA-ST) hat auf seiner 82. Sitzung am 19./20. Februar 2013 über die Notwendigkeit eines Sachstandsberichtes zur „Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Kernstrahlungsmessungen nach DIN ISO 11929 - Anwendungsbeispiele für die KTA-Regeln der Reihe 1500“ beraten, die Notwendigkeit festgestellt und zur Erstellung dieses Sachstandsberichtes einen Arbeitskreis einberufen. Der KTA-Unterausschuss Programm und Grundsatzfragen (UA-PG) hat in der 40. Sitzung am 12. März 2013 die Erstellung des Sachstandsberichtes befürwortet und auf seiner 43. Sitzung abschließend zustimmend zur Kenntnis genommen. Der KTA hat auf seiner 69. Sitzung am 11. November 2014 den Sachstandsberichtes zustimmend zur Kenntnis genommen und der Veröffentlichung zugestimmt.

Im Anschluss an die Veröffentlichung der Fassung November 2014 gab es inhaltliche und redaktionelle Anmerkungen zu einzelnen Berechnungen, die in dieser Revision (Fassung 2016-11) beraten und eingearbeitet wurden. Der UA-ST nahm auf seiner 90. Sitzung am 13./14. September 2016 die aktuelle Revision mit den vorgenommenen Änderungen zustimmend zur Kenntnis. Der KTA hat auf seiner 71. Sitzung am 22. November 2016 die Revision des Sachstandsberichtes ebenfalls zustimmend zur Kenntnis genommen und der Veröffentlichung zugestimmt.

Der aktuelle Bericht steht auf der Internetseite der KTA-GS (<http://www.kta-gs.de>) zum Download zur Verfügung sowie zusätzlich zwei der Beispielrechnungen (C-14 und Edelgase in der Fortluft) in Form von Excel-Dateien auf der KTA-Website im Bereich „Formulare“.

Der vorliegende Sachstandsbericht KTA-GS-82 „Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Kernstrahlungsmessungen nach DIN ISO 11929 - Anwendungsbeispiele für die KTA-Regeln der Reihe 1500“ und die erste Revision wurden von folgenden Fachleuten erarbeitet und gibt deren Kenntnisse und fachliche Meinung wieder:

Geier	AREVA Erlangen
Hummel	TÜV SÜD Industrie Service München
von Loeben	Mirion München
Mameghani	TÜV SÜD Industrie Service München
Mende	TÜV NORD EnSys Hannover
Schlösser	Kernkraftwerk Brokdorf
Schmelz	Kernkraftwerk Grohnde

Zuständige Mitarbeiterin der KTA-Geschäftsstelle:

Volkmann	KTA-GS, Salzgitter
----------	--------------------

Der Sachstandsbericht beschreibt für ausgewählte Messeinrichtungen der Strahlungs- und Aktivitätsüberwachung in Kernkraftwerken jeweils ein mathematisches Modell der Auswertung auf Grundlage der DIN ISO 11929 sowie Art und Größe der relevanten Typ-B-Unsicherheiten, die in eine Auswertung eingehen. Es werden Beispiele für die Regeln KTA 1502, KTA 1503.1, KTA 1503.2 und KTA 1504 berechnet. Grundlagen und Hintergründe werden in den Abschnitten 1 und 2 weiter beschrieben.

Salzgitter, 24. November 2016

KTA-Sachstandsbericht

Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Kernstrahlungsmessungen nach DIN ISO 11929 (2011-01)

Anwendungsbeispiele für die KTA-Regeln der Reihe 1500

Inhalt

1	Einleitung	3
1.1	Hintergründe	3
1.2	Vorgehen	3
1.3	Zielsetzung	4
2	Grundlagen	5
2.1	Begriffe, Größen und Formelzeichen	5
2.2	Allgemeines	5
2.3	Modell der Auswertung nach DIN ISO 11929	6
2.4	Charakteristische Grenzen, bester Schätzwert	7
2.5	Relevante Aspekte zur Anwendung des Modells der Auswertung	11
2.6	Unsicherheiten bei der Bilanzierung von Ableitungen	18
3	Anwendungsbeispiele	19
3.1	Allgemeines	19
3.2	Festinstallierter Edelgas-Monitor	20
3.3	Festinstallierter Aerosol-Monitor	26
3.4	Iodmonitor	32
3.5	Gamma-Spektrometrie-Detektor	38
3.6	Kohlenstoff-14 und Tritium in der Fortluft kerntechnischer Anlagen	42
3.7	Tritium im Abwasser kerntechnischer Anlagen	48
Anhang A	Darstellung der Standardunsicherheit der Messgröße $\tilde{u}(\tilde{y})$ als quadratische Gleichung	53
Anhang B	Korrelierte Eingangsgrößen	54
Anhang C	Literatur	56
Anhang D	Bestimmungen	57

1 Einleitung

(1) Grundlegende Aufgabe der KTA-Regeln ist es, sicherheitstechnische Anforderungen anzugeben, bei deren Einhaltung die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist (§ 7 Abs. 2 Nr. 3 Atomgesetz - AtG), um die im AtG und in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) festgelegten sowie in den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ (SiAnf) und den „Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ weiter konkretisierten Schutzziele zu erreichen.

(2) Anforderungen an die Verfahren und die Messeinrichtungen zur Überwachung und Bilanzierung der Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Fortluft und Abwasser sind in der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung (REI) und in den KTA-Regeln der Reihe 1500 „Strahlenschutz und Überwachung“ festgelegt.

(3) Nach den Grundsätzen der REI erfolgt die Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen zur Erfüllung der sich aus den §§ 46, 47 und 48 in Verbindung mit § 51 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) ergebenden Forderungen. Nach § 48 Abs. 1 StrlSchV ist u. a. dafür zu sorgen, dass die Ableitung radioaktiver Stoffe überwacht und nach Art und Aktivität spezifiziert wird (Emissionsüberwachung). Zu diesem Zweck werden die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Luft und Wasser erfasst. Aus den Ergebnissen der Emissionsüberwachung (sowie Messungen in der Umgebung der Anlage) kann die Strahlenexposition in der Umgebung des Emittenten ermittelt werden (Immissionsüberwachung) (REI).

(4) Für die Regeln KTA 1502, KTA 1503.1, KTA 1503.2, KTA 1503.3 und KTA 1504 werden als wesentlicher Bestandteil der Qualitätssicherung charakteristische Grenzen wie Erkennungs-, Nachweis- und Vertrauensgrenzen benötigt, ohne die Aussagen über die Eignung von Messverfahren oder die Bewertung vorliegender Messergebnisse nicht möglich wären.

(5) Die Ermittlung dieser Grenzen vermittelt die Kenntnis, ob

- unter den gemessenen Kernstrahlungsereignissen ein Beitrag der Probe ist (Erkennungsgrenze),
- wie groß der kleinste Probenbeitrag ist, der zuverlässig nachgewiesen werden kann (Nachweisgrenze) und,
- falls ein Probenbeitrag erkannt wurde, wie groß der Wertebereich der Messgröße ist, der mit großer Sicherheit den wahren Wert der Messgröße enthält (Grenzen des Vertrauensbereichs) [1].

1.1 Hintergründe

(1) Ende der 1970er Jahre verwendeten die ersten KTA-Regeln der Reihe 1500 Formeln auf der Basis konventioneller (frequentistischer) Statistik zur Berechnung der Erkennungs- und Nachweisgrenzen. Ab 1982 erarbeitete eine Arbeitsgruppe im ehemaligen DIN Ausschuss NKe die Normenreihe DIN 25482 zunächst mit den Teilen 1 bis 7, in denen die charakteristischen Grenzen mittels konventioneller Statistik über die Quantile der Messwertverteilungen aus mehrfach wiederholten Messungen abgeleitet wurden. Basis hierfür waren Arbeiten von Altschuler and Pasternak [2], Nicholson [3] und Currie [4], die es nicht vorsahen, sogenannte Typ-B-Unsicherheiten zu berücksichtigen.

(2) Die Teile 1 bis 5 und 7 der Normenreihe DIN 25482 berücksichtigten ausschließlich den zufälligen Charakter der Kernstrahlungsereignisse und der Impulszählung und ließen alle anderen Einflüsse (z. B. aus der Messgeometrie, der Probenbehandlung, der Probenaufbereitung zur Messung, der möglicherweise variierenden Selbstabsorption, der Wägung, der Anreicherung oder der Instabilitäten der Messanordnung) außer Betracht.

(3) Aufgrund neuer Entwicklungen des Messwesens in Bezug auf die Bestimmung von Messunsicherheiten, z. B. dem Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement „GUM“ [5] wurden nationale (DIN 25482 Teile 1-7) und internationale Normen (ISO 11929 Teile 1-3) revidiert und Inkonsistenzen schließlich durch die Aufstellung der DIN ISO 11929 (2011-01) und gleichzeitiger Zurückziehung der DIN Reihe 25482 behoben. DIN ISO 11929 basiert auf der Bayes-Statistik, die die Berücksichtigung vollständiger Messunsicherheiten nach [5] erlaubt und dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht.

1.2 Vorgehen

(1) Mit Veröffentlichung der Norm DIN ISO 11929 im Januar 2011 und zeitgleichem Zurückziehen der Normenreihe DIN 25482 beschloss der UA-ST, die KTA-Regeln der Reihe 1500 entsprechend an den aktuellen Stand der Technik anzupassen. Seit November 2012 wird seitdem in KTA 1507 sowie seit November 2013 auch in KTA 1503.1 und KTA 1503.2 bei den Begriffen der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze, Grenzen des Vertrauensbereichs) auf die Berechnung nach DIN ISO 11929 verwiesen. Die bisherigen Gleichungen in Anlehnung an DIN 25482 mussten in den jeweiligen Regeln gestrichen werden. Auf die Angabe expliziter Berechnungsformeln wurde bewusst verzichtet, da sich der Inhalt der DIN ISO 11929 nicht soweit reduzieren lässt, wie es für die Regeln der Strahlungs- und Aktivitätsüberwachung noch sinnvoll erschien.

(2) Im Rahmen der Fraktionsumläufe zu o.g. Regeln kam jedoch anschließend vermehrt der Wunsch nach praxisorientierten Formeln auf. Der Vorschlag, entsprechende Formeln in einem allgemeinen Anhang an die Regeln der Reihe 1500 anzufügen wurde jedoch abgelehnt, da es nach Meinung des UA-ST den Rahmen dieser Regeln sprengen würde, denn die Vielfalt an Messeinrichtungen, die zur Erfüllung der Anforderungen verwendet werden können, sei zu groß. Der UA-ST sah dennoch den Bedarf der Anwender nach einer praktikablen Unterlage und beauftragte nach Zustimmung des UA-PG den Arbeitskreis DIN ISO 11929 mit der Erstellung dieses Sachstandsberichtes.

1.3 Zielsetzung

(1) Im Vergleich mit der bisherigen Vorgehensweise der Bestimmung von charakteristischen Größen nach den explizit in den bisherigen KTA Regeln angegebenen Formeln kann das Vorgehen nach DIN ISO 11929 deutlich komplexer werden, sobald viele Unsicherheitsbeiträge bei der Aktivitätsbestimmung berücksichtigt werden sollen. Dies ist bedingt durch Festlegungen und Annahmen, die im Ermessen des jeweiligen Anwenders liegen und die als sog. Typ-B-Messunsicherheiten in das mathematische Modell der Auswertung zu implementieren sind.

(2) Um auch in Zukunft bei gleichen Sachverhalten zu gleichen Ergebnissen zu gelangen, ist eine einheitliche Vorgehensweise erstrebenswert. Ziel dieses Berichtes ist es daher, eine Methodik aufzuzeigen und zwar dergestalt, dass zum einen grundsätzliche Lösungsansätze aufgezeigt werden und zum anderen an den Stellen, wo Freiheitsgrade in der jeweiligen Vorgehensweise vorhanden sind, Empfehlungen für das konkrete Vorgehen zu geben. Hierunter fallen unter anderem die Betrachtungen zu relevanten bzw. nicht relevanten Typ-B-Unsicherheiten.

(3) Der Bericht enthält wesentliche Informationen und Angaben für den Anwender. Ferner wird in Anwendungsbeispielen für die Messaufgaben der Abluft- und Abwasserüberwachung die in diesem Bericht vorgestellte Vorgehensweise umgesetzt. Die Werte aller Eingangsgrößen sind exemplarisch und sind für jede Anlage zu prüfen. Für die ausgewählten Beispiele werden alle möglichen realitätsnahen Typ-B-Unsicherheiten betrachtet, nicht relevante/betrachtete Parameter werden erläutert.

(4) Dieser Bericht soll die Anwendung der DIN ISO 11929 in der Praxis erleichtern und so zu einer harmonisierten Vorgehensweise der unterschiedlichen Anwender beitragen. Die im Folgenden gewählten Beispiele sind Messaufgaben der Luft- und Wasserüberwachung nach KTA zugeordnet.

2 Grundlagen

2.1 Begriffe, Größen und Formelzeichen

Die verwendeten Begriffe, Größen und Formelzeichen entsprechen DIN ISO 11929 und werden daher nicht separat aufgeführt. Die Formelschreibweise entspricht DIN 1338.

2.2 Allgemeines

(1) Die mathematischen Ausdrücke zur Berechnung von Ergebnisgrößen auf Basis der DIN ISO 11929 werden von Anwendern häufig als komplex beurteilt. Der Vorteil der weitgehend mathematisch identischen Behandlung fast aller Messaufgaben tritt bei dieser Argumentation meistens in den Hintergrund.

(2) Die Zielsetzung dieses Grundlagenabschnittes ist es, unter gewissen Einschränkungen, die von unerheblicher praktischer Bedeutung für die in den späteren Abschnitten behandelten, konkreten Messaufgaben sind, in einer gestrafften Darstellung mit „handlicheren“ Formeln eine möglichst universelle mathematische Darstellung der Thematik zu erreichen.

(3) In diesem Abschnitt erfolgt keine formale Unterscheidung zwischen einer Messgröße (z. B.: X_i) einerseits und deren Schätzwert x_i andererseits, die folgende Darstellung geht praxisorientiert direkt von vorliegenden Schätzwerten aus. Weiterhin wird die Bayes-Statistik nicht behandelt, da das Verständnis der zugrundeliegenden erkenntnistheoretischen Zusammenhänge weder vorausgesetzt, noch deren Anwendung zwingend in der Art und Weise wie durch die DIN ISO 11929 vorgegeben durchgeführt werden müssen. Hinsichtlich der späteren Berechnung der besten Schätzwerte werden die Formeln ohne ihren Hintergrund in der Bayes-Statistik rekapituliert. Hierfür werden in Anlehnung an die DIN ISO 11929 sechs Voraussetzungen (oder Einschränkungen) festgelegt:

- a) Die Unsicherheit $u(y)$ einer Funktion $y = F(x_1, \dots, x_n)$, die den Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen x_i und der Ausgangsgröße y beschreibt¹, folgt aus einer Taylorreihenentwicklung 1. Ordnung um x_i .

Aus dieser theoretischen Randbedingung resultieren keine expliziten Konsequenzen, diese ist jedoch Grundlage der folgenden vereinfachten Fundamentalgleichung (2-1) zur Berechnung von Messunsicherheiten, der sog. „Gauß’schen Fehlerfortpflanzung“ in ihrer einfachsten Form.

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2-1)$$

Hinweis:

Für eine kurze Zusammenfassung des hier beschriebenen Sachverhaltes vgl. z. B. GUM, Anhang E.3. Die DIN ISO 11929 und der GUM sind bis hierher identisch, lediglich die spätere Einführung der charakteristischen Grenzen (Erkennungs- und Nachweisgrenzen) ist spezifisch für die DIN ISO 11929.

- b) Alle Eingangsgrößen x_i mit $i = 1, \dots, n$ sind normal verteilte Zufallsvariablen.

ba) Es wird somit vorausgesetzt, dass die Eingangsgröße einen Wert besitzt, der hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit seines Auftretens eine Normalverteilung als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion besitzt, die ihrerseits durch deren Erwartungswert x_i und der Varianz $u^2(x_i)$ – also den ersten beiden zentralen Momenten – vollständig beschrieben werden kann.

bb) Obwohl dies ein wesentliches Fundament der DIN ISO 11929 ist, darf diese Vereinfachung (z. B. bei kleinen Impulszahlen und großen Messunsicherheiten) keinesfalls unterschätzt werden. In Abschnitt 2.5 werden einige Implikationen dieses Aspektes kurz skizziert.

¹ z. B.: Wischtest: Als Funktion F ist in diesem Zusammenhang die Verknüpfung der Eingangsgrößen (Schätzwerte der Bruttozählrate r_b , der Nulleffektzählrate r_0 und des erweiterten Kalibrierfaktors w) mit der Ergebnisgröße (Aktivität A) $A = F(r_b, r_0, w) = (r_b - r_0) \cdot w$ zu verstehen. In der Definition der Formelzeichen entsprechend der DIN ISO 11929 wird allgemein A als y , r_b als x_1 und r_0 als x_2 bezeichnet.

- c) Alle Eingangsgrößen x_i mit $i = 1, \dots, n$ sind voneinander unabhängig (vernachlässigbare Kovarianzen).

Unter den Voraussetzungen a) bis c) gilt für die Varianz $u^2(y)$ der Ausgangsgröße y , die durch die Eingangsgrößen x_i über die Funktion F vollständig beschrieben wird, die o. g. Gleichung (2-1). Die wichtigsten Rechenregeln für Gleichung (2-1) können in jeder Literaturstelle, die die Ableitung von Gleichungen (Differentialrechnung) behandelt, nachgeschlagen werden.

Hinweis:

Sobald mindestens zwei Eingangsgrößen x_j und x_k signifikant voneinander abhängen, d. h. korrelieren, ist die allgemeine Form der Gleichung (2-1) anzuwenden (vgl. z. B. DIN ISO 11929, Anhang C.5.2). Die in (2-1) verwendeten Größen werden dann aufgrund ihrer Matrixeigenschaft mit den Methoden der linearen Algebra behandelt. Es wird daher empfohlen, die Eingangsgrößen und/oder die Messbedingungen so zu wählen, dass (2-1) angewendet werden kann (vgl. z. B. Abschnitt 3.4).

- d) Die Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Fehler 1. Art und 2. Art sind gleich.

Bei dieser Voraussetzung standen neben der Einfachheit der nachfolgenden Formeln für die Erkennungs- und die Nachweisgrenze die Änderungen in den Vorgaben der KTA 1503.1 im Vordergrund, denen zufolge dies nun auch für bilanzierende Messungen zulässig ist. Damit ist $\alpha = \beta = 0,05$ und $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = k \approx 1,645$.

- e) Es werden ausschließlich Messungen mit Zeitvorwahl betrachtet.

ea) Diese Voraussetzung ist für mehrere der im Folgenden angegebenen Formeln unabdingbar. Da bei den nachfolgend dargestellten Messaufgaben quasi keine Messungen mit Impulsvorwahl erfolgen, wurde die mathematische Behandlung derselben einer straffen Darstellung geopfert. Für die Darstellung von Messungen unter Impulsvorwahl vgl. DIN ISO 11929 sowie das zugehörige Beiblatt 1 [16].

eb) Für die in den Anwendungsbeispielen (Abschnitt 3) betrachteten, quasi kontinuierlich messenden Monitore gilt dies nur eingeschränkt, da vorgegebene Impulssummen (die häufig vom Messeffekt abhängig sind) akkumuliert werden, mithin eine Impulsvorwahl vorliegt. Die vorgegebenen Impulssummen sind jedoch in der Praxis so groß gewählt, dass dies vernachlässigbar ist.

- f) Es werden ausschließlich skalare Ausgangsgrößen betrachtet.

Diese Voraussetzung ist der Vollständigkeit halber angegeben. Es sind neben der Auswertung von Spektren (Kanäle) auch andere Fälle denkbar, in denen auch die Ausgangsgröße y eine vektorielle Größe darstellt. Im Folgenden werden nur aktivitätsbezogene, also skalare Größen betrachtet.

2.3 Modell der Auswertung nach DIN ISO 11929

- (1) Unter Bezugnahme auf die DIN ISO 11929 wird dem Modell der Auswertung die folgende allgemeine Form gegeben:

$$y = F(x_1, \dots, x_n) = (x_1 - x_2 x_3 - x_4) \prod_{i=5}^n x_i \quad (2-2)$$

(2) Dieses Modell der Auswertung ist abdeckend für die meisten Messaufgaben der Strahlungs- und Aktivitätsüberwachung und kann für alle in diesem Sachstandsbericht behandelten Beispiele als Grundlage verwendet werden. Die Eingangsgröße x_1 steht z. B. für die Bruttozählrate $r_g = n_g/t_g$ und x_2 für die Nulleffektzählrate $r_0 = n_0/t_0$. Der Faktor x_3 kann Fluktuationen des Nulleffektes (z. B. Interferenzkorrektur) behandeln und x_4 den Nulleffekt allgemein korrigieren (z. B. Kontamination einer Messsonde oder deren Umgebung nach einem Störfall)². Die Größen x_1 und x_2 sind somit eigentlich als poissonverteilte Zufallsgrößen aufzufassen, wobei der Messeffekt (x_1) von $x_2 x_3$ und x_4 additiv und von $x_{i>4}$ multiplikativ beeinflusst wird.

Hinweise:

(1) Die Faktoren x_3 und x_4 erweitern die späteren Formeln für die charakteristischen Grenzen über den Koeffizienten c_0 (vgl. Abschnitte 2.4.1 und 2.5.1) und werden in einigen Fällen nicht benötigt. In diesen Fällen ist $x_3 = 1$ und $u(x_3) = x_4 = u(x_4) = 0$ zu setzen.

(2) Komplizierte Störungen (z. B. Schirmzählrohr) oder Effekte, die die Poissonstatistik tangieren (z. B. Totzeiteffekte), bleiben weiterhin unberücksichtigt.

² In [6] werden Beispiele angegeben, die zeigen wie bei der Auswertung von Messungen der Raum- oder Fortluft bzw. bei der Gammaspektrometrie die Eingangsgrößen x_1 bis x_4 belegt werden können. In der DIN 25457-1:2013 [7] wird in den Anhängen J (Gammaspektrometrie) und K (Freimessanlage) diese Aufgabenstellung ebenfalls behandelt.

(3) Die Faktoren x_i ($i = 5, \dots, n$) entsprechen allen erforderlichen multiplikativen Eingangsgrößen, die mathematisch identisch behandelt werden können, d. h. diese werden unter einer Variablen w geschlossen verarbeitet, wobei

$$w = \prod_{i=5}^n x_i \Rightarrow u_{\text{rel}}^2(w) = \sum_{i=5}^n \frac{u^2(x_i)}{x_i^2} \quad (2-3a)$$

Hinweis:

Die rechte Gleichung (2-3a) ist das altbekannte „Gauß’sche Fehlerfortpflanzungsgesetz“ bei Multiplikation, bei Addition wäre es in dieser Notation:

$$w = \sum x_i \Rightarrow u^2(w) = \sum u^2(x_i) \quad (2-3b)$$

(4) Nun können die Modelle der Auswertung für zählende Messverfahren und für die Gammaskpektrometrie aufgestellt werden, die in ihrer einfachsten Form lauten:

$$\text{Zählend:} \quad y = w(r_g - r_0) \quad (2-4)$$

$$\text{Spektrometrisch:} \quad y = \frac{w}{t}(n_g - n_b) \quad (2-5)$$

wobei: r_g die Bruttozählrate (**gross rate**) bei der Messdauer t_g und r_0 die Nulleffektzählrate bei der Messdauer t_0 ist, sowie n_g die Gesamtfläche einer identifizierten Energielinie und n_b deren Untergrund (**background**) ist.

Hinweis:

Ein derart simples Modell zur Auswertung gammaskpektrometrischer Messungen ist nach dem normativen Anhang C der DIN ISO 11929 an sich nicht zulässig. Da die dort propagierte Berechnungsvorschrift allenfalls als wenig benutzerfreundlich bezeichnet werden kann, die etablierten Rechnerprogramme zur Auswertung gammaskpektrometrischer Messungen und u. a. die ISO 10703 [8] sowie die DIN ISO 18589-3 [9] ein Modell wie in (2-5) ebenfalls anwenden, wird dieses hier übernommen.

(5) Für messtechnische Einflüsse, die im weiteren Sinne wie ein Nulleffekt zu betrachten sind und unter den Eingangsgrößen x_3 und x_4 verarbeitet werden, tritt an späterer Stelle die Größe λ auf, deren Unsicherheit auf die charakteristischen Größen andere Auswirkungen zeigt als der erweiterte Kalibrierfaktor w .

(6) y schätzt die Messgröße, eine absolute, flächen- oder massenbezogene Aktivität, der als weiterer Schätzwert die Messunsicherheit $u(y)$ zugeordnet werden muss. Aus den Gleichungen (2-1) bis (2-5) folgen die vollständigen, d. h. auf dem „1 σ -Niveau“ befindlichen Messunsicherheiten:

$$\text{Allgemein:} \quad u(y) = \sqrt{w^2 [u^2(x_1) + x_2^2 u^2(x_3) + x_3^2 u^2(x_2) + u^2(x_4)] + y^2 u_{\text{rel}}^2(w)} \quad (2-6)$$

(7) Für die Fälle ohne die additiven Eingangsgrößen x_3 und x_4 kann (2-6) für zählende und spektrometrische Verfahren entsprechend (2-7) und (2-8) geschrieben werden:

$$\text{Zählend:} \quad u(y) = \sqrt{w^2 \left[\frac{r_g}{t_g} + \frac{r_0}{t_0} \right] + y^2 u_{\text{rel}}^2(w)} \quad (2-7)$$

$$\text{Spektrometrisch:} \quad u(y) = \sqrt{\frac{w^2}{t^2} [n_g + n_b] + y^2 u_{\text{rel}}^2(w)} \quad (2-8)$$

(8) Alle $u(y)$ sind nicht als erweiterte Messunsicherheiten sondern immer auf dem „1 σ -Niveau“ anzugeben und zu verrechnen. Die Verwendung von Vertrauensbereichen bei Eingangsgrößen ist nicht zulässig.

2.4 Charakteristische Grenzen, bester Schätzwert

In der DIN ISO 11929 werden die Erkennungsgrenze, die Nachweisgrenze und die Grenzen des Vertrauensbereiches als *charakteristische* Grenzen bezeichnet. Für die Festlegung der Erkennungs- und der Nachweisgrenze muss die Funktion $\tilde{u}(\tilde{y})$ bekannt sein. Diese ist die Standardunsicherheit der Messgröße - als $\tilde{u}$ bezeichnet - als Funktion des wahren (immer unbekannten) Wertes dieser Messgröße $\tilde{y}$ für ein konkretes Messverfahren.

2.4.1 Erkennungs- und Nachweisgrenze

(1) Basierend auf dieser Funktion $\tilde{u}(\tilde{y})$ lauten die Grundgleichungen der Erkennungs- (EKG) und der Nachweisgrenze (NWG):

$$\text{EKG: } y^* = k \tilde{u}(0) \quad (2-9)$$

$$\text{NWG: } y^\# = k \tilde{u}(0) + k \tilde{u}(y^\#) \quad (2-10)$$

(2) Es kann hergeleitet werden (vgl. **Anhang A**), dass für die Modelle der Auswertung (2-4) und (2-5) die implizite Gleichung (2-10) durch eine quadratische Gleichung (2-11) ersetzt werden kann,

$$\tilde{u}^2(\tilde{y}) = c_0 + c_1 \tilde{y} + c_2 \tilde{y}^2 \quad (2-11)$$

wobei für die Erkennungs- und Nachweisgrenze gilt:

$$\text{EKG: } y^* = k \sqrt{c_0} \quad (2-12)$$

$$\text{NWG: } y^\# = \frac{2y^* + k^2 c_1}{1 - k^2 c_2} \quad (2-13)$$

Die Koeffizienten c_0 , c_1 und c_2 sind dabei (in Zählraten):

$$c_0 = w^2 \left[\frac{r_0 x_3 + x_4}{t_g} + \frac{x_3^2 r_0}{t_0} + r_0^2 u^2(x_3) + u^2(x_4) \right] \quad (2-14)$$

$$c_1 = \frac{w}{t_g} \quad (2-15)$$

$$c_2 = u_{\text{rel}}^2(w) \quad (2-16)$$

(3) Damit können die Erkennungs- und die Nachweisgrenze für alle hier behandelten Messaufgaben berechnet werden. Die Lösung einer impliziten Gleichung – wie in der DIN ISO 11929 – ist somit nicht erforderlich. Hierbei handelt es sich *nicht* um eine Näherung.

Hinweise:

(1) In allen Fällen, in denen nach DIN ISO 11929 vorgegangen werden kann, bleibt der Formalismus immer identisch, es ändert sich lediglich der Koeffizient c_0 .

(2) Es ergeben sich einfache Ausdrücke, die die bisherigen Eigenschaften der Erkennungs- und Nachweisgrenzen aus der zurückgezogenen DIN 25482 Teil 1 und 5 ebenfalls aufweisen (z. B.: $2 \cdot \text{EKG} < \text{NWG}$).

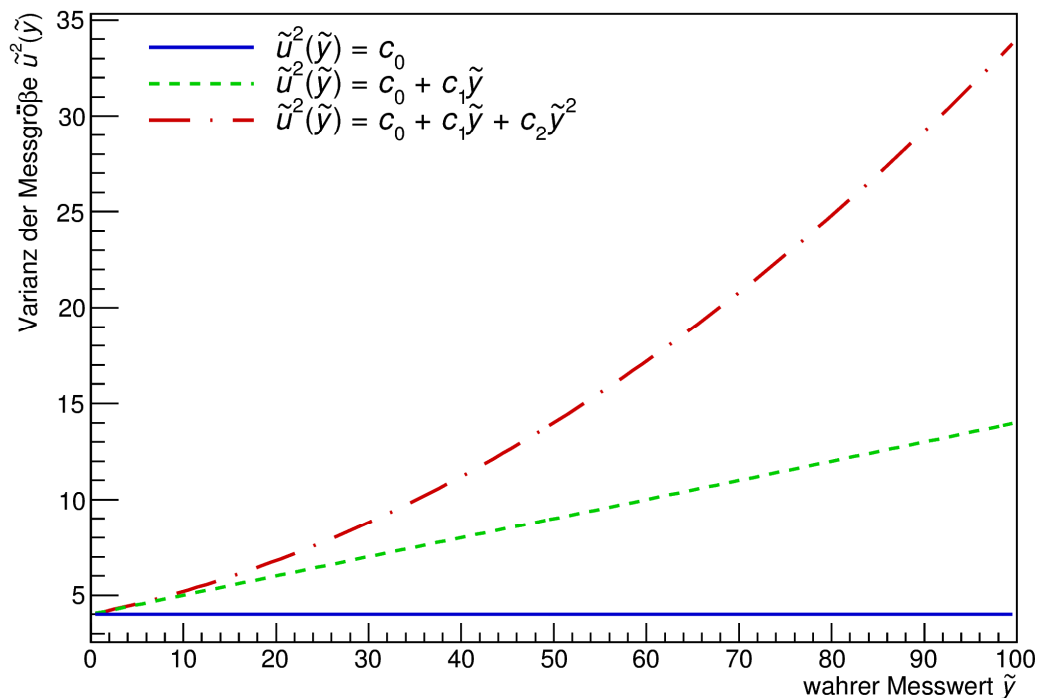


Bild 2-1: Darstellung der Varianz der Messgröße als Funktion des wahren Wertes aufgetragen über den wahren Wert der Messgröße entsprechend den Koeffizienten in den Gleichungen (2-11) bis (2-16). Frühere Regeln zur Bestimmung von Erkennungs- und Nachweisgrenzen führen zu $\tilde{u}^2(\tilde{y}) = \text{const}$, da implizit $c_1 = c_2 = 0$ unterstellt worden ist. Dies war nicht korrekt.

(4) Bei komplexeren Modellen der Auswertung als Gleichung (2-2) unter Verwendung der Unsicherheit nach Gleichung (2-6) und den damit erzielten charakteristischen Grenzen aus Gleichung (2-11) und (2-12) über die Hilfsgrößen nach Gleichung (2-13) ff. ist es ratsam, die zur Lösung der impliziten Gleichung (2-10) eingeführte Größe c_0 möglichst direkt nach der Substitution $x_1(y)$ in Gleichung (2-6) einzuführen³.

(5) Aus (2-13) und (2-16) folgt direkt die wichtige Relation, der zufolge eine Nachweisgrenze nur dann existiert, wenn

$$k u_{\text{rel}}(w) < 1 \quad (2-17)$$

Hinweis:

In dem hier behandelten Modell der Auswertung sind somit die höchsten, theoretisch zulässigen $u_{\text{rel}}(w)$ möglich, z. B. bei Impulsvorwahl oder zu unterstellendem Probenbehandlungseinfluss gehen weitere Terme auf der linken Seite der Relation (2-17) ein (vgl. DIN ISO 11929).

(6) Die Erfordernis der „konservativen Kalibrierung“ erfolgt somit aus dem Formalismus der DIN ISO 11929, sobald hohe Unsicherheiten bei den Typ-B-Messunsicherheiten auftreten. In einem allgemeineren Ansatz kann dies jedoch auch als ein Artefakt der getroffenen Näherungen betrachtet werden, daher wird dieser Aspekt in Abschnitt 2.5.4 konkretisiert.

³ Aus den Gleichungen (2-12) und (2-13) wird damit unter Verwendung der Hilfsgröße ψ

$$y^* = k_{1-\alpha} \tilde{u}(0) = k_{1-\alpha} w \sqrt{\psi} \quad (2-12a)$$

$$y^\# = \frac{2kw\sqrt{\psi} + k^2 \frac{w}{t_g}}{1 - k^2 u_{\text{rel}}^2(w)} \quad (2-13a)$$

Die Erkennungs- und daraus folgend auch die Nachweisgrenzen berechnen sich somit immer nach diesen beiden Formeln (auch c_1 und c_2 bleiben unverändert), lediglich die Hilfsgröße ψ unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Messaufgabe. Insbesondere bei Messgeräten, die keine aufwendige PC-basierte Auswertesoftware betreiben (z. B. Handgeräte) stellt es eine erhebliche Vereinfachung dar, diese Größen mit einheitlichen Formeln ohne numerische Verfahren berechnen zu können.

2.4.2 Bester Schätzwert und dessen Unsicherheit, obere Grenze des Vertrauensbereiches

(1) Die DIN ISO 11929 sieht vor, dass, falls ein Messeffekt erkannt wurde, d. h. $y > y^*$, der sogenannte beste Schätzwert $\hat{y}$ und dessen Unsicherheit $u(\hat{y})$ über Korrekturgleichungen (2-19), (2-20) zu berechnen sind. Für $\varphi = y/u(y) > 4$, d. h. für relative Unsicherheiten der Ergebnisgröße kleiner 25 %, gilt, dass der beste Schätzwert und dessen Unsicherheit quasi identisch sind mit dem primären Messergebnis y und dessen Unsicherheit $u(y)$:

$$y > \varphi u(y) \Rightarrow y = \hat{y} \wedge u(y) = u(\hat{y}) \quad (2-18)$$

Ansonsten ist

$$\hat{y} = y + \frac{u(y) \exp\left[\frac{-y^2}{2u^2(y)}\right]}{\omega\sqrt{2\pi}} \quad (2-19)$$

$$u(\hat{y}) = \sqrt{u^2(y) - \hat{y}(\hat{y} - y)} \quad (2-20)$$

(2) Für ω vgl. Gleichung (2-21). Der Faktor $\varphi = 4$ in Gleichung (2-18) nach DIN ISO 11929 ist konservativ gewählt. Wird dieser Wert auf 2 gesetzt, so wird die – normalerweise völlig uninteressante – untere Grenze des Vertrauensbereiches zwar etwas zu klein abgeschätzt, der Messwert selbst und die obere Grenze des Vertrauensbereiches bleiben aber immer noch näherungsweise richtig. Für $\varphi < 2$ muss aber die Korrektur nach DIN ISO 11929 durchgeführt werden (vgl. **Bild 2-2**).

(3) Es ist somit zusammenfassend festzustellen, dass insbesondere bei einer rechnergestützten Auswertung von Messungen die Berechnung des besten Schätzers und dessen Unsicherheit sowie der korrigierten Vertrauensgrenzen generell erfolgen sollte.

(4) Die obere Grenze des Vertrauensbereiches $y^>$ errechnet sich nach Gleichung (2-21).

$$y^> = y + k_q u(y); \quad q = 1 - \frac{\gamma}{2} \cdot \omega(y/u(y)) \quad (2-21)$$

wobei

$1 - \gamma/2$	die Wahrscheinlichkeit zum Vertrauensbereich der Messgröße,
k_q	die Quantile der standardisierten Normalverteilung zur Wahrscheinlichkeit q und
$\omega(y/u(y))$	die Umkehrfunktion ist ($\omega(t) = q \rightarrow k_q = t$).

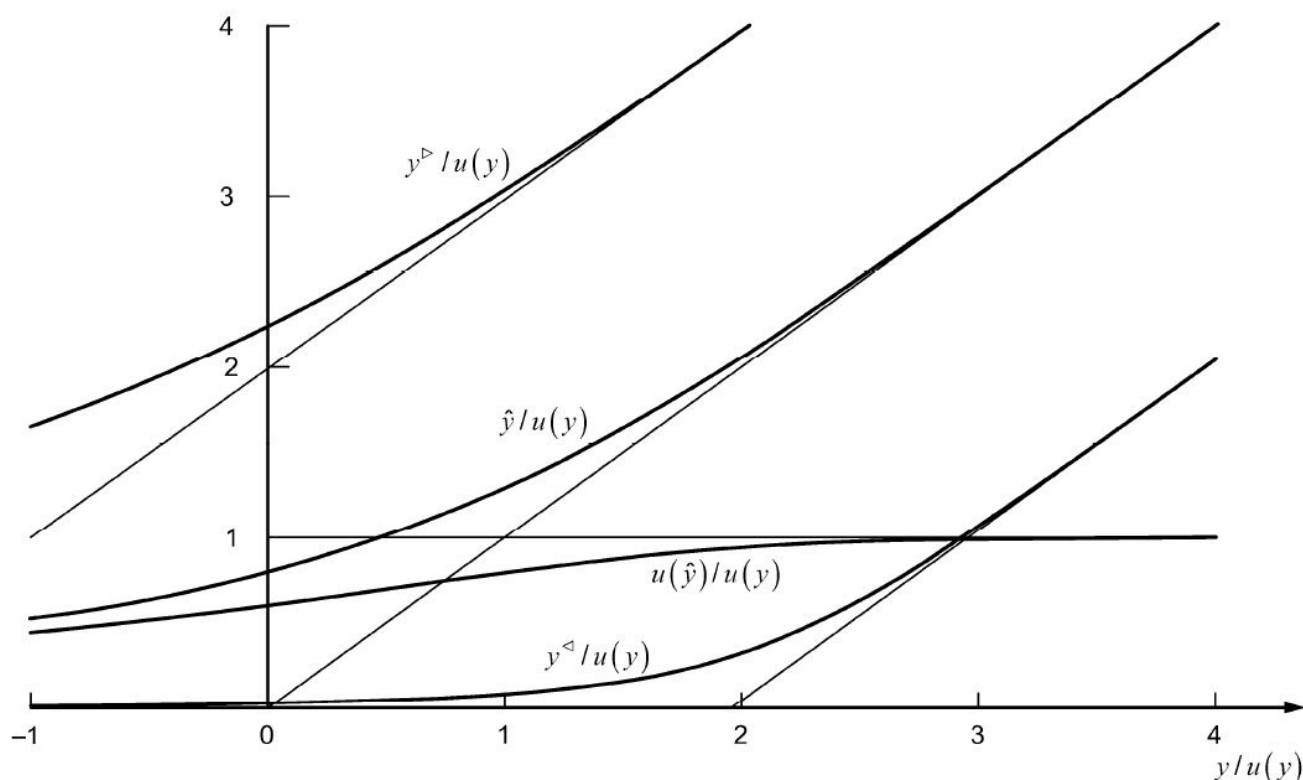
Hinweis:

Die Funktion ω ist in EXCEL® die Funktion STANDNORMVERT(z), die Umkehrfunktion errechnet sich aus STANDNORMINV(z).

(5) Der Vollständigkeit halber wird noch die untere Grenze des Vertrauensbereiches $y^<$ angegeben:

$$y^< = y - k_p u(y); \quad p = \left(1 - \frac{\gamma}{2}\right) \cdot \omega(y/u(y)) \quad (2-22)$$

$$y^{\triangleleft} = y - k_{1-\gamma/2} u(y) \quad \text{und} \quad y^{\triangleleft} = y + k_{1-\gamma/2} u(y)$$



Legende

$y/u(y)$ Quotient aus dem primären Messergebnis der Messgröße und der zugehörigen Standardunsicherheit in Verbindung mit dem besten Schätzwert

Bild 2-2: Bester Schätzwert und Grenzen des Vertrauensbereiches normiert auf das Verhältnis aus primären Messergebnis y und dessen Standardunsicherheit $u(y)$ (nach DIN ISO 11929).

(6) Im **Bild 2-2** werden die vier wesentlichen Ergebnisgrößen als Funktion des primären Messergebnisses aufgetragen. Zur Darstellung in einem Diagramm werden sämtliche Werte durch die absolute Unsicherheit der Ergebnisgröße $u(y)$ dividiert. Die horizontale Achse stellt somit den Kehrwert der relativen Messunsicherheit dar (φ in der Gleichung (2-18)). Die Geraden würden die Ergebnisse entsprechend den früheren einstelligen Teilen der DIN 25482 darstellen. Zur Berechnung der Vertrauensbereichsgrenzen wurde $k \cong 1,96$ gewählt. Im Ergebnis ist deutlich zu erkennen, dass die Korrekturen der DIN ISO 11929 die zu dem besten Schätzwert und dessen Unsicherheit, sowie den Grenzen des Vertrauensbereiches führen erst *unterhalb der Nachweisgrenze* nennenswerte Auswirkungen haben. Erwartungsgemäß sind die Auswirkungen auf die obere Grenze des Vertrauensbereiches besonders gering, da es sich hier um das 97,5-Perzentil der Wahrscheinlichkeitsverteilung des primären Messergebnisses handelt (vgl. **Bild 2-5**)

2.5 Relevante Aspekte zur Anwendung des Modells der Auswertung

(1) In den folgenden Abschnitten werden einige Gesichtspunkte, die von praktischer Bedeutung bei der Anwendung der DIN ISO 11929 sein können, konkretisiert. Während Abschnitt 2.5.1 noch vollständig innerhalb des Geltungs- und Regelungsbereiches der DIN ISO 11929 angesiedelt werden kann, reichen die drei folgenden Abschnitte teilweise über diese Regel hinaus (vgl. **Bild 2-3**).

(2) Die Kategorisierung von Unsicherheiten der im Modell der Auswertung vorkommenden Eingangsgrößen in Unsicherheiten „vom Typ-A“ bzw. „vom Typ-B“ ist prinzipiell nicht notwendig, wird jedoch aufgrund seiner nach wie vor weiten Verbreitung kurz dargestellt. In Abschnitt 3 findet auch wieder eine Aufteilung in Typ-A- und Typ-B-Unsicherheiten statt. Die deutsche Fassung des „GUM“, die DIN ENV 13005:1999 [10] führt in den Begriffsbestimmungen diese Klassifizierung mit einem sehr knappen Text ein, wobei der Ursprung noch wesentlich weiter in der Vergangenheit liegt. Untenstehend wird aus der Empfehlung INC-1 (vgl. GUM Abschnitt 0.7) aus dem Jahr 1980 zur Angabe experimenteller Unsicherheiten zitiert:

„Die Unsicherheit eines Messergebnisses setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen, die sich nach der Art, in der ihr Zahlenwert geschätzt wird, in zwei Kategorien einteilen lassen:

A: Komponenten, die mit statistischen Methoden berechnet werden

B: Komponenten, die auf andere Weise ermittelt werden

Es besteht nicht immer eine einfache Entsprechung zwischen der Zuordnung zu den Kategorien A oder B und der zuvor verwendeten Klassifizierung nach „statistischen“ und „systematischen“ Messunsicherheiten. Die Benennung „systematische Messunsicherheit“ kann zu Missverständnissen führen und sollte vermieden werden.

Jede detaillierte Angabe der Unsicherheit muss aus einer vollständigen Liste der Komponenten bestehen, wobei für jede Komponente die Methode anzugeben ist, mit der man ihren Zahlenwert erhält.“

(3) Die früheren „einstelligen“ Teile der DIN 25482 konnten keine Typ-B-Messunsicherheiten verarbeiten, die Impulszahlen (oder Zählraten), die nun in der DIN ISO 11929 als Schätzwerte x_1 und x_2 in das Modell der Auswertung eingehen, werden als durch Normalverteilungen genäherte poissonverteilte Zufallsvariablen aufgefasst, die daher ausschließlich Unsicherheiten vom Typ-A enthalten; im Falle von Impulsen: $x \pm u(x) \rightarrow n \pm \sqrt{n}$ ⁴. Der „erweiterte Kalibrierfaktor“ w der DIN ISO 11929 wird i. A. als Schätzwert interpretiert, der ausschließlich Unsicherheiten vom Typ-B enthält⁵.

(4) Während die Typ-A-Unsicherheiten im Messprozess innerhalb gewisser Grenzen gesteuert werden können (Messdauern), erfordern Modifikationen an den Typ-B-Messunsicherheiten i. A. tiefer gehende Kenntnisse über die Eingangsparameter bei der Datenauswertung, ggf. ist die gesamte Messstrategie zu ändern. Die Erfahrung in der Strahlungs- und Aktivitätsüberwachung in kerntechnischen Anlagen zeigt, dass häufig weniger die Verarbeitung dieser Typ-B-Messunsicherheiten die Anwender vor Schwierigkeiten stellt, sondern dass vielmehr der Betrag dieser Messunsicherheiten nicht ausreichend bekannt ist und damit die Berechnung der relativen Unsicherheit des „erweiterten Kalibrierfaktors“ $u_{\text{rel}}(w)$ ein Problem darstellt (vgl. Gleichung (2-3a)). Dies hat jedoch weder mit der Umsetzung der DIN ISO 11929 zu tun, noch ist diese Problematik neu.

(5) Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass

- a) alle Typ-B-Messunsicherheiten, die als Eingangsgrößen x_i multiplikativ in das Modell der Auswertung eingehen, die Nachweisgrenzen dadurch erhöht haben, dass in der Vergangenheit diese Eingangsgrößen durch deren „konservative Wahl“ beherrscht worden sind⁶ aber
- b) alle Typ-B-Messunsicherheiten, die als Eingangsgrößen x_i additiv in das Modell der Auswertung eingehen, sowohl die Erkennungsgrenzen als auch die Nachweisgrenzen erhöhen. Die korrekte Beherrschung dieser Einflussgrößen in der Aktivitätsmesstechnik steht heute häufig noch am Anfang⁷.

(6) Große Typ-B-Unsicherheiten können im Rahmen der DIN ISO 11929 nicht verarbeitet werden (vgl. Gleichung (2-17)), da dann keine Nachweisgrenzen mehr existieren (vgl. Abschnitt 2.5.4). Die konservative Festlegung von Eingangsgrößen bleibt zur Berechnung von aktivitätsbezogenen Ergebnisgrößen weiterhin als Alternative erhalten, behält jedoch im Wesentlichen die alten Berechnungsgrundlagen vor der Veröffentlichung der DIN ISO 11929 bei, wobei in diesem Fall systematisch zu hohe Messergebnisse (mit unrichtigen – da zu niedrigen – Messunsicherheiten) mit regulatorisch vorgegebenen Richtwerten verglichen werden.

⁴ Die weit verbreitete (und richtige) Aussage, dass die Wurzel der Impulszahl deren absolute Unsicherheit beschreibt, ist wieder eine Reminiszenz an die Poissonverteilung (Erwartungswert gleich Varianz) und *nicht* an eine normalverteilte Eingangsgröße.

⁵ Streng genommen ist diese Aussage natürlich wenig sinnvoll, wie an folgendem Beispiel deutlich wird: Ein radioaktives Aktivitätsnormal kann (und muss) sowohl Typ-A- als auch Typ-B-Komponenten hinsichtlich seiner Unsicherheit aufweisen. Findet nun die Unsicherheit in der Aktivität des Standards über eine Kalibriermessung Eingang in den „erweiterten Kalibrierfaktor“ w , so kann dieser nicht mehr ausschließlich Unsicherheiten vom Typ-B enthalten.

⁶ Deshalb muss eine Nachweisgrenze nach DIN ISO 11929 auch nicht notwendigerweise größer sein, als früher nach DIN 25482 berechnet. Falls dies doch der Fall wäre, wäre der Faktor w ursprünglich nicht „konservativ genug“ festgelegt worden und die Nachweisgrenze vorher falsch gewesen.

⁷ Eine heute noch gerne praktizierte Vorgehensweise ist die „konservative“ Wahl des Nulleffektes durch einen Schätzwert, der sicher kleiner ist als der tatsächliche Erwartungswert. Dieser Versuch einer Kompensation führt zur Angabe von gemessenen „Schein“aktivitäten, die nicht vorhanden sind, bei gleichzeitig fälschlicher Unterschätzung der tatsächlichen Erkennungs- und Nachweisgrenzen.

(7) Somit sind zwei Aufgabenstellungen festzuhalten:

- Lösung des Widerspruchs, dass bei einer konservativen Auswertung eine Nachweisgrenze existiert, bei einer realitätsnahen Auswertung ggf. nicht. Dies ist innerhalb der DIN ISO 11929 nicht möglich (Abschnitt 2.5.4)
- Klärung der Fragestellung, was eine konservativ gewählte Eingangsgröße eigentlich ist, da unnötig hohe Konservativitäten nur zu einer überhöhten Wahrscheinlichkeit von „Fehlalarmen“ führen, während im Gegensatz dazu zu geringe Konservativitäten dazu führen, dass bei der Erfordernis der Einhaltung von Richtwerten diese Einhaltung nur mit unzureichender statistischer Sicherheit gezeigt sein kann (Abschnitt 2.5.1).

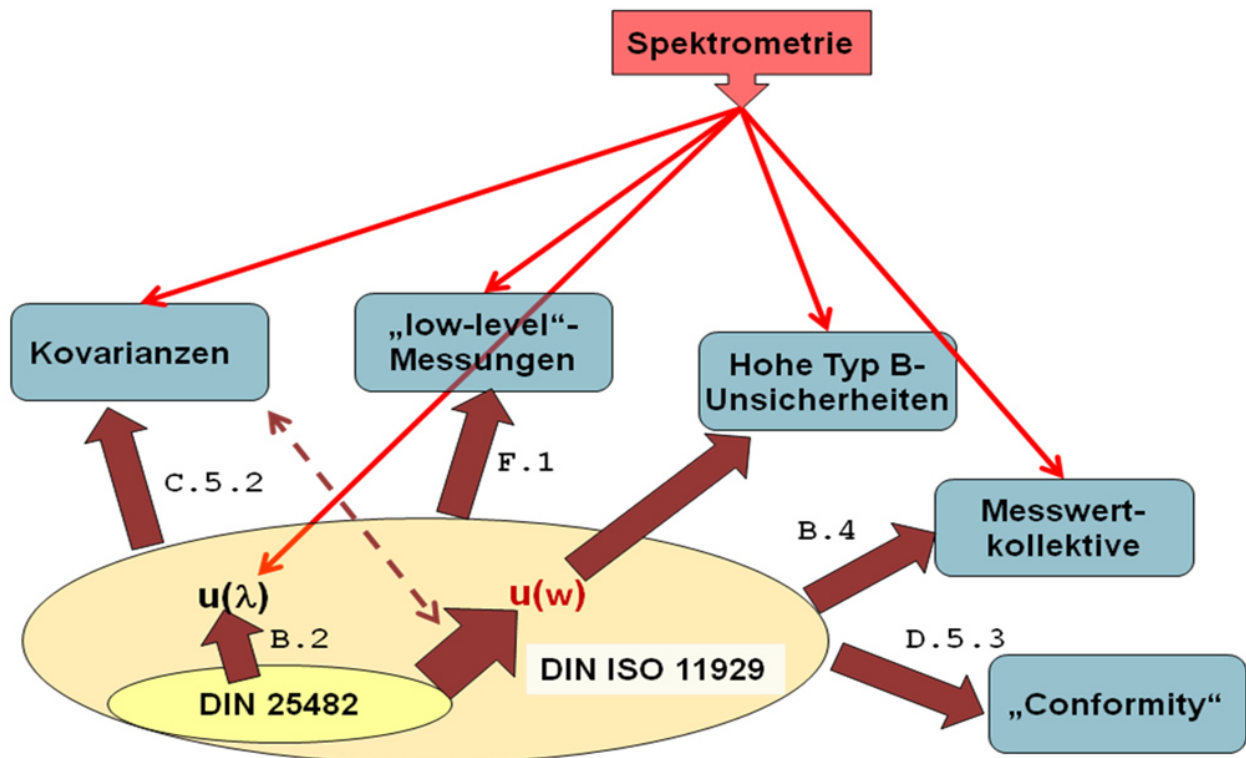


Bild 2-3: Aufgabengebiete bei der Bestimmung von Messergebnissen, deren Unsicherheit und der charakteristischen Grenzen in der Strahlungs- und Aktivitätsüberwachung (Erläuterungen s. Text)

(8) **Bild 2-3** ist ein Schaubild, welches zunächst die wesentlichen Erweiterungen der DIN ISO 11929 gegenüber den „einstelligen“ Teilen der DIN 25482 zusammenfasst. Die Größe $u(w)$ skizziert die Erweiterung in Hinblick auf die Typ-B-Unsicherheiten, $u(\lambda)$ subsummiert die Erweiterung auf die additiven Größen x_3 und x_4 , wobei $u(x_3) > 0 < u(x_4)$. Die Bezeichnung **B. 2** verweist – ebenso wie die ebenfalls in diesem Zeichensatz angegebenen Bezeichnungen – auf die entsprechenden Anhänge der DIN ISO 11929, in denen diese Aspekte zumindest angedeutet werden.

(9) An dem Messzweck „Spektrometrie“ soll exemplarisch angedeutet werden, dass bei verschiedenen Messverfahren Aufgabenstellungen auftreten können, die über die Regelungen der DIN ISO 11929 hinausreichen. Bei der Gammaskpektrometrie treten über verschiedene Wege korrelierte Eingangsgrößen (*Kovarianzen*) auf. Am Einfachsten wird dies bei der Auswertung mehrerer Linien eines Radionuklids deutlich (auch bei der Kalibrierung!). Eine alpha-spektrometrische Auswertung mit wenigen registrierten Impulsen (*„low-level“-Messung*) kann auf der Basis als normal verteilt angenommener Schätzwerte kaum korrekt ermittelt werden. Die DIN ISO 11929 erlaubt für einen relativ schmalen Bereich der Werte für $u_{\text{rel}}(w)$ eine Auswertung von Messungen. Für $u_{\text{rel}}(w) < 0,05$ sind die Auswirkungen auf die dokumentierten Ergebnisse eher vernachlässigbar, ab $u_{\text{rel}}(w) > 0,5$ treten bei $k \approx 1,645$ die bereits genannten Schwierigkeiten auf (*hohe Typ-B-Unsicherheiten*).

(10) Im Folgenden nicht mehr aufgegriffen werden Effekte, die auf $u(\lambda)$ zielen (vgl. **Bild 2-3**). Am Beispiel der Gammaskpektrometrie wären dies z. B. die Interferenzkorrektur (x_3) oder Nettopeakflächen im Nulleffektspektrum (x_4). Ebenfalls nicht mehr aufgegriffen werden Messwertkollektive (z. B.: mehrere Proben werden zu einer bilanzierten Ableitung zusammengefasst) sowie das Themengebiet „conformity“, also im vorliegenden Kontext die Bestätigung der Einhaltung eines vorgegebenen Richtwertes über eine hierfür geeignete Messgröße.

2.5.1 Konservative Berechnung von Ergebnisgrößen

(aus DIN 25457-1, Abschnitt 4.1.4)

(1) Bei der Festlegung des Modells der Auswertung für ein Messverfahren ist häufig im Vorfeld zu entscheiden, ob die Auswertung konservativ oder realitätsnah zu erfolgen hat.

- a) Realitätsnah bedeutet die möglichst realistische Wahl der Parameter bei gleichzeitiger quantitativer Berücksichtigung sowohl der Typ-A- als auch der Typ-B-Messunsicherheiten.
- b) Bei der konservativen Vorgehensweise werden nur die Typ-A-Messunsicherheiten betrachtet. Durch die überschätzende Wahl einzelner Parameter wird die Nicht-Berücksichtigung der Typ-B-Messunsicherheiten kompensiert.

(2) In Tabelle 2-1 werden vor dem Hintergrund der hier eingeführten Messgrößen die Auswirkungen dieser Entscheidung auf die Eingangsgrößen zusammenfassend dargestellt. In diesem Zusammenhang ist es von entscheidender Bedeutung, die folgenden Aspekte zu betrachten:

- a) Es ist prinzipiell zulässig, einzelne Eingangsgrößen realitätsnah, andere konservativ zu wählen.
- b) Die Anwendung der DIN 25482-1 oder DIN 25482-5 setzt die konservative Festlegung aller Eingangsgrößen zwingend voraus. Der Formalismus analog zu DIN ISO 11929 kann unabhängig davon immer angewendet werden.
- c) Die konservative Auswertung erhöht immer die Schätzwerte y und $\hat{y}$ gegenüber dem wahren Wert $\tilde{y}$, reduziert jedoch gleichzeitig deren Unsicherheiten. Bei den charakteristischen Grenzen muss dieser Effekt über die ausreichend konservative Festlegung des erweiterten Kalibrierfaktors w kompensiert werden.
- d) Besondere Beachtung ist in manchen Fällen auf die Nulleffektkompensation zu legen, da ein signifikanter Einfluss eines real vorhandenen $u_{\text{rel}}(\lambda) > 0$ für die Schätzwerte y und $\hat{y}$ nur durch eine konservative Wahl von n_0 kompensiert werden kann. Insbesondere bei Messverfahren, für die die Brutto- und die Nulleffektimpulszahlen annähernd gleich groß sind (d. h. $\frac{n_g}{n_0} \approx 1$), werden bei der konservativen Vorgehensweise die Erkennungs- und Nachweisgrenzen – in nicht-konservativer Weise – systematisch zu niedrig ermittelt.

Eingangsgröße	konservativ	realitätsnah
Bruttoeffekt	$n_g = x_1; \quad u(n_g) = \sqrt{n_g}$	$n_g = x_1; \quad u(n_g) = \sqrt{n_g}$
Nulleffekt	$n_0 < x_2; \quad 0 \leq u(n_0) < \sqrt{n_0}$	$n_0 = x_2; \quad u(n_0) = \sqrt{n_0}$
Kalibrierfaktor	$w > w_{\text{real}}; \quad u_{\text{rel}}(w) = 0$	$w = w_{\text{real}}; \quad u_{\text{rel}}(w) > 0$
Abschirm- bzw. Interferenzfaktor	$\lambda = x_3 = 1; \quad u(x_3) = 0$	$x_3 = \lambda < 1$ $x_3 = \lambda = 1$ $x_3 = \lambda > 1$ $u(\lambda) > 0$
Untergrundkorrekturfaktor	$x_4 = 0; \quad u(x_4) = 0$	$x_4 > 0; \quad u(x_4) > 0$

Tabelle 2-1: Auswirkung der konzeptionellen Vorgehensweise (Realitätsnah oder konservativ) bei der Festlegung des Modells der Auswertung auf die verwendeten Eingangsgrößen nach DIN 25457-1 [7].

2.5.2 Kleine Impulszahlen

(1) Der Schätzwert $n = 0$ aus einer Messung führt zu dem Ergebnis, dass auch $u(n) = 0$ ist. Im informativen Anhang F.1 empfiehlt die DIN ISO 11929 bei zählenden Messverfahren $n \rightarrow n + 1$ zu setzen bzw. bei spektrometrischen Verfahren Kanäle zusammenzufassen. Hierbei handelt es sich um eine recht pragmatische Empfehlung, da die Lösung des Problems gerade in der konsequenten Anwendung der Bayes-Statistik liegen würde.

(2) Da für diesen Bericht die Behandlung von Messungen mit kleinen Impulszahlen nicht von zentraler Bedeutung sein dürfte, werden die zu betrachtenden Aspekte lediglich kurz skizziert und auf Literatur verwiesen, wobei anzumerken ist, dass eine geschlossene Behandlung der Thematik unter Berücksichtigung aller Unsicherheitsbeiträge die Anwendung numerischer Lösungsmodelle (Monte-Carlo-Verfahren) sinnvoll erscheinen lässt.

(3) Die Veröffentlichung von Storm et al [11] führt aus, dass die *tatsächliche* Irrtumswahrscheinlichkeit α_{real} bei kleinen Erwartungswerten der Nulleffektimpulszahl erheblich von der angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit α (hier: 0,05) abweicht. Selbst bei einem Erwartungswert von $\langle n_0 \rangle \sim 10$ würde α_{real} noch ca. 0,08 betragen (vgl. **Bild 2-4**).

(4) Der einfache „Vorschlag“ der DIN ISO 11929 verbessert die Situation bereits erheblich, andere Veröffentlichungen wie z. B. Stapleton (vgl. [11]) haben Näherungsformeln ermittelt⁸, die bereits ab $\langle n_0 \rangle \sim 2$ stabile Irrtumswahrscheinlichkeiten α garantieren.

(5) Über einen ähnlichen Zugang berechnet Alvarez [12] korrigierte charakteristische Grenzen für den Fall kleiner Impulszahlen. Im Ergebnis liegen die Erkennungsgrenzen nach Alvarez für $\langle n_0 \rangle = (1; 3; 10; 40; 200)$ um ca. (75; 40; 20; 10; 5) % höher als die konventionellen Erkennungsgrenzen.

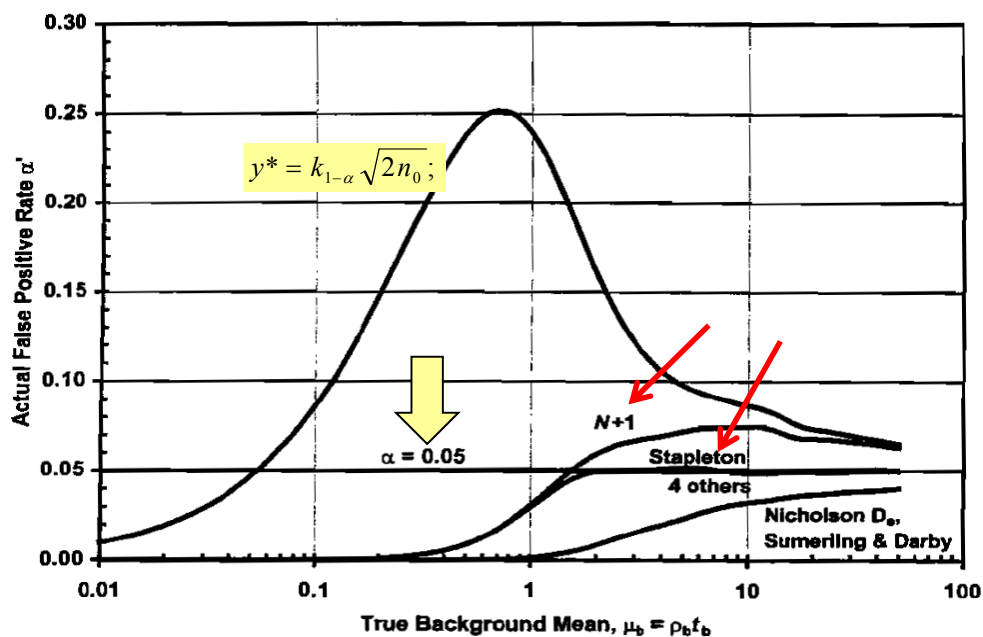


Bild 2-4: Darstellung der tatsächlichen Wahrscheinlichkeit für falsch positive Ergebnisse (α') nach Storm et al für $\alpha = 0,05$ für verschiedene Berechnungsmodelle als Funktion der Nulleffektimpulszahl.

(6) Die o. g. Literaturstellen gestatten jedoch nur eine optimierte Betrachtung der zählstatistischen Effekte, eine vollständige Behandlung aller Unsicherheitsbeiträge ist derzeit noch nicht im Regelwerk verankert und würde den Rahmen dieses Sachstandsberichtes bei Weitem übersteigen.

2.5.3 Korrelationen zwischen Eingangsgrößen, Kovarianzen

(1) Das Modell der Auswertung nach DIN ISO 11929 kennt keine Korrelationen zwischen den beteiligten Eingangsgrößen (vgl. Gleichung (2-1)), der die Kovarianzen berücksichtigende additive Term zur Berechnung der Unsicherheit des Messergebnisses wird vernachlässigt (vgl. die Herleitung der Näherung über die „Gauß’schen Fehlerfortpflanzung“, Gleichung (B-13) im **Anhang B**).

$$^8 z_{\text{Stap}}(n_g, t_g, n_0, t_0, d) = 2 \frac{\sqrt{\frac{n_g + d}{t_g}} - \sqrt{\frac{n_0 + d}{t_0}}}{\sqrt{\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_0}}}; \text{ mit } \alpha = 0,05 \Rightarrow d = 0,4 \quad (2-23)$$

Entscheidungskriterium: Wenn $z_{\text{Stap}} > k_{1-\alpha}$, dann Aktivität > Erkennungsgrenze

(2) Da der erweiterte Kalibrierfaktor w alle multiplikativ in das Modell der Auswertung eingehenden Eingangsgrößen zusammenfasst, ist im Hinblick auf „versteckte Korrelationen“ bei dessen kritikloser Anwendung Vorsicht geboten. Die Verwendung einer Größe w ist uneingeschränkt nur zulässig sofern es sich tatsächlich um unabhängige Eingangsgrößen handelt.

(3) Eine Möglichkeit besteht darin, das Modell der Auswertung so aufzustellen, dass die Unabhängigkeit der Eingangsgrößen gewährleistet bleibt. Ein Beispiel hierfür ist der Iodmonitor basierend auf einem NaI(Tl)-Detektor, ausgewertet nach der sog. „Zwei-Fenster-Methode“, da hierbei zunächst davon auszugehen ist, dass, da bei einem Drift der Energiekalibrierung über die Zeit sowohl die Nettozählrate als auch die Zählausbeute stark beeinflusst werden, aber es sich hierbei um abhängige Eingangsgrößen in das Modell der Auswertung handelt (vgl. Abschnitt 3.4). Ein Beispiel zur Berücksichtigung der Korrelation zwischen zwei Eingangsgrößen ist der Abschnitt 3.7 (Tritium im Abwasser).

(4) Ein Beispiel mit unvermeidlichen Korrelationseffekten ist die Effizienzkalibrierung von Halbleiterdetektoren mit Radionukliden, die mehrere Energielinien besitzen, welche zur Kalibrierung verwendet werden. Die Auswirkungen sind jedoch, da die Aktivitätsnormale selbst nur Unsicherheiten im Prozentbereich besitzen, in üblichen Anwendungsfällen vernachlässigbar.

(5) Korrelationseffekte, die bspw. beim Übergang von aktivitätsbezogenen auf dosisbezogene Messgrößen auftreten, können im Gegensatz dazu gravierend sein (z. B. Messung der nuklidspezifischen Dosisleistung mit Halbleiterdetektoren oder Abschätzung der Gammasubmersion nach störfallbedingten Ableitungen über den Fortluftkamin). Hierbei handelt es sich i. A. um abhängige Eingangsgrößen mit negativen Korrelationskoeffizienten, so dass die Vernachlässigung der Korrelation zu einer Überschätzung der Unsicherheit führt und damit ein Vergleich der oberen Grenze des Vertrauensbereiches der jeweiligen Messgröße mit einem regulatorisch vorgegebenen Wert insgesamt zu einer konservativen Beurteilung führt.

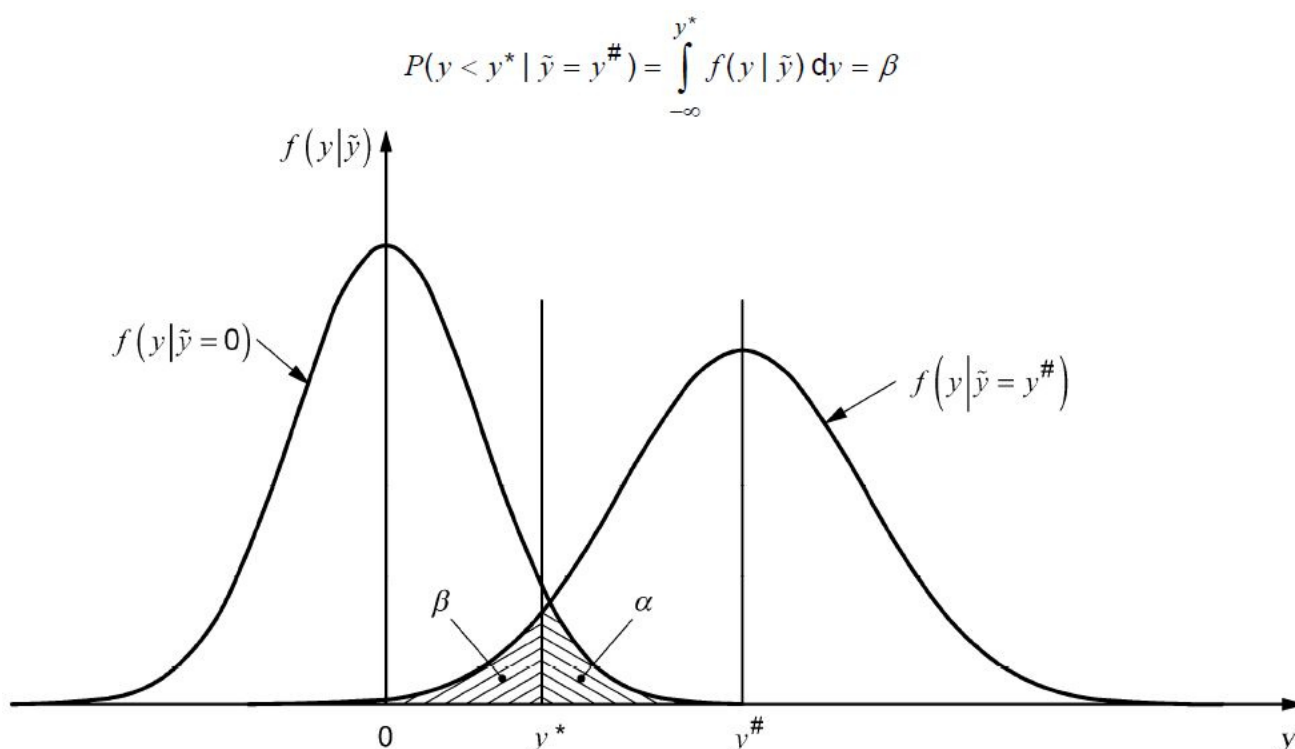
2.5.4 Zulässige relative Unsicherheiten von Eingangsgrößen

(1) In der zusammenfassenden Darstellung in **Bild 2-3** am Anfang des Abschnittes 2.5 wurde deutlich, dass eine wesentliche Erweiterung der DIN ISO 11929 die Behandlung von Unsicherheiten ist, die mit dem erweiterten Kalibrierfaktor w einhergehen, also der Einführung einer dieser Größe zugeordneten relativen Unsicherheit $u_{\text{rel}}(w) > 0$ (vgl. Abschnitt 2.5.1). Andererseits folgt aus der Gleichung (A-2) im **Anhang A** unmittelbar, dass ein $u_{\text{rel}}(w)$ existiert, für das die Nachweisgrenze unendlich groß wird und wo für jeden größeren Wert von $u_{\text{rel}}(w)$ die Nachweisgrenze negativ ist (s. a. (2-17)).

(2) Zur Verdeutlichung sei nun das Ergebnis der Abschätzung der Unsicherheit eines Messverfahrens, z. B. dass $u_{\text{rel}}(w)$ in der Größenordnung eines Faktors 2 bis 3 liegt⁹. Es widerspricht schon der Intuition, dass ein Messverfahren dann geeignet bleibt, wenn w konservativ gewählt worden ist (mit $u_{\text{rel}}(w) \rightarrow 0$) und das Messverfahren diese Eignung verliert, sobald die Eingangsgrößen realitätsnah gewählt werden. Der streng mathematische Grund hierfür ist in der Gleichung (B-14) im **Anhang B** begründet.

(3) Anschaulich ist dies bei Größen x_i , die direkt – also im Zähler – in den erweiterten Kalibrierfaktor w eingehen, so zu verstehen, dass bei großen $u_{\text{rel}}(x_1)$ unter Beibehaltung der Annahme einer Normalverteilung nicht nur die Wahrscheinlichkeit für *negative* $u_{\text{rel}}(x_1)$ zunimmt (negative Werte sind grundsätzlich eine physikalisch unsinnige Annahme), sondern dass die Breite der WDF zur Bestimmung der Nachweisgrenze (vgl. **Bild 2-5**) mit wachsendem $u_{\text{rel}}(w)$ „so schnell“ zunimmt, dass für die iterativ bestimmte Nachweisgrenze $y^\#$ kein endlicher Wert mehr existiert. Vor der Diskussion des Lösungsansatzes wird auf den häufigeren Fall eingegangen, in dem eine Größe x_i über den Nenner, also $w \propto 1/x_i$, in das Modell der Auswertung eingeht.

⁹ Dies mag für die im folgenden Abschnitt 3 behandelten Beispiele unrealistisch hoch erscheinen, bei anderen Aufgabenstellungen wie der Abschätzung von Aktivitätsableitungen im Störfall oder bei Freigabemessungen, die nicht im Anwendungsbereich dieses Berichts liegen, können derartige Messunsicherheiten realistisch sein. Großen Unsicherheiten einzelner Einflussgrößen wie z. B. dem Entnahmefaktor bei der Wischtestauswertung oder der Selbstabsorption von Alphastrahlern in der Filtergeometrie (vgl. D.2.1 in der DIN ISO 11929) kann noch bis zu einem gewissen Grad mit der Annahme von Rechteck- (oder Dreiecks-)verteilungen begegnet werden. Danach ist keine Behandlung im Geltungsbereich der DIN ISO 11929 mehr möglich.



Legende

y primäres Messergebnis der Messgröße Y

$f(y|\tilde{y})$ Wahrscheinlichkeitsverteilung; bedingte Wahrscheinlichkeit, einen Messwert y zu erhalten, wenn ein wahrer Wert $\tilde{y}$ der Messgröße Y vorliegt

Bild 2-5: Wahrscheinlichkeitsverteilungen (WDF) zur Bestimmung der Erkennungs- und Nachweisgrenze nach DIN ISO 11929

(4) Der einfache Fall der Auswertung eines Wischtests ist hierfür repräsentativ und besitzt mit dem nuklidspezifischen Kalibrierfaktor, der gewischten Fläche und dem Entnahmefaktor ausschließlich Eingangsgrößen, deren Kehrwerte zur Berechnung des Messwertes ($y \propto 1/x_i$) beitragen. Wird nun bei einem Modell der Auswertung, welches in diesem einfachsten Fall $y = 1/w$ lautet, die Unsicherheit mit einem relativ hohen $u_{\text{rel}}(w)$ beschrieben, so wird bei der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung – also dem Abbruch der Taylorreihenentwicklung nach der ersten Ordnung – eine erforderliche Verzerrung der Normalverteilung verhindert (vgl. **Bild 2-6**). Eine unsicherheitsbehaftete Eingangsgröße im Nenner des Modells der Auswertung, die als normalverteilt unterstellt wird, führt in der Realität zu einer *asymmetrischen* Verteilung der Ergebnisgröße.

(5) Das Supplement 1 des GUM [13] liefert die mathematischen Hilfsmittel zur korrekten Behandlung dieser Aufgabenstellungen auf der Basis von Monte-Carlo-Rechnungen¹⁰. Im Ergebnis existiert bei der Anwendung dieses Berechnungsmodells für *jedes* Messverfahren eine Nachweisgrenze.

¹⁰ Als erstes konkretes Beispiel wurden die Auswirkungen dieses Ansatzes auf die charakteristischen Grenzen bei der Anwendung der kollimierten In-situ-Gammaspektrometrie bei der Freigabe von Gebäudestrukturen gezeigt (9. Expertentreffen TÜV SÜD 2014, [14]).

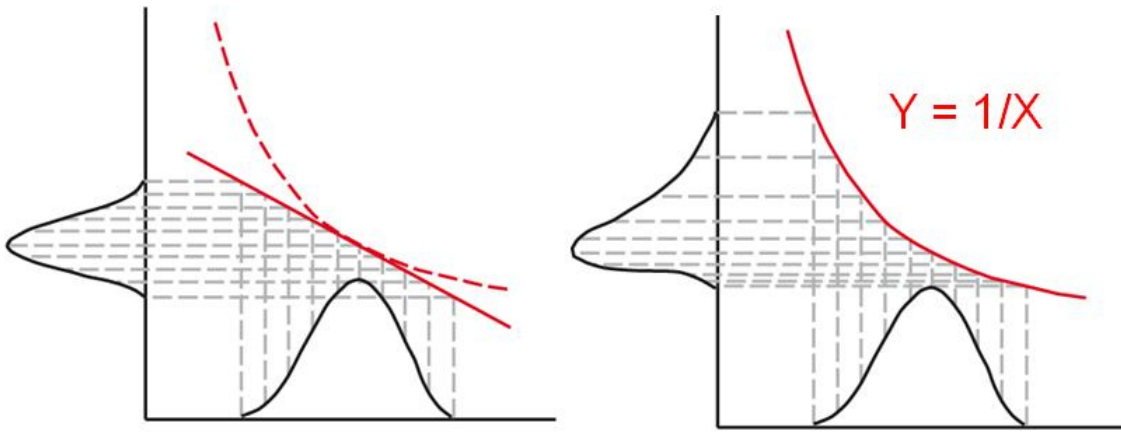


Bild 2-6: Eine normalverteilte Eingangsgröße x wird durch die lineare Approximation am Maximum der Verteilung (Gauß'sche Fehlerfortpflanzung) zu einer normalverteilten Ausgangsgröße y abgebildet (linkes Diagramm). In der Realität führt das Modell der Auswertung $y = 1/x$ zu einer asymmetrischen WDF der Ergebnisgröße y (rechtes Diagramm).

2.6 Unsicherheiten bei der Bilanzierung von Ableitungen

(1) Bei der Gesamtbilanzierung von Emissionswerten (z. B. Fortluft oder Wasser) werden Messwerte (z. B. Einzelwerte, Wochenwerte, etc.) mit ihren zugehörigen Messunsicherheiten bestimmt. Aus den aufsummierten Messwerten werden z.B. Monatswerte, Quartalswerte und Jahreswerte gebildet, die z. B. zur Einhaltung von Genehmigungswerten heran gezogen werden.

(2) Für die dazugehörigen einzelnen Messunsicherheiten und die Bildung von „Monatsmessunsicherheiten“, Quartalsmessunsicherheiten“ bzw. „Jahresmessunsicherheiten“ gibt es verschiedene Möglichkeiten der Messunsicherheitsfortpflanzung wie z. B. einfache Aufsummierung der einzelnen Messunsicherheiten oder Gauß'sche Fehlerfortpflanzung der Messunsicherheiten.

Hinweis:

- (1) Die Aufsummierung der einzelnen Messunsicherheiten ist mathematisch sehr einfach und führt zu einem konservativen Wert der „Gesamtmessunsicherheit“.
- (2) Die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung der Messunsicherheiten führt zu einer geringeren relativen Gesamtmessunsicherheit. Bei der Betrachtung der Messunsicherheiten bei mehreren unabhängigen Messungen werden sich einige Anteile der Messunsicherheiten verringern („herausmitteln“) und andere Anteile der Messunsicherheiten unverändert bleiben („nicht herausmitteln“).
- (3) Im bisherigen Regelwerk werden hierzu keine weiteren Festlegungen getroffen. Da es keine eindeutige Lösung für die Aufgabenstellung gibt, werden bei den folgenden Beispielen nur Einzelwerte mit ihren charakteristischen Größen betrachtet.

3 Anwendungsbeispiele

3.1 Allgemeines

(1) In den folgenden Anwendungsbeispielen werden einzelne Messverfahren der KTA 1500er-Reihe beschrieben, um die charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze, Grenzen des Vertrauensbereiches) nach DIN ISO 11929 zu berechnen.

(2) Eine Darstellung aller möglichen Messverfahren lässt sich im Rahmen dieses Sachstandsberichtes nicht realisieren. Die Anwendungsbeispiele stellen eine typische Auswahl von vielfach angewendeten Messverfahren dar. Diese Anwendungsbeispiele können aber sinngemäß auf weitere Messverfahren übertragen werden.

(3) Jedes Anwendungsbeispiel wurde praxisorientiert aufgearbeitet und in folgender Art untergliedert:

- Modellansatz
 - Grundlage
 - Beschreibung bzw. Aufgabe/Funktion
 - Betrachtetes Messgerät
 - Allgemeine Betrachtung der relevanten Parameter
 - Spezielle Betrachtung der relevanten Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors
 - Nichtrelevante Parameter der Modellannahmen und des erweiterten Kalibrierfaktors
 - Bemerkungen
- Berechnungen
 - Eingangsgrößen
 - Berechnung der charakteristischen Grenzen
 - Dokumentation

(4) Die angegebenen Messwerte bzw. Einstellungen sind beispielhaft anzusehen und stammen aus Erfahrungswerten und konkreten Messungen. Messdauern werden hier als nicht messunsicherheitsbehaftet angesehen.

(5) Im Zusammenhang mit einem konkreten Messverfahren ist im Einzelfall zu entscheiden, ob die Abschätzung der Eingangsgröße/Unsicherheiten konservativ oder realitätsnah durchgeführt werden soll. Die Entscheidung wird im Wesentlichen von den vorliegenden Informationen bzw. für den Aufwand der Ermittlung der benötigten Informationen für die betrachte Messgröße und den Möglichkeiten der Umsetzung in der Gerätesoftware beeinflusst. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob die Eingangsgröße selber konservativ festgelegt wird, dann hat die Eingangsgröße keine Unsicherheit mehr oder ob lediglich die Unsicherheit der Eingangsgröße konservativ abgeschätzt wird. Eine konservative Festlegung einer Eingangsgröße kann erforderlich sein, wenn z. B. in einem Messgerät zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration lediglich die Möglichkeit besteht, den Durchsatz (m^3/h) als einen festen Parameter vorzugeben, und eine Anpassung der Software nicht oder nur mit sehr großem Aufwand möglich wäre. Bei der Festlegung der Unsicherheit einer Messgröße kann es z. B. sinnvoll sein, die Unsicherheit konservativ abzuschätzen, wenn im Regelwerk für die betrachtete Größe bereits eine maximal zulässige Unsicherheit vorgegeben ist und sich hierdurch aufwendige Messreihen zur Ermittlung der konkreten/genauen Unsicherheit erübrigen. Beispiel: Nach KTA 1503.1 darf die Messunsicherheit des Volumenstromes 5 % des Nennvolumenstromes betragen. Für den Fall, dass die betrachteten Messgrößen große Unsicherheiten aufweisen, kann der Fall eintreten, dass mathematisch keine Nachweisgrenze mehr existiert. Eine realistische Festlegung von Eingangsgrößen und deren Unsicherheiten bietet sich dann an, wenn die benötigten Daten vorhanden sind oder ohne großen Aufwand ermittelt werden können und zusätzlich die Software die Möglichkeit bietet, diese Parameter auch zu verarbeiten. In diesem Fall kann vermieden werden, unnötig konservativ vorzugehen.

(6) Die nachfolgenden Beispiele sind mit $k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,645$ (z. B. KTA 1503.1) und $\gamma = 0,05$ berechnet. Auf Grund der Festlegungen in KTA 1503.1, Abschnitt 5.2 ist es ausreichend, $\gamma/2 = 0,05$ (entspricht $k_{1-\gamma/2} = 1,645$) zu verwenden. Bezüglich des Quantils bei der Berechnung des Vertrauensbereichs ist Abschnitt 2.4.2 zu beachten.

(7) Excel-Dateien mit Beispielberechnungen können über die Internetseite der KTA-Geschäftsstelle heruntergeladen werden (www.kta-gs.de) Button "Formulare").

3.2 Festinstallierter Edelgas-Monitor

Hinweis:

Grundlage dieser Betrachtungen sind die Anforderungen nach KTA 1503.1.

3.2.1 Beschreibung bzw. Aufgabe/Funktion:

Zur Überwachung der Edelgasaktivitätsleitung mit der Kaminfortluft nach KTA 1503.1 wird die Edelgasaktivitätskonzentration mit Hilfe eines Edelgasmonitors kontinuierlich gemessen. Anschließend wird die gemessene Edelgasaktivitätskonzentration mit dem Luftdurchsatz durch den Kamin multipliziert und die abgegebene Menge über einen Zeitraum (z. B. Stunde, Tag, Monat, Jahr) aufsummiert.

Hinweis:

Zur endgültigen Überwachung der Edelgasaktivitätsableitung mit der Kaminfortluft nach KTA 1503.1 wird zusätzlich eine Gasprobenauswertung zur Bilanzierung durchgeführt.

3.2.2 Betrachtetes Messgerät:

Detektor: β -Plastikdetektor

Messprinzip: Impulsmessung mit Abbruch nach vorgegebener Impulssumme bzw. Messdauer

Messgerät: luftdurchströmte Messkammer

3.2.3 Allgemeine Betrachtung der relevanten Parameter:

Die Aktivitätsableitungsrate y wird über folgendes Modell bestimmt:

$$y = (r_g - r_0 x_3 - x_4) w = \left(\frac{n_g}{t_g} - \frac{n_0}{t_0} x_3 - x_4 \right) w = \left(\frac{n_g}{t_g} - \frac{n_0}{t_0} \right) w$$

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
y	Aktivitätsableitungsrate	Bq/s			A+B
r_g	Bruttozählrate	1/s		$\sqrt{\frac{r_g}{t_g}}$ ¹⁾	A
r_0	Nulleffektzählrate	1/s		$\sqrt{\frac{r_0}{t_0}}$ ¹⁾	A
w	erweiterter Kalibrierfaktor siehe nachfolgende Berechnungen	Bq	510000	34079 // 7,32 %	B
n_g	Anzahl Bruttoimpulse	-	1000	$\sqrt{n_g}$ ¹⁾	A
n_0	Anzahl Nulleffektimpulse	-	73000	270 // 0,4 %	A
t_g	Messdauer des Bruttoeffekts	s	1 bis 576	0	A
t_0	Messdauer des Nettoeffekts	s	4500	0	A
¹⁾ bei 1000 Impulsen liegt die Messunsicherheit bei 3,2 %, bei 10000 Impulsen liegt die Messunsicherheit bei 1 %					

Tabelle 3-1: Relevante Parameter zur Bestimmung der Aktivitätsableitungsrate mittels Edelgasmonitor

3.2.4 Spezielle Betrachtung der relevanten Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors:

Der erweiterte Kalibrierfaktor w des Messplatzes wird über folgende Gleichung bestimmt:

$$w = \frac{x_5 t_{\text{Kal}}}{n_{\text{Kal}}} f x_6 x_7 x_8$$

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
x_5	Aktivitätskonzentration des Kalibrierpräparates	Bq/m ³	$1,70 \cdot 10^6$	$8,50 \cdot 10^4 // 5 \%$	B
t_{Kal}	Messdauer der Kalibriermessung	s	4	0	A
n_{Kal}	Anzahl Nettoimpulse während der Kalibriermessung	-	1000	32 // 3,2 %	B
f	Fortluftvolumenstrom	m ³ /s	75	0	B
x_6	Nuklidfaktor (Unterschied Kalibriernuklid / Messnuklid)	-	1	0	B
x_7	Faktor (Δp) zur Dichtekorrektur bei Druckschwankungen in der Edelgasmesskammer	-	1	3 %	B
x_8	Faktor zur Konstanz der Anschlusskalibrierung	-	1	3 %	B

Tabelle 3-2: Relevante Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors

f : Der Fortluftvolumenstrom wird bestimmt und liegt bei ca. 56-59 m³/s, konservativ wird mit 75 m³/s gerechnet. Nach KTA 1503.1 darf die Messunsicherheit des Volumenstromes 5 % des Nennvolumenstromes betragen.

x_6 ist durch eine konservative Festlegung mit den obigen Einstellungen und Messunsicherheiten festgelegt. Der Nuklidvektor (80 % Xe-133 und 20 % Kr-85) wurde konservativ angesetzt.

x_7 : Der „Unterdruck“ im Probenentnahmesystem liegt bei ca. 21 hPa +/- 1 hPa. Der Absolutdruck liegt entsprechend bei 995 hPa (verhält sich analog zum äußeren Luftdruck. Daher ist die Schwankung im Probenentnahmesystem bei 995 hPa +/- 1 hPa, d. h. die Unsicherheit liegt bei 0,2 %. Die Durchsatzschwankungen durch die Probenentnahmepumpe des Monitors beträgt 3 %. Durch Druckschwankungen oder Durchsatzschwankungen kann der Druck in der Messkammer im vorliegenden Fall um ca. 30 hPa variieren, die resultierenden Dichteschwankungen betragen daher abdeckend ca. 3 %.

x_8 : Die Langzeitstabilität der Messeinrichtung liegt bei 3 % (aus 10 Kalibrierüberprüfungen). Dieser Wert wird bestätigt durch die Unterschiedlichkeit verschiedener Sonden (siehe Abschnitt 3.2.5).

3.2.5 Nicht relevante Parameter der Modellannahmen und des erweiterten Kalibrierfaktors:

Die Messunsicherheiten der „nicht relevanten Parameter der Modellannahmen und des erweiterten Kalibrierfaktors“ sind vernachlässigbar.

Parameter	Bezeichnung	Typ	Bemerkung
	x_3 („Abschirmfaktor“) x_4 („Untergrundkorrekturfaktor“)	B	Der Nulleffekt wird regelmäßig bestimmt und als Parameter eingegeben. Zusätzliche Korrekturparameter sind daher nicht nötig. Eine äußere Nulleffekterniedrigung während der Messung kommt in der Praxis nicht vor. Die Messbedingungen im Kaminmessraum sind als konstant anzusehen. Eine äußere Nulleffekterhöhung während der Messung führt zu einem höheren (konservativen) Messwert. Ein intern vorhandenes Prüfpräparat klingt mit der entsprechenden Halbwertszeit ab, so dass eine Anpassung des Nulleffektes nach „unten“ erforderlich wird.

Parameter	Bezeichnung	Typ	Bemerkung
	Gesamterhöhungsfaktor Probenentnahme (Einfluss anderer Nuklide, insbesondere Iod, „Aerosole“)	B	Eine äußere Erhöhung während der Messung durch andere Nuklide führt zu einem höheren (konservativen) Messwert.
	Gesamtverlustfaktor Probenentnahme (Rohrfaktor, Entnahmefaktor)	B	Nach KTA 1503.1 ist ein Gesamtverlustfaktor nur für die Bilanzierung von „an Schwebstoffen gebundenen radioaktive Stoffe“ zu berücksichtigen und somit hier nicht relevant.
	Zerfallskorrektur (aus Zeitdifferenz Probenentnahme => Messkammer)	B	Zeitdifferenz zwischen Probenentnahme und Messkammer ist sehr gering. Die Halbwertszeiten der dosisrelevanten Nuklide ist deutlich größer, so dass der radioaktive Zerfall keine Rolle spielt
	Totzeitkorrektur	B	Eine Totzeitkorrektur spielt bei niedrigen Aktivitäten keine Rolle. Bei hohen Aktivitäten (im Störfall) übernimmt eine andere Messstelle die Aufgabe.
	Faktor zur Selbstabsorption der Probe in der Messkammer	B	Eine Selbstabsorption innerhalb der gasgefüllten Messkammer ist nahezu nicht möglich. Volumen der Messkammer: 5750 cm ³ , Höhe: 11,1 cm, Durchmesser: 30 cm; mit Verwirbelung
	Detektorwechsel	B	Die Abweichungen verschiedener Sonden liegen bei < 3 % aus der Erstkalibrierung und sind somit vergleichbar mit der Konstanz bei Anschlusskalibrierungen.
	Betriebsspannung bzw. Strom-/Spannungssignal am Ausgang	B	Die Betriebsspannung einschließlich des Strom-/Spannungssignals am Ausgang bzw. deren Schwankungen haben keinen Einfluss auf die Messergebnisse.

Tabelle 3-3: Nichtrelevante Parameter**Hinweise:**

- (1) Die Messung bricht nach einer maximalen Messdauer bzw. einer maximalen Impulssumme ab. Der Fall „Abbruch über Impulssumme“ kann bei „guter“ Zählstatistik identisch mit dem Fall „Abbruch über Messdauer“ behandelt werden.
- (2) Die Nachweisgrenze ist nach KTA 1503.1 bei einer Dosisleistung von 0,25 µGy/h zu ermitteln.

3.2.6 Berechnungen**3.2.6.1 Eingangsgrößen**

Als Eingangsgrößen werden die Anzahl der Bruttoimpulse (n_g) bzw. die Messdauer (t_g) für zwei verschiedene Fälle (hohe Aktivität, KTA-Richtwertvergleich) variiert. Die sonstigen Eingangsgrößen sind den Tabellen zum Modellansatz bzw. zum erweiterten Kalibrierfaktor angegeben.

Beispiele	Eingangsgröße	Wert	Einheit
KTA-Anforderung	n_g	10700	-
	t_g	600	s
hohe Aktivität	n_g	1000	-
	t_g	1	s

Tabelle 3-4: Beispielhafte Werte der Eingangsgrößen nach KTA 1503.1.

3.2.6.2 Berechnungen der charakteristischen Größen

Im folgenden Beispiel werden 10 Minuten Messdauer nach KTA 1503.1 verwendet.

Folgende Parameter wurden verwendet und die zugehörigen Hilfsgrößen berechnet:

$$k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,645$$

$$\gamma = 0,05$$

$$w = \frac{x_5 t_{\text{kal}}}{n_{\text{kal}}} f x_6 x_7 x_8 = \frac{1,7 \cdot 10^6 \text{ Bq/m}^3 \cdot 4 \text{ s}}{1000} \cdot 75 \text{ m}^3 / \text{s} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 5,10 \cdot 10^5 \text{ Bq}$$

$$u(w) = w \sqrt{\sum_i \frac{u^2(x_i)}{x_i^2}} = w \sqrt{\left(\frac{u(x_5)}{x_5}\right)^2 + \left(\frac{u(t_{\text{kal}})}{t_{\text{kal}}}\right)^2 + \left(\frac{u(n_{\text{kal}})}{n_{\text{kal}}}\right)^2 + \left(\frac{u(x_6)}{x_6}\right)^2 + \left(\frac{u(x_7)}{x_7}\right)^2 + \left(\frac{u(x_8)}{x_8}\right)^2 + \left(\frac{u(f)}{f}\right)^2}$$

$$u(w) = 5,10 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \sqrt{\left(\frac{85000}{1,70^6}\right)^2 + \left(\frac{0}{4}\right)^2 + \left(\frac{32}{1000}\right)^2 + \left(\frac{0}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,03}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,03}{1}\right)^2 + \left(\frac{0}{75}\right)^2}$$

$$u(w) = 3,71 \cdot 10^4 \text{ Bq}$$

$$u_{\text{rel}}(w) = \frac{u(w)}{w} = \frac{3,71 \cdot 10^4 \text{ Bq}}{5,10 \cdot 10^5 \text{ Bq}} = 0,0728 = 7,28 \%$$

$$c_0 = w^2 \left[x_3 \frac{n_0}{t_0} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{x_3}{t_0} \right) + \left(\frac{n_0}{t_0} \right)^2 u^2(x_3) \right]$$

$$c_0 = (5,10 \cdot 10^5 \text{ Bq})^2 \left[1 \cdot \frac{73000}{4500 \text{ s}} \left(\frac{1}{600 \text{ s}} + \frac{1}{4500 \text{ s}} \right) + \left(\frac{73000}{4500 \text{ s}} \right)^2 \cdot 0 \right] = 7,97 \cdot 10^9 \frac{\text{Bq}^2}{\text{s}^2}$$

$$c_1 = \frac{w}{t_g} = \frac{5,10 \cdot 10^5 \text{ Bq}}{600 \text{ s}} = 850 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

$$c_2 = u_{\text{rel}}^2(w) = \left(\frac{u(w)}{w} \right)^2 = \left(\frac{3,71 \cdot 10^4 \text{ Bq}}{5,10 \cdot 10^5 \text{ Bq}} \right)^2 = (0,0728)^2 = 0,0053$$

$$\omega = \phi \left[\frac{y}{u(y)} \right] = 1,0$$

Das Ergebnis der Modellgleichung einschließlich des erweiterten Kalibrierfaktors und den zugehörigen Unsicherheiten ist

$$y = \left(\frac{n_g}{t_g} - \frac{n_0}{t_0} \right) w = \left(\frac{10700}{600 \text{ s}} - \frac{73000}{4500 \text{ s}} \right) \cdot 5,10 \cdot 10^5 \text{ Bq} = 8,22 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

$$u(y) = \sqrt{w^2 \left[\frac{n_g^2}{t_g^2} + \frac{x_3^2 n_0^2}{t_0^2} + \left(\frac{n_0}{t_0} \right)^2 u^2(x_3) + u^2(x_4) \right] + y^2 u_{\text{rel}}^2(w)}$$

$$u(y) = \sqrt{(5,10 \cdot 10^5 \text{ Bq})^2 \left[\frac{10700}{(600 \text{ s})^2} + \frac{1^2 \cdot 73000}{(4500 \text{ s})^2} + \left(\frac{73000}{4500 \text{ s}} \right)^2 \cdot 0 + 0 \right] + (8,22 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}})^2 \cdot (0,0728)^2}$$

$$u(y) = 1,11 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

Damit ergeben sich insgesamt die folgende Erkennungs- und Nachweisgrenze:

$$y^* = k\sqrt{c_0} = 1,645 \cdot \sqrt{7,97 \cdot 10^9} \frac{\text{Bq}}{\text{s}} = 1,47 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

$$y^\# = \frac{2y^* + k^2 c_1}{1 - k^2 c_2} = \frac{2 \cdot 1,47 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} + 1,645^2 \cdot 850 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}}{1 - 1,645^2 \cdot 0,005} = 3,00 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

Unter Verwendung des erweiterten Kalibrierfaktors für Xe-133 ergibt sich eine Nachweisgrenze von $3,0 \cdot 10^5 \text{ Bq/s}$. Bei einem Fortluftvolumenstrom von $75 \text{ m}^3/\text{s}$ entspricht dies einer Aktivitätskonzentration von $4,0 \cdot 10^3 \text{ Bq/m}^3$. Aufgrund der in KTA 1503.1 geforderten Nachweisgrenzen von 10 kBq/m^3 ist das Messverfahren geeignet.

Die Berechnung der oberen Vertrauensgrenze (vgl. Abschnitt 2.4.2) und des Besten Schätzwertes einschließlich der zugehörigen Unsicherheit ist

$$y^\triangleright = y + k_p u(y) = 8,22 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} + 1,96 \cdot 1,11 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} = 1,04 \cdot 10^6 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

$$\hat{y} = y + \frac{u(y) \exp\left[\frac{-y^2}{2u^2(y)}\right]}{\omega\sqrt{2\pi}} = 8,22 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} + \frac{1,11 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} \cdot \exp\left[\frac{-(8,22 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}})^2}{2 \cdot (1,11 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}})^2}\right]}{1 \cdot \sqrt{2\pi}}$$

$$\hat{y} = 8,22 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

$$u(\hat{y}) = \sqrt{u^2(y) - \hat{y}(\hat{y} - y)} = \sqrt{(1,11 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}})^2 - 8,22 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} \cdot (8,22 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} - 8,22 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}})}$$

$$u(\hat{y}) = 1,11 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

3.2.7 Dokumentation

Zusammenfassend ergibt sich folgendes Ergebnis:

Gesamtergebnis			
	$k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,645$ $\gamma = 0,05$		
Eingangsgrößen ($n_g; t_g$)		KTA-Anforderung	hohe Aktivität
		Bq/s	Bq/s
Primäres Messergebnis	y	$8,22 \cdot 10^5$	$5,02 \cdot 10^8$
Standardunsicherheit zu y	$u(y)$	$1,11 \cdot 10^5$	$4,01 \cdot 10^7$
Erkennungsgrenze	y^*	$1,47 \cdot 10^5$	$3,38 \cdot 10^6$
Messeffekt erkannt?	$y > y^* ?$	Ja	Ja
Nachweisgrenze ¹⁾	$y^\#$	$3,00 \cdot 10^5/4 \cdot 10^3 \text{ Bq/m}^3$	$8,26 \cdot 10^6$
Messverfahren für Messzweck geeignet?	$y^\# \leq y_r ?$	Ja	entfällt ²⁾
Obere Vertrauensgrenze	$y^>$	$1,04 \cdot 10^6$	$5,80 \cdot 10^8$
Bester Schätzwert	$\hat{y}$	$8,22 \cdot 10^5$	$5,02 \cdot 10^8$
Standardunsicherheit zu $\hat{y}$	$u(\hat{y})$	$1,11 \cdot 10^5$	$4,01 \cdot 10^7$
Richtwert/Grenzwert	y_r	$1,00 \cdot 10^4 \text{ Bq/m}^3$	
für Xe-133 in 10 Minuten		$7,50 \cdot 10^5 \text{ Bq/s}$	
1) Die hier angegebenen Werte beziehen sich auf 80 % Xe-133, 20 % Kr-85.			
2) Nachweisgrenzenberechnung für hohe Aktivitätskonzentration nicht relevant			

Tabelle 3-5: Ergebnis und charakteristische Grenzen

3.3 Festinstallierter Aerosol-Monitor

Hinweis:

Grundlage dieser Betrachtungen sind die Anforderungen nach KTA 1503.1.

3.3.1 Beschreibung bzw. Aufgabe/Funktion

Zur Überwachung der Aktivitätsableitung von an Schwebstoffen gebundenen radioaktiven Stoffen mit der Kaminfortluft nach KTA 1503.1 wird die Aktivitätskonzentration mit Hilfe eines Aerosolmonitors kontinuierlich gemessen. Anschließend wird die gemessene Aktivitätskonzentration mit dem Luftdurchsatz durch den Kamin multipliziert und die abgegebene Menge über einen bestimmten Zeitraum (z. B. Stunde, Tag, Monat, Jahr) aufsummiert.

Hinweis:

Zur Bilanzierung der Aktivitätsableitung von an Schwebstoffen gebundenen radioaktiven Stoffen mit der Kaminfortluft nach KTA 1503.1 wird parallel eine Filterauswertung durchgeführt.

3.3.2 Betrachtetes Messgerät

Detektor: Nal-Szintillationsdetektor

Messprinzip: Impulsmessung mit Abbruch nach vorgegebener Impulssumme bzw. Messdauer

Messgerät: Festfiltergerät (Sammelfilterkanal)

3.3.3 Allgemeine Betrachtung der relevanten Parameter

Die Aktivitätsableitungsrate y wird über folgendes Modell bestimmt:

$$y = (r_g - r_{g,v} x_3 - x_4) \frac{2w}{t_g + t_{g,v}} f_r = \left(\frac{n_g}{t_g} - \frac{n_{g,v}}{t_{g,v}} x_3 - x_4 \right) \frac{2w}{t_g + t_{g,v}} f_r$$

$$y = \left(\frac{n_g}{t_g} - \frac{n_{g,v}}{t_{g,v}} \right) \frac{2w}{t_g + t_{g,v}}$$

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
y	Aktivitätsableitungsrate	Bq/s			A+B
r_g	Bruttozählrate	1/s		$\sqrt{\frac{r_g}{t_g}}^{1)}$	A
$r_{g,v}$	Bruttozählrate der Messung ‚vorher‘	1/s		$\sqrt{\frac{r_{g,v}}{t_{g,v}}}^{1)}$	A
w	erweiterter Kalibrierfaktor (Impulsratenanstieg) siehe nachfolgende Berechnungen	Bq · s	$3,14 \cdot 10^6$	$2,37 \cdot 10^5 // 7,5 \%$	B
n_g	Anzahl Bruttoimpulse	-	3960	$\sqrt{n_g}^{1)}$	A
$n_{g,v}$	Anzahl Bruttoimpulse der Messung ‚vorher‘	-	3600	$\sqrt{n_{g,v}}^{1)}$	A
t_g	Messdauer des Bruttoeffekts	s	$3600^{2)}$	0	A
$t_{g,v}$	Messdauer des Bruttoeffekts ‚vorher‘	s	$3600^{2)}$	0	A

1) bei 1000 Impulsen liegt die Messunsicherheit bei 3,2 %
bei 10000 Impulsen liegt die Messunsicherheit bei 1 %

2) kürzere Messdauern sind möglich

Tabelle 3-6: Relevante Parameter zur Bestimmung der Aktivitätsableitungsrate mittels Aerosolmonitor

Der apparative Nulleffekt wird ebenfalls ermittelt mit Messdauern von 10000 s bis 20000 s und die Impulssumme liegt bei > 10000 .

3.3.4 Spezielle Betrachtung der relevanten Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors

Der erweiterte Kalibrierfaktor w des Messplatzes wird über folgende Gleichung bestimmt:

$$w = \frac{x_5 t_{\text{Kal}}^2}{n_{\text{Kal}}} f x_6 x_7$$

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
x_5	Aktivität des Kalibrierpräparates	Bq/m ³	3,225	0,1 // 3 %	B
n_{Kal}	Anzahl Nettoimpulse während der Kalibriermessung	-	1000	32 // 3,1 %	B
t_{Kal}	Messdauer der Kalibriermessung	s	3600	0	B
f	Fortluftvolumenstrom	m ³ /s	75	0	B
x_6	Faktor zum Luftdurchsatz	-	1	3 %	B
x_7	Faktor zur Konstanz der Anschlusskalibrierung	-	1	5,3 %	B

Tabelle 3-7: Relevante Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors

- f Der Fortluftvolumenstrom wird bestimmt und liegt bei ca. 56-59 m³/s, konservativ wird mit 75 m³/s gerechnet. Nach KTA 1503.1 darf die Messunsicherheit des Volumenstromes 5 % des Nennvolumenstromes betragen.
- x_6 Der „Unterdruck“ im Probenentnahmesystem liegt bei ca. 21 hPa ± 1 hPa. Der Absolutdruck liegt entsprechend bei 995 hPa (verhält sich analog zum äußeren Luftdruck). Daher ist die Schwankung im Probenentnahmesystem bei 995 hPa ± 1 hPa, d. h. die Unsicherheit liegt bei 0,2 % und ist vernachlässigbar. Die Durchsatzschwankungen durch die Probenentnahmepumpe des Monitors beträgt 3 %.
- x_7 Die Langzeitstabilität der Messeinrichtung liegt bei 5,3 % (aus 12 Kalibrierüberprüfungen). Dieser Wert wird bestätigt durch die Unterschiedlichkeit verschiedener Sonden (siehe „nicht relevante Parameter“).

3.3.5 Nicht relevante Parameter der Modellannahmen und des erweiterten Kalibrierfaktors

Die Messunsicherheiten der „nicht relevanten Parameter der Modellannahmen“ und des „erweiterten Kalibrierfaktors“ sind vernachlässigbar.

Parameter	Bezeichnung	Typ	Bemerkung
	x_3 („Abschirmfaktor“) x_4 („Untergrundkorrekturfaktor“)	B	Zusätzliche Korrekturparameter sind nicht nötig, da es sich um eine Differenzmessung handelt. Eine äußere Nulleffekterniedrigung während der Messung kommt in der Praxis nicht vor, eine äußere Nulleffekterhöhung während der Messung führt zu einem konservativen Messwert. Natürliche Radionuklide (Rn-Folgeprodukte) sind vernachlässigbar (Langzeitmessungen der Filter).
	Nuklidfaktor	B	Ist durch eine konservative Festlegung (Cs-137) nach KTA festgelegt. Zusätzliche Messungen erfolgen bei anstehenden Grenzwerten bzw. bestimmten Anteilen der Grenzwerte.

	f_r Gesamtverlustfaktor Proben- nahme (Rohrfaktor, Entnah- mefaktor)	B	Nach KTA 1503.1 ist ein Gesamtverlustfaktor nur für die Bilanzierung von „an Schwebstoffen gebundene radioaktive Stoffe“ zu berücksichtigen und hier nicht relevant. Zusätzliche Messungen mit Berücksichtigung von f_r erfolgen bei anstehenden Grenzwerten bzw. bestimmten Anteilen der Grenzwerte. Bei Bedarf kann der Gesamtverlustfaktor f_r berücksichtigt werden. Filterklasse E12: >99,5 % Abscheidegrad
	Abklingvorgang auf dem Filter und Zerfallskorrektur	B	Die Messdauer und die Transportzeit sind gegenüber den Halbwertszeiten der relevanten Radionuklide vernachlässigbar.
	Faktor zur Selbstabsorption der Probe in der Messkammer	B	Eine Selbstabsorption innerhalb der Probe ist nahezu nicht möglich, da es sich um eine γ -Messung handelt
	Detektorwechsel	B	Die Abweichungen verschiedener Sonden liegen bei < 2 % aus der Erstkalibrierung und sind somit vergleichbar mit der Konstanz bei Anschlusskalibrierungen.
	Filterwechsel	B	Bei Filterwechsel ist der Detektor nach ca. 5 Minuten wieder vollständig eingeschwungen. Die Amplitude des Einschwingverhaltens liegt deutlich unter 0,5 Bq/m ³ . Eine Nachweis- und Erkennungsgrenzenberechnung ist erst nach dem Einschwingen durchzuführen.
	Umgebungsbedingungen	B	Die Messbedingungen im Kaminmessraum bzw. im Probenentnahmesystem (T, rel. Luftfeuchte) sind im Rahmen der Vorgaben der KTA als konstant anzusehen.
	Betriebsspannung bzw. Strom-/Spannungssignal am Ausgang	B	Die Betriebsspannung einschließlich des Strom-/Spannungssignals am Ausgang bzw. deren Schwankungen haben keinen Einfluss auf die Messergebnisse.

Tabelle 3-8: Nicht relevante Parameter**Hinweise:**

- (1) Messung bricht nach einer maximalen Messdauer bzw. einer maximalen Impulssumme ab. Der Fall „Abbruch über Impulssumme“ kann bei „guter“ Zählstatistik identisch mit dem Fall „Abbruch über Messdauer“ behandelt werden.
- (2) Die Nachweisgrenze ist nach KTA 1503.1 bei einer Dosisleistung von 0,25 µGy/h zu ermitteln.

3.3.6 Berechnungen

3.3.6.1 Eingangsgrößen

Als Eingangsgrößen werden die Anzahl der Bruttoimpulse (n_g) bzw. die Messdauer des Bruttoeffekts (t_g) für zwei verschiedene Fälle (hohe Aktivität, KTA-Richtwertvergleich) variiert. Die sonstigen Eingangsgrößen sind in den Tabellen zum Modellansatz bzw. zum erweiterten Kalibrierfaktor angegeben.

Beispiele	Eingangsgröße	Wert	Einheit
KTA-Anforderung	n_g	3960	-
	t_g	3600	s
hohe Aktivität	n_g	2000	-
	t_g	1	s

Tabelle 3-9: Beispielhafte Werte der Eingangsgrößen nach KTA 1503.1

3.3.6.2 Berechnungen der charakteristischen Größen

Im folgenden Beispiel werden 60 Minuten Messdauer nach KTA 1503.1 verwendet.

Folgende Parameter wurden verwendet und die zugehörigen Hilfsgrößen berechnet:

$$k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,645$$

$$\gamma = 0,05$$

$$w = \frac{x_5 t_{\text{Kal}}^2}{n_{\text{Kal}}} f x_6 x_7 = \frac{3,225 \text{ Bq/m}^3 \cdot (3600 \text{ s})^2}{1000} \cdot 75 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1 \cdot 1 = 3,14 \cdot 10^6 \text{ Bq s}$$

$$u(w) = w \sqrt{\sum_i \frac{u^2(x_i)}{x_i^2}} = w \sqrt{\left(\frac{u(x_5)}{x_5}\right)^2 + \left(\frac{u(n_{\text{kal}})}{n_{\text{kal}}}\right)^2 + \left(\frac{u(x_6)}{x_6}\right)^2 + \left(\frac{u(x_7)}{x_7}\right)^2 + \left(\frac{u(f)}{f}\right)^2}$$

$$u(w) = 3,14 \cdot 10^6 \text{ Bq s} \cdot \sqrt{\left(\frac{0,1}{3,225}\right)^2 + \left(\frac{32}{1000}\right)^2 + \left(\frac{0,03}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,053}{1}\right)^2 + \left(\frac{0}{75}\right)^2}$$

$$u(w) = 2,37 \cdot 10^5 \text{ Bq s}$$

$$u_{\text{rel}}(w) = \frac{u(w)}{w} = \frac{2,37 \cdot 10^5 \text{ Bq}}{3,14 \cdot 10^6 \text{ Bq}} = 0,075$$

$$c_0 = \left(\frac{2w}{t_g + t_{g,v}}\right)^2 \left[x_3 \frac{n_{g,v}}{t_{g,v}} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{x_3}{t_{g,v}}\right) + \left(\frac{n_{g,v}}{t_{g,v}}\right)^2 u^2(x_3) \right]$$

$$c_0 = \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \text{ Bq s}}{3600 \text{ s} + 3600 \text{ s}}\right)^2 \left[1 \cdot \frac{3600}{3600 \text{ s}} \left(\frac{1}{3600 \text{ s}} + \frac{1}{3600 \text{ s}}\right) + \left(\frac{3600}{3600 \text{ s}}\right)^2 \cdot 0 \right] = 4,23 \cdot 10^2 \frac{\text{Bq}^2}{\text{s}^2}$$

$$c_1 = \frac{2w}{t_g} \cdot \frac{1}{t_g + t_{g,v}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \text{ Bq}}{3600 \text{ s} \cdot (3600 \text{ s} + 3600 \text{ s})} = 0,242 \frac{\text{Bq}}{\text{s}^2}$$

$$c_2 = u_{\text{rel}}^2(w) = \left(\frac{u(w)}{w}\right)^2 = \left(\frac{2,37 \cdot 10^5 \text{ Bq}}{3,14 \cdot 10^6 \text{ Bq}}\right)^2 = 0,0057$$

$$\omega = \phi[y / u(y)] = 1,0$$

Das Ergebnis der Modellgleichung einschließlich des erweiterten Kalibrierfaktors und den zugehörigen Unsicherheiten ist

$$y = \left(\frac{n_g}{t_g} - \frac{n_{g,v}}{t_{g,v}} \right) \frac{2w}{t_g + t_{g,v}} = \left(\frac{3960}{3600 \text{ s}} - \frac{3600}{3600 \text{ s}} \right) \cdot \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \text{ Bq s}}{3600 \text{ s} + 3600 \text{ s}} = 8,72 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

$$u(y) = \sqrt{\left(\frac{2w}{t_g + t_{g,v}} \right)^2 \left[\frac{n_g^2}{t_g^2} + \frac{x_3^2 n_{g,v}^2}{t_{g,v}^2} + \left(\frac{n_{g,v}}{t_{g,v}} \right)^2 u^2(x_3) + u^2(x_4) \right] + y^2 u_{\text{rel}}^2(w)}$$

$$u(y) = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \text{ Bq}}{3600 \text{ s} + 3600 \text{ s}} \right)^2 \left[\frac{3960^2}{(3600 \text{ s})^2} + \frac{1^2 \cdot 3600^2}{(3600 \text{ s})^2} + \left(\frac{3600}{3600 \text{ s}} \right)^2 \cdot 0 + 0 \right] + \left(8,72 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} \right)^2 \cdot 0,0057}$$

$$u(y) = 2,19 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

Damit ergeben sich die folgende Erkennungs- und Nachweisgrenze:

$$y^* = k \sqrt{c_0} = 1,645 \cdot \sqrt{4,23 \cdot 10^2} \frac{\text{Bq}}{\text{s}} = 3,38 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

$$y^\# = \frac{2y^* + k^2 c_1}{1 - k^2 c_2} = \frac{2 \cdot 3,38 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} + 1,645^2 \cdot 0,242 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}}{1 - 1,645^2 \cdot 0,0057} = 6,93 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

Die Berechnung der oberen Vertrauensgrenze (vgl. Abschnitt 2.4.2) und des Besten Schätzwertes einschließlich der zugehörigen Unsicherheit ist

$$y^\triangleright = y + k_p u(y) = 8,72 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} + 1,96 \cdot 2,19 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} = 61,30 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

$$\hat{y} = y + \frac{u(y) \exp\left[\frac{-y^2}{2u^2(y)}\right]}{\omega \sqrt{2\pi}} = 8,72 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} + \frac{2,19 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} \cdot \exp\left[\frac{-\left(8,72 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot \left(2,19 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}\right)^2}\right]}{1,0 \cdot \sqrt{2\pi}}$$

$$\hat{y} = 8,72 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

$$u(\hat{y}) = \sqrt{u^2(y) - \hat{y}(\hat{y} - y)} = \sqrt{\left(2,19 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}\right)^2 - 8,72 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} \cdot \left(8,72 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}} - 8,72 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}\right)}$$

$$u(\hat{y}) = 2,19 \cdot 10^1 \frac{\text{Bq}}{\text{s}}$$

3.3.7 Dokumentation

Zusammenfassend ergibt sich folgendes Ergebnis:

Gesamtergebnis			
	$k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,645$ $\gamma = 0,05$		
Eingangsgrößen ($n_g; t_g$)		KTA-Anforderung	hohe Aktivität
		Bq/s	Bq/s
Primäres Messergebnis	y	$8,72 \cdot 10^1$	$2,71 \cdot 10^6$
Standardunsicherheit zu y	$u(y)$	$2,19 \cdot 10^1$	$2,3 \cdot 10^5$
Erkennungsgrenze	y^*	$3,38 \cdot 10^1$	$2,23 \cdot 10^3$
Messeffekt erkannt?	$y > y^* ?$	Ja	Ja
Nachweisgrenze	$y^\#$	$6,93 \cdot 10^1$	$8,27 \cdot 10^3$
Messverfahren für Messzweck geeignet?	$y^\# \leq y_r ?$	Ja	entfällt ¹⁾
Obere Vertrauensgrenze	$y^>$	$1,30 \cdot 10^2$	$3,09 \cdot 10^6$
Bester Schätzwert	$\hat{y}$	$8,72 \cdot 10^1$	$2,71 \cdot 10^6$
Standardunsicherheit zu $\hat{y}$	$u(\hat{y})$	$2,19 \cdot 10^1$	$2,3 \cdot 10^5$
Richtwert/Grenzwert ($y^\#$) ¹⁾	y_r	4 Bq/m ³ $\triangleq$ 300 Bq/s	
1) Nachweisgrenzenberechnung für hohe Aktivitätskonzentration nicht relevant			
2) für Cs-137 in 60 Minuten auf unbeladenem Filter			

Tabelle 3-10: Ergebnis und charakteristische Grenzen

3.4 Iodmonitor

Hinweis:

Grundlage dieser Betrachtungen sind die Anforderungen nach KTA 1503.1.

3.4.1 Beschreibung bzw. Aufgabe/Funktion

Die Abscheidung und Anreicherung von I-131 aus einem Teilvolumenstrom auf einem geeigneten Medium wird über einen NaI-Detektor gemessen. Die Messung erfolgt quasi-kontinuierlich, da innerhalb von zwei unmittelbar aufeinander folgenden Zeitintervallen die Nettopeakzählraten im Peak verglichen werden („Zwei-Fenster-Methode“).

3.4.2 Betrachtetes Messgerät

Detektor: NaI-Szintillationsdetektor

Messprinzip: Impulsmessung mit Abbruch nach vorgegebener Impulssumme bzw. Messdauer

Messgerät: Festfiltergerät, Nuklidspezifisch, 2-Fenstermethode

3.4.3 Allgemeine Betrachtung der relevanten Parameter

Die Aktivitätskonzentration y wird zunächst unter Vernachlässigung einer Peakdrift und Verwendung von $r_n = r_g - r_b$ über folgendes Modell bestimmt (siehe auch **Bild 3-1**):

$$y = (r_n - x \cdot r_{n,v}) \cdot w = (r_g - r_b - x \cdot (r_{g,v} - r_{b,v})) \cdot w$$

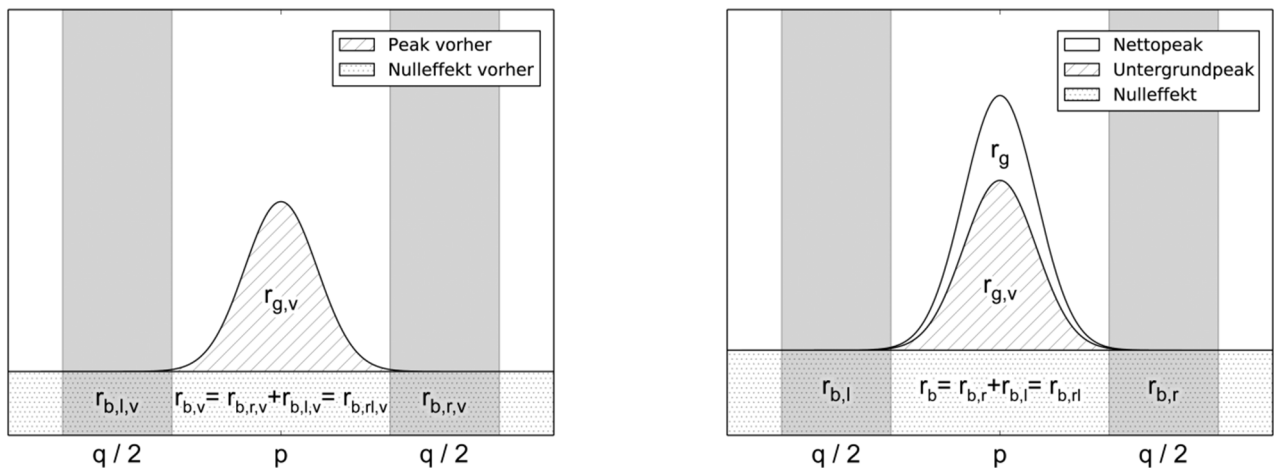


Bild 3-1: links: Skizzierter Untergrund und Nettopeakfläche im Zeitintervall $j - 1$ („vorher“) bei bereits stattfindender Ableitung (Peak im Iodfenster mit Zählrate $r_{g,v}$).

rechts: Skizzierter Untergrund und Nettopeakfläche im Zeitintervall j während einer Ableitung (Peak im Iodfenster mit Zählrate r_g)

Die Untergrundzählraten r_b und $r_{b,v}$ lassen sich über die beiden Untergrundfenster mit der jeweiligen Breite $q/2$ rechts und links des Peakfensters mit der Breite p abschätzen gemäß

$$r_b = \frac{p}{q} \cdot r_{b,rl}$$

Die Aktivitätsableitung wird bestimmt aus dem Anstieg der Nettopeakzählrate im Zeitintervall j gegenüber dem Zeitintervall $j - 1$ (bezeichnet in den Formeln mit dem Index v für „vorher“). Damit ergibt sich als Modell der Auswertung mit direkt bestimmbar messbaren Größen

$$y = \left[r_g - \frac{p}{q} \cdot r_{b,rl} - x \cdot \left(r_{g,v} - \frac{p}{q} \cdot r_{b,rl,v} \right) \right] \cdot w$$

Da der radioaktive Zerfall von I-131 eine um Größenordnungen längere Halbwertszeit als das maximale Zeitintervall der jeweiligen Messung besitzt, kann die Zerfallskorrektur als ($x = 1$) angesetzt sowie deren Unsicherheit ($u(x) = 0$) vernachlässigt werden.

Ist die Peaklage über längere Zeiträume („Energiekalibrierung“) nicht stabil, so kann ein Anteil λ der Peakfläche, $0 \leq \lambda \leq 1$, aus dem Peakfenster in die Untergrundfenster driften. Sofern unterstellt werden kann, dass die Drift nicht so groß ist, dass auch eine relevante Zählrate durch den Messeffekt jenseits der Untergrundfenster erfolgt, sowie dieser Drift nicht sprunghaft stattfindet, ergibt sich dadurch

$$r_n \rightarrow (1 - \lambda) \cdot r_n \quad \text{bzw.}$$

$$r_g = r_n + r_b \rightarrow (1 - \lambda) \cdot r_n + r_b = (1 - \lambda) \cdot (r_g - r_b) + r_b = (1 - \lambda) \cdot r_g + \lambda \cdot r_b$$

und
$$r_{b,rl} \rightarrow r_{b,rl} + \lambda \cdot r_n = r_{b,rl} + \lambda \cdot (r_g - r_b).$$

Wird dies auf das Modell der Auswertung angewendet und danach die Relation

$$r_b = \frac{p}{q} \cdot r_{b,rl}$$

verwendet, so ergibt sich

$$y = \left[(1 - \lambda) \cdot r_g + \lambda \cdot \frac{p}{q} \cdot r_{b,rl} - \frac{p}{q} \cdot \left(r_{b,rl} + \lambda \cdot \left(r_g - \frac{p}{q} \cdot r_{b,rl} \right) \right) - x \cdot \left((1 - \lambda) \cdot r_{g,v} + \lambda \cdot \frac{p}{q} \cdot r_{b,rl,v} - \frac{p}{q} \cdot \left(r_{b,rl,v} + \lambda \cdot \left(r_{g,v} - \frac{p}{q} \cdot r_{b,rl,v} \right) \right) \right) \right] \cdot w$$

$$= \left(r_g - \frac{p}{q} \cdot r_{b,rl} - x \cdot \left(r_{g,v} - \frac{p}{q} \cdot r_{b,rl,v} \right) \right) \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{p}{q} \right) \cdot \lambda \right) \cdot w$$

Der Faktor $1 - \left(1 + \frac{p}{q} \right) \cdot \lambda$ führt für $\lambda > 0$ zu einem zu geringen Messergebnis.

Werden die Fenster so gewählt, dass $p = q$ gilt, so vereinfacht sich der Faktor zu $1 - 2\lambda$. Für ein (theoretisches) $\lambda = 0$ ergibt sich dann das ursprüngliche Resultat, für $\lambda = 0,5$ würde im Erwartungswert Null gemessen und für $\lambda > 0,5$ ergeben sich sogar negative Resultate. Um korrekte Ergebnisse zu gewährleisten, muss der erweiterte Kalibrierfaktor gemäß

$$w \rightarrow \frac{w}{1 - \left(1 + \frac{p}{q} \right) \cdot \lambda}$$

transformiert werden. Für

$$\lambda = \frac{1}{1 + \frac{p}{q}} = 0,5$$

divergiert der neue Kalibrierfaktor erwartungsgemäß, da im Mittel keine Nettoimpulse und somit keine Information über die Aktivität vorhanden ist.

Es ergibt sich als Modell der Auswertung für eine Peakdrift λ bei unkorrigierten Zählraten r_g bzw. $r_{b,rl}$:

$$y = \left[r_g - \frac{p}{q} \cdot r_{b,rl} - x \cdot \left(r_{g,v} - \frac{p}{q} \cdot r_{b,rl,v} \right) \right] \cdot \frac{w}{1 - \left(1 + \frac{p}{q} \right) \cdot \lambda}$$

Zur Berechnung der charakteristischen Grenzen soll angenommen werden, dass

- $x = 1$ und $u(x) = 0$
- $p = q$ und $u(p) = u(q) = 0$
- $\lambda = 0$, aber $u(\lambda) > 0$

Mit $x = x_3 = 1$ ist nun das Standardmodell der Auswertung nach DIN ISO 11929 ($y = w (x_1 - x_2 \cdot x_3 - x_4)$) wiederzuerkennen:

$$y = (r_g - r_{b,rl} - (r_{g,v} - r_{b,rl,v})) \cdot w' \quad \text{mit} \quad w' = \frac{w}{1 - 2 \cdot \lambda}$$

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
y	Aktivitätsableitungsrate	Bq/h			A+B
t_g	Messdauer des Bruttoeffekts	s	240 bis 3600	0	
$t_{g,v}$	Messdauer des Bruttoeffekts, vorher'	s	240 bis 3600	0	
r_g	Bruttozählrate	1/s		$\sqrt{\frac{r_g}{t_g}}$ ¹⁾	A
$r_{g,v}$	Bruttozählrate der Messung ,vorher'	1/s		$\sqrt{\frac{r_{g,v}}{t_{g,v}}}$ ¹⁾	A
n_g	Anzahl Bruttoimpulse	-		$\sqrt{n_g}$ ¹⁾	A
$n_{g,v}$	Anzahl Bruttoimpulse der Messung ,vorher'	-		$\sqrt{n_{g,v}}$ ¹⁾	A
$r_{b,rl}$	Nulleffektzählrate	1/s		$\sqrt{\frac{r_b}{t}}$ ¹⁾	A
$r_{b,rl,v}$	Nulleffektzählrate der Messung ,vorher'	1/s		$\sqrt{\frac{r_{b,v}}{t_v}}$ ¹⁾	A
$n_{b,rl}$	Anzahl Nulleffektimpulse	-		$\sqrt{n_b}$ ¹⁾	A
$n_{b,rl,v}$	Anzahl Untergrundimpulse der Messung ,vorher'	-		$\sqrt{n_{b,v}}$ ¹⁾	A
p	Gesamtbreite des Peakfensters	keV oder Anzahl der Kanäle	75 keV	0	
q	Nettobreite der Untergrundfenster	keV oder Anzahl der Kanäle	75 keV	0	
x	Zerfallskorrekturfaktor, $0 \leq x \leq 1$	-	1	0	B
w	erweiterter Kalibrierfaktor siehe nachfolgende Berechnungen	Bq · s/h	berechnet: $9,45 \cdot 10^9$	berechnet: 11,19 %	B
λ	Peakdrift	-	0	0,025	B
¹⁾ bei 1000 Impulsen liegt die Messunsicherheit bei 3,2 % bei 10000 Impulsen liegt die Messunsicherheit bei 1 %					

Tabelle 3-11: Relevante Parameter zur Bestimmung der Aktivitätsableitungsrate mittels Iodmonitor

λ : Die Langzeitstabilität der Messeinrichtung liegt bei 4,7 % (5 Kalibrierüberprüfungen vierteljährlich, d. h. über 1,25 Jahre). Aufgrund des Vorfaktors $1 + p/q = 2$ von λ ist für $u(\lambda)$ alleine nur die halbe Langzeitstabilitätsunsicherheit von 0,0235 anzusetzen. Der Hersteller gibt eine typische Peakdrift von 1,6 Standardabweichungen (ca. 10 keV) an, was bei Fensterbreiten von $p = q = 75$ keV rechnerisch $u(\lambda) = 0,0265$ ergibt. Es wird der Mittelwert $u(\lambda) = 0,025$ aus beiden Betrachtungen verwendet.

Messdauer: Das System arbeitet mit einem gleitenden Mittelwert.

3.4.4 Spezielle Betrachtung der relevanten Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors

Der erweiterte Kalibrierfaktor w des Messplatzes wird über folgende Gleichung bestimmt:

$$w = \frac{a \cdot t_{\text{kal}} \cdot f_{\text{druck}}}{n_{\text{kal}} \cdot V_{\text{luft}}} V_{\text{kamin}}$$

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
a	Aktivität des Kalibrierpräparates	Bq	1350 ¹⁾	41 // 3 %	B
n_{kal}	Anzahl Nettoimpulse während der Kalibriermessung	-	108000 ¹⁾	328 // 0,3 %	A
t_{kal}	Messdauer der Kalibriermessung	s	3600	0	
V_{luft}	Luftdurchsatz pro Messung	m ³	0,001 m ³ /s Online gemessen	0,0001 // 10 %	B
f_{druck}	Faktor zum Luftdurchsatz	-	1	3 %	B
V_{kamin}	Fortluftvolumenstrom	m ³ /h	210000	10500 // 5 %	B
¹⁾ beispielhafte Werte					

Tabelle 3-12: Relevante Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors

V_{luft} : Der Wert wurde durch eine konservative Festlegung mit den obigen Einstellungen und Messunsicherheiten festgelegt. Zusätzliche Messungen erfolgen bei anstehenden Grenzwerten bzw. bestimmten Anteilen der Grenzwerte. Mit dem konstanten Durchsatzvolumenstrom v_{luft} in m³/s gilt $V_{\text{luft}} = v_{\text{luft}} \cdot t$, wobei t die Messdauer ist, welche für die Berechnung des erweiterten Kalibrierfaktors zu 3600 s angenommen wurde.

f_{druck} : Der „Unterdruck“ im Probenentnahmesystem liegt bei ca. 21 hPa $\pm$ 1 hPa. Der Absolutdruck liegt entsprechend bei 995 hPa (verhält sich analog zum äußeren Luftdruck. Daher ist die Schwankung im Probenentnahmesystem bei 995 hPa $\pm$ 1 hPa, d. h. die Unsicherheit liegt bei 0,2 % und ist vernachlässigbar. Die Durchsatzschwankungen durch die Probenentnahmepumpe des Monitors beträgt 3 %.

V_{kamin} : Die relative Unsicherheit auf den Fortluftvolumenstrom wurde nach KTA gewählt. Da dies zusammen mit V_{luft} die dominierende Unsicherheit ist, sollte im Einzelfall geprüft werden, ob die KTA-Vorgabe ausgeschöpft wird.

3.4.5 Nicht relevante Parameter der Modellannahmen und des erweiterten Kalibrierfaktors

Bei Filterwechsel ist der Detektor nach ca. 75 Minuten weitgehend bzw. nach 4 h quasi vollständig eingeschwungen. Die Amplitude des Einschwingverhaltens liegt deutlich unter 1,5 Bq/m³.

Die Messunsicherheiten der „nicht relevanten Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors“ sind vernachlässigbar.

Parameter	Bezeichnung	Typ	Bemerkung
	Gesamtverlustfaktor Probenentnahme (Rohrfaktor, Entnahmefaktor)	B	Nach KTA 1503.1 ist ein Gesamtverlustfaktor nur für die Bilanzierung von „an Schwebstoffen gebundene radioaktive Stoffe“ zu berücksichtigen und somit hier nicht relevant

Parameter	Bezeichnung	Typ	Bemerkung
	Zerfallskorrektur (aus Zeitdifferenz Probenentnahme → Messkammer)	B	Zeitdifferenz zwischen Probenentnahme und Messkammer ist sehr gering. Die Halbwertszeit ist deutlich größer, so dass der radioaktive Zerfall keine Rolle spielt
	Nuklidfaktor (Unterschied Kalibriernuklid / Messnuklid)	B	Es erfolgt eine nuklidspezifische Messung
	Faktor zur Selbstabsorption der Probe in der Messkammer	B	Eine Selbstabsorption innerhalb der Messkammer ist nahezu nicht möglich, da es sich um eine γ -Messung handelt
	Inhomogenität der Filterbeladung	B	Bei dem hier betrachteten Monitor ist die Filterbeladung so gleichmäßig, dass kein signifikanter Unterschied zu dem Kalibrierpräparat vorliegt.
	Rückhaltegrad der Filterpatrone		Bei dem hier betrachteten Modell ist aufgrund der Verweildauer der Abscheidegrad in guter Näherung gleich 1.
	Umgebungsbedingungen	B	Die Messbedingungen im Kaminmessraum bzw. im Probenentnahmesystem (T, rel. Luftfeuchte) sind als konstant anzusehen.
	Betriebsspannung	B	Die Betriebsspannung bzw. dessen Schwankungen haben keinen Einfluss auf die Messergebnisse

Tabelle 3-13: Nichtrelevante Parameter

3.4.6 Berechnungen

3.4.6.1 Eingangsgrößen

Als Eingangsgrößen werden die Anzahl der Brutto- und Untergrundzählraten sowohl von vor wie auch nach dem Messintervall verwendet (r_g , $r_{g,v}$, r_b , $r_{b,v}$). Die Messdauern t und t_v werden nach KTA 1503.1 Abschnitt 3.4.1 (2) auf 60 Minuten gesetzt.

Beispiel	Eingangsgröße	Wert	Einheit
KTA 1503.1, keine Beladung	r_g	1,51	1/s
	$r_{g,v}$	1,05	1/s
	$r_{b,rl}$	1,21	1/s
	$r_{b,rl,v}$	0,98	1/s

Tabelle 3-14: Beispielhafte Werte der Eingangsgrößen nach KTA 1503.1

3.4.6.2 Berechnungen der charakteristischen Größen

Folgende Parameter wurden verwendet und die zugehörigen Hilfsgrößen für das Beispiel „keine Beladung“ berechnet:

$$k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,645$$

$$\gamma = 0,05$$

$$\begin{aligned}
w &= \frac{a \cdot t_{\text{kal}} \cdot f_{\text{druck}}}{n_{\text{kal}} \cdot V_{\text{luft}}} v_{\text{kamin}} = \frac{1350 \text{ Bq} \cdot 3600 \text{ s} \cdot 1}{108000 \cdot 3,6 \text{ m}^3} 210000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 2,625 \cdot 10^6 \frac{\text{Bq} \cdot \text{s}}{\text{h}} \\
u_{\text{rel}}^2(w) &= u_{\text{rel}}^2(a) + u_{\text{rel}}^2(f_{\text{druck}}) + u_{\text{rel}}^2(v_{\text{kamin}}) + u_{\text{rel}}^2(n_{\text{kal}}) + u_{\text{rel}}^2(V_{\text{luft}}) = 0,1196^2 \\
w' &= \frac{w}{1-2\lambda} = \frac{w}{1-2 \cdot 0} = 2,625 \cdot 10^6 \frac{\text{Bq} \cdot \text{s}}{\text{h}} \\
u_{\text{rel}}^2(w') &= \left(\frac{u(w')}{w'} \right)^2 = \left(\frac{u(w)}{w} \right)^2 + \left(\frac{2 \cdot u(\lambda)}{1-2\lambda} \right)^2 = u_{\text{rel}}^2(w) + \frac{4 \cdot u^2(\lambda)}{(1-2 \cdot 0)^2} = 0,1296^2 \\
c_0 &= w'^2 \left(\frac{2r_{\text{b,rl}} + r_{\text{g,v}} - r_{\text{b,rl,v}}}{t} + \frac{r_{\text{g,v}} + r_{\text{b,rl,v}}}{t_v} \right) = 8,652 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{Bq}}{\text{h}} \right)^2 \\
c_1 &= \frac{w'}{t} = \frac{2,625 \cdot 10^6 \frac{\text{Bq} \cdot \text{s}}{\text{h}}}{3600 \text{ s}} = 7,292 \cdot 10^2 \frac{\text{Bq}}{\text{h}} \\
c_2 &= u_{\text{rel}}^2(w') = 1,680 \cdot 10^{-2} \\
\omega &= \phi[y / u(y)] = 1,000
\end{aligned}$$

Das Ergebnis der Modellgleichung einschließlich des erweiterten Kalibrierfaktors und den zugehörigen Unsicherheiten ist

$$\begin{aligned}
y &= (r_g - r_{\text{b,rl}} - (r_{\text{g,v}} - r_{\text{b,rl,v}})) \cdot w' = (1,51 - 1,21 - (1,05 - 0,98)) \frac{1}{\text{s}} \cdot 2,625 \cdot 10^6 \frac{\text{Bq} \cdot \text{s}}{\text{h}} = 6,04 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{h}} \\
u(y) &= \sqrt{c_0 + c_1 \cdot y + c_2 \cdot y^2} = 1,234 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{h}}
\end{aligned}$$

Damit ergeben sich insgesamt die folgende Erkennungs- und Nachweisgrenze:

$$\begin{aligned}
y^* &= k \sqrt{c_0} = 1,53 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{h}} \\
y^\# &= \frac{2y^* + k^2 c_1}{1 - k^2 c_2} = 3,226 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{h}}
\end{aligned}$$

In der KTA 1503.1 wird ein Richtwert von 2 Bq/m³ für einen zuvor unbeladenen Filter verlangt. Bei einem Kamin-durchsatz von 210000 m³/h entspricht dies einer Vorgabe von 4,2 · 10⁵ Bq/h an die zu erreichende Nachweisgrenze. Der erzielte Wert von 3,21 · 10⁵ Bq/h liegt unter dieser Vorgabe, das Messverfahren ist somit geeignet.

Die Berechnung der oberen Vertrauensgrenze (vgl. Abschnitt 2.4.2) und des Besten Schätzwertes einschließlich der zugehörigen Unsicherheit ist

$$y^\triangleright = y + k_{1-\omega/2} u(y) = 6,04 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{h}} + k_{0,975} \cdot 1,234 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{h}} = 8,46 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq}}{\text{h}}$$

3.5 Gamma-Spektrometrie-Detektor

3.5.1 Allgemeines

(1) In diesem Abschnitt wird die Auswertung von Proben mittels Gammaskpektrometrie im Labor zur Bestimmung der Ableitungen aus einer kerntechnischen Anlage über die Fortluft beschrieben (Bilanzierung nach KTA 1503.1). Gammaskpektrometrische Auswertungen zur retrospektiven Abschätzung der Raumlufaktivitätskonzentration (KTA 1502) oder der Ableitungen mit dem Abwasser (KTA 1504) können sinngemäß behandelt werden.

(2) Die EU-Empfehlung zu standardisierten Informationen über Ableitungen [15] legt Schlüsselnuklide fest, für die konkrete Nachweisgrenzen angegeben werden. Mit der Neufassung der KTA 1503.1 sind diese vorgeschriebenen Nachweisgrenzen vollständig übernommen worden. Für schwebstoffgebundene Ableitungen sind diese Radionuklide neben Am-241 (5 mBq/m³) und Sr-90 (20 mBq/m³) im vorliegenden Fall die Nachweisgrenzen für Co-60 (10 mBq/m³) und Cs-137 (30 mBq/m³) relevant. Für Iodisotope ist das Radionuklid I-131 (20 mBq/m³) maßgeblich.

(3) Der Haupttext der DIN ISO 11929 trifft keine Festlegungen, die spezifisch auf die Auswertung gammaskpektrometrischer Messungen anzuwenden wären. Im Anhang C der DIN ISO 11929 wird die „Anwendung auf zählende spektrometrische Messungen“ – also die Gammaskpektrometrie – normativ geregelt. Dieser Anhang regelt detailliert die Auswertung einzelner Energielinien bspw. in Bezug auf die Festlegung des Untergrundes, der Durchführung von Ausgleichsrechnungen oder der Entfaltung von Spektren. Die genannten Anforderungen werden durch derzeit kommerziell verfügbare Softwarepakete zur Auswertung gammaskpektrometrischer Messungen nicht umgesetzt. Es sind aber Softwarepakete kommerziell verfügbar, die zur Auswertung gammaskpektrometrischer Messungen in der Anwendung der KTA 150x geeignet sind, um hinreichend genaue Ergebnisse zu erzielen.

(4) Die bereits in Abschnitt 2.3 genannten anwendungsorientierten technischen Normen [8] und [9] treffen hinsichtlich der Ermittlung der Impulszahlen der Nettopeakfläche und des Untergrundes sowie der zugehörigen Unsicherheiten weniger detaillierte Anforderungen. Bei der Auswertung einzelner Energielinien, die keiner Interferenzkorrektur oder der Korrektur aufgrund von Nettopeakflächen in Nulleffektspektren bedürfen, wie dies bei Cs-137 oder I-131 häufig der Fall ist, kann ein Verfahren in Anlehnung an Abschnitt 3.4 durchgeführt werden.

Hinweis:

Im o. g. Fall ist $\lambda = u(\lambda) = r_{g,v} = 0$ zu setzen. Über $r_{g,v} > 0$ könnte eine störende Einstrahlung oder eine geringfügige Restkontamination der Messeinrichtung durch das zu bestimmende Radionuklid berücksichtigt werden.

(5) Unter Bezugnahme auf die DIN ISO 11929 wurde im Abschnitt 2 dem Modell der Auswertung die folgende allgemeine Form gegeben:

$$y = F(x_1, \dots, x_n) = (x_1 - x_2 x_3 - x_4) \prod_{i=5}^n x_i \quad (\text{vgl. 2-2})$$

Vor der Konkretisierung ist es unabdingbar, das allgemeine Modell der Auswertung hinsichtlich der anzusetzenden Eingangsgrößen x_i zu definieren. Dies erfolgt derzeit nicht in eindeutiger Art und Weise im Regelwerk.

Hinweise:

(1) Die Eingangsgrößen x_i ($i > 4$) bilden den erweiterten Kalibrierfaktor w und werden später in diesem Abschnitt konkretisiert. Die DIN ISO 11929 legt x_1 für den Bruttomesseffekt (vgl. Abschnitt 5.2.2 der DIN ISO 11929: „Zählrate des Bruttomesseffektes“) fest – im Anhang C der DIN ISO 11929 sind die Messgröße Impulszahlen ($y = n_g - z_0$, vgl. dort Gleichung (C.4)) – der Untergrund unter der Nettopeakfläche ist x_2 (oder z_0). Im Abschnitt 6.1 des Beiblattes 1 zur DIN ISO 11929 („Gammaskpektrometrische Auswertung einer Bodenprobe auf Cäsium-137“; [16]) erfolgt dies analog. In Abschnitt 6.2 von [16] wird hiervon bereits abgewichen.

(2) In [6] werden – ebenso wie in den anwendungsorientierten technischen Regeln [7], [8] und [9] – die Größen x_1 und x_2 als Nettopeakflächen der zu messenden Energielinie (x_1) und einer weiteren Energielinie (x_2) eines anderen Radionuklids, welches eine weitere Energielinie besitzt, die bei der Energie der Linie (x_1) interferiert (vgl. hierzu auch Herleitung des Modells der Auswertung im Abschnitt 3.4 dieses Berichtes). Der Vorteil des Ansatzes nach [6] bis [9] ist, dass damit erst die Möglichkeit besteht, Interferenzkorrekturterme (x_3) oder Beiträge zur Nettopeakfläche (x_4) bei Nulleffektmessungen in analoger Art und Weise wie zählenden Messverfahren in das Modell der Auswertung implementieren zu können. In diesem Zusammenhang ist ebenfalls die praktizierte Vorgehensweise, vor der Auswertung eines Messspektrums ein Nulleffektspektrum (kanalweise) in geeigneter Form in Abzug zu bringen, auf Eignung zu beurteilen.

(6) Die DIN ISO 11929 trifft ebenso wie die anderen in diesem Bericht genannten technischen Regeln zur Gammaskpektrometrie keine Aussagen zur Auswertung mehrerer Energielinien eines Radionuklids. Andererseits können häufig in kommerziell erhältlichen Softwarepaketen zur Gammaskpektrometrie nuklidspezifische Aktivitäten aus den über die *energielinien*spezifischen Unsicherheiten gewichteten Mittelwerten der *energielinien*spezifischen Aktivitäten errechnet werden. Erkennungs- und Nachweisgrenzen können häufig aus den *energielinien*spezifischen Minimalwerten abgeleitet werden. Letzteres stellt konservative Obergrenzen der tatsächlichen charakteristischen Grenzen zur Verfügung und kann daher als zulässig angesehen werden. Bei der Ermittlung nuklidspezifischer Aktivitäten ist festzuhalten, dass die Einführung von Typ-B-Messunsicherheiten bei den einzelnen Energielinien, auftretenden Korrelationen zwischen Eingangsgrößen der einzelnen Energielinien, sowie die ungeklärte Methodik der Berechnung der

besten Schätzwerte aus mehreren Energielinien eines Radionuklids keine abschließende Darstellung der Auswertung mehrerer Energielinien eines Radionuklids zulassen.

(7) Im Folgenden wird die Detektoreffizienz als die – in der Laborgammaspektrometrie üblicherweise – dimensionslose Größe verstanden, die dem Wert der Effizienzkurve an der jeweiligen Energie entspricht. Es handelt sich somit um den Kehrwert des erweiterten Kalibrierfaktors w nach DIN ISO 11929 und dessen Unsicherheit und nicht um die Detektoreffizienz entsprechend den Detektorspezifikationen.

3.5.2 Beschreibung bzw. Aufgabe/Funktion

Die Aufgabe ist die Bilanzierung der Ableitung mit Hilfe gammaspektrometrischer Messungen. Hierbei können sowohl Messungen an Sammelproben als auch kontinuierliche Messungen erforderlich sein. Zu den Aufgaben der Messung von Sammelproben gehört z. B. die Bestimmung der innerhalb eines Zeitraums an Schwebstoff- bzw. Iodfiltern abgeschiedenen radioaktiven Stoffe. Weitere Messaufgaben sind die Auswertung von über einen definierten Zeitraum gesammeltem Medium wie z. B. Edelgase in einer Druckgasflasche oder von Wasserproben in z. B. einer 1 l Kautexflasche. Ferner werden ggf. kontinuierliche Messungen an einer mit z. B. von Edelgas durchströmen Messkammer durchgeführt.

Anschließend wird aus der gemessenen Aktivitätskonzentration multipliziert mit dem im Bilanzierungszeitraum abgegebenen Volumen (Fortluftvolumen am Kamin bzw. Volumen Abgabebehälter) die abgeleitete Aktivitätskonzentration bilanziert.

3.5.3 Betrachtetes Messgerät

Messprinzip: Germaniumdetektor mit Vielkanalanalysator und geeigneter Software, die auch Typ-B-Unsicherheiten berücksichtigt.

Dabei wird vorausgesetzt, dass Unsicherheiten durch Peakinterferenzen durch geeignete Peakbibliotheken vernachlässigt werden können. Die Energiedrift des Messsystems spielt in der Praxis keine Rolle.

3.5.4 Allgemeine Betrachtung der relevanten Parameter

Die Aktivität a_s (Einzellinie mit Untergrundabzug) wird über folgendes Modell bestimmt:

$$a_s = \left(\frac{n_n}{t_n} \right) \cdot w = r_n \cdot w$$

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
t_n	Messdauer der Probenmessung	s	festzulegen in Abhängigkeit der erforderlichen NWG		-
n_n	Nettopeakfläche	-			A
r_n	Nettozählrate	s ⁻¹			A
n_0	Nettopeakfläche Untergrund	-			A

Tabelle 3-15: Relevante Parameter bei der Gammaspektrometrie

3.5.5 Spezielle Betrachtung der relevanten Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors

Der erweiterte Kalibrierfaktor w des Messplatzes wird über folgende Gleichung bestimmt:

Der erweiterte Kalibrierfaktor w enthält neben der Probenmenge m (z. B. Masse, Volumen oder Fläche) die Detektoreffizienz η .

$$w = \frac{1}{\eta \cdot \rho \cdot m \cdot x_5}$$

Die Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors werden direkt in der Software erfasst oder man ermittelt die Detektoreffizienz manuell. Die Detektoreffizienz η der Einzellinie wird mit einem gleichen Radionuklid aus einer zertifizierten Standardlösung bestimmt.

$$\eta = \frac{n_t}{t_t \cdot A_t}$$

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
η	Detektoreffizienz	-	aus Kalibrierung	aus Kalibrierung	A+B
t_t	Messdauer der Standardmessung	s	festzulegen in Abhängigkeit der erforderlichen NWG		-
A_t	Aktivität des Standardnuklids	Bq			A+B
n_t	Nettopeakfläche des Standardnuklids	-			A
ρ	Emissionswahrscheinlichkeit	-	aus Literatur (z. B. PTB-Bericht)	aus Literatur (z. B. PTB-Bericht)	B
x_5	Unsicherheit des Aktivitätseintrags während der Bestaubungsdauer	-	gleichmäßige Bestaubung	bei I-131 ± 17 %, nuklidabhängig	B
m	Probenmenge (Masse oder Volumen)	kg bzw. m ³		¹⁾ Unsicherheit des Luftdurchsatzes + Wägeunsicherheit	B
$x_7^{3)}$	Dichte ²⁾	g/cm ³		¹⁾	B
$x_8^{3)}$	räumliche Verteilung der Aktivität ²⁾ (Homogenität)	-		¹⁾ entfällt bei Proben auf Basis Kalibriergeometrie	B
$x_9^{3)}$	Kaskadenzerfälle (Summationseffekte)	-		0 ⁴⁾	B
$x_{10}^{3)}$	Gesamtverlustfaktor	-	aus WKP	aus WKP	B
f	Fortluftvolumen/Abwassermenge	m ³		anlagenspezifisch	B

Tabelle 3-16: Relevante Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors

3.5.6 Nicht relevante Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors

Die Messunsicherheiten der „nicht relevanten Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors“ sind vernachlässigbar.

Parameter	Bezeichnung	Typ	Bemerkung
	Probenpositionierung	B	kann bei geeigneter Probenhalterung vernachlässigt werden
	Stoffliche Zusammensetzung ²⁾	B	¹⁾ entfällt bei Proben auf Basis v. Kalibriergeometrie
	Effizienzveränderung/Langzeitstabilität	B	im Allgemeinen vernachlässigbar, wird im Rahmen der WKP kontrolliert
	Filterwirkungsgrad/Absorptionsfaktor	B	Aufgrund des Filteraufbaus kann in guter Näherung von einer vollständigen Rückhaltung der Aktivität ausgegangen werden.

Tabelle 3-17: Nichtrelevante Parameter

- ¹⁾ Die Unsicherheit, die sich aus der Abweichung zwischen Probe und Kalibrierstandard/Kalibrierung ergibt, kann durch organisatorische Maßnahmen begrenzt werden. Die Summe dieser Unsicherheiten sollte kleiner einem vorgegebenen Wert von zwischen 10 und 20 % liegen, z. B.:
 - a) Vorgaben an Probenahme, Probenaufbereitung und Homogenität
 - b) vorgegebene Probengeometrie stimmt mit Kalibriergeometrie überein
 - c) vorgegebene Probengeometrie ist mit konservativer Kalibriergeometrie durchzuführen
 - d) Erstellung einer neuen Kalibriergeometrie
 - e) Einteilung in Geometrieklassen (Dichte, Füllgrad, Materialart,..) einer Klassengröße, mit der die Einhaltung der vorgegebenen Unsicherheit gewährleistet ist
- ²⁾ Unterschiede zwischen tatsächlicher Probe und Kalibrierstandard/Kalibrierung
- ³⁾ x_7 bis x_{10} kann als kombinierte Messunsicherheit in die Software eingegeben werden, dabei sind die Größen als unkorreliert zu betrachten.
- ⁴⁾ Die Summationseffekte bei Kaskadenzerfällen können über die jeweilige Software, die zugehörigen Unsicherheiten bei Bedarf durch konservative Festlegung der Korrekturfaktoren berücksichtigt werden.

3.6 Kohlenstoff-14 und Tritium in der Fortluft kerntechnischer Anlagen

Hinweis:

Grundlage dieser Betrachtungen sind die Anforderungen nach KTA 1503.1.

3.6.1 Verfahrensbeschreibung

3.6.1.1 Probenentnahme von Kohlenstoff-14 und Tritium

(1) C-14 wird als Kohlenstoffdioxid gemeinsam mit Tritium als Wasserdampf aus einem Teilstrom der Fortluft von kerntechnischen Anlagen von einem festen Sorptionsmedium (Molekularsieb) kontinuierlich aufgenommen. Im Teilstrom vorliegende organische Verbindungen werden durch Oxidation (im Katalysatorofen) in Kohlenstoffdioxid umgewandelt, die in Praxis in Form einer automatisierten Sammeleinrichtung untergebracht ist. Während eines dreimonatigen Probenentnahmezeitraumes wird ein Teilluftstrom (ca. 0,14 l/s) mit einem Volumen von 1 bis 2 Kubikmetern durch das Absorptionsmittel geleitet.

(2) Die anzuwendenden Messanleitungen [17, 18] gewährleisten bei üblicher relativer Luftfeuchte von 40 % bis 70 %, dass das gesammelte Kohlenstoffdioxid nicht durch das ebenfalls absorbierte Wasser verdrängt wird. Ferner ist bei einer Beladung von max. 15 g Wasser pro 100 g Molekularsieb experimentell nach [19] sichergestellt, dass genug Reservekapazität für das Kohlenstoffdioxid zur Verfügung steht und die Wiederfindung (chemische Ausbeute) bei einer thermischen Desorption nahezu bei $(99 \pm 5) \%$ liegt. Für die Messunsicherheit der Volumenbestimmung gibt der Hersteller einer solchen Sammeleinrichtung eine Förderungenauigkeit von 3 % an. Aufgrund einer volumetrischen Arbeitsweise sind außerdem Messunsicherheiten aufgrund der unterschiedlichen Luftdichten möglich (bei maximal festgestellten 5 K ca. 1,7 %).

3.6.1.2 Probenvorbereitung und chemische Trennung

Das absorbierte Kohlenstoffdioxid und Wasser wird aus dem Molekularsieb bei ca. 370°C mit Stickstoffgas ausgetrieben. Kohlenstoffdioxid wird über eine Gaswaschflasche geleitet und in Natronlaugenlösung als Natriumcarbonat absorbiert. Das Wasser (Tritium) wird als ausgetriebener Wasserdampf in einem Kugelhühler kondensiert und somit vom C-14 abgetrennt.

3.6.1.3 Messung von Kohlenstoff-14 nach [17]

Der absorbierte Kohlenstoff wird mit Bariumchlorid als Bariumcarbonat gefällt und getrocknet. 1 g des im Mörser zerriebenen Bariumcarbonates wird mit Szintillatorlösung versetzt und nach Abklingen der Chemolumineszenz im Dunkeln und Kühlen in einem Flüssigszintillationsmessgerät gemessen. Das Nachweisvermögen wird mit einem Standard mit bekannter spezifischer Aktivität bestimmt. Die geforderte Nachweisgrenze von $10^9 \text{ Bq } ^{14}\text{CO}_2$ pro Vierteljahr wird mit diesem Verfahren deutlich unterschritten.

3.6.1.4 Messung von Tritium nach [18]

Ein Aliquot des Destillats wird in einem Zählfläschchen mit Szintillatorlösung gemischt und nach Abklingen der Chemolumineszenz im Kühlen und Dunkeln mit einem Flüssigszintillationsmessgerät gemessen. Das Nachweisvermögen wird mit durch Standardaddition mit bekannter spezifischer Aktivität bestimmt.

3.6.2 Betrachtetes Messgerät

Flüssigszintillationszähler

3.6.3 Allgemeine Betrachtung der relevanten Parameter

Die beispielhaften Angaben beziehen sich nur auf Kohlenstoff-14. Die Berechnung der Tritium-Analyse erfolgt analog dargestellter Kohlenstoff-14 Berechnung.

Die abgeleitete Aktivität von Kohlenstoff-14 wird über folgende Modellgleichung berechnet:

$$y = (r_g - r_0 \cdot x_3 - x_4) \cdot w = \left(\frac{n_g}{t_g} - \frac{n_0}{t_0} \cdot x_3 - x_4 \right) \cdot w = \left(\frac{n_g}{t_g} - \frac{n_0}{t_0} \right) \cdot w$$

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
y	Aktivität	Bq			A+B
r_g	Bruttozählrate	1/s	26,3	$\sqrt{\frac{r_g}{t_g}}$	A
r_0	Nulleffektzählrate	1/s	0,122	$\sqrt{\frac{r_0}{t_0}}$	A
w	erweiterter Kalibrierfaktor siehe nachfolgende Berechnungen	Bq s	$8,3 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^8$ (7 %)	B
n_g	Anzahl Bruttoimpulse	-	17366	$\sqrt{n_g}$	A
n_0	Anzahl Nulleffekt Impulse	-	440	$\sqrt{n_0}$	A
t_g	Messdauer des Bruttoeffekts	s	660	-	-
t_0	Messdauer des Nulleffekts	s	3600	-	-

Tabelle 3-18: Relevante Parameter zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration von C-14

3.6.4 Spezielle Betrachtung der relevanten Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors

Der erweiterte Kalibrierfaktor w des Messplatzes wird über folgende Gleichungen bestimmt:

$$w = \frac{f}{x_5 \cdot x_6 \cdot x_7}$$

mit

$$x_5 = \frac{m_{BE} \cdot m_{ME}}{m_{BG} \cdot m_{MG}} \cdot V, \quad x_6 = \frac{\left(\frac{n_{St}}{t_{St}} - \frac{n_0}{t_0} \right)}{y_{St} \cdot m_{St}} = \frac{(r_{St} - r_0)}{y_{St} \cdot m_{St}}$$

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
x_5	Faktor für Analysenaliquote	m ³	0,27	0,01 (3,7 %)	A+B
x_6	Zählausbeute	1/(Bq s)	0,68	0,01 (1,6 %)	A+B
x_7	mittlere chemische Ausbeute		0,99	0,06 (6,0 %)	B
V	Luftvolumen	m ³	1,28	0,04 (3,5 %)	B
f	Fortluft	m ³	$1,50 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^7$ (5 %)	B
m_{MG}	Masse Molsieb (gesamt)	g	345,6	0,1	B
m_{ME}	Masse Molsieb (Analyse)	g	172,55	0,10	B
m_{BG}	Masse Endpräparat (gesamt)	g	2,37	0,01	B
m_{BE}	Masse Endpräparat (LSC)	g	1,00	0,01	B
r_{St}	Bruttozählrate Standard	1/s	15,26	$\sqrt{\frac{r_{St}}{t_{St}}}$	A

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
n_{St}	Anzahl Standard Impulse	-	17394	$\sqrt{n_0}$	A
t_{St}	Messdauer (Standard)	s	1140	-	-
m_{St}	Masse Standardlösung	g	1,000	0,01	B
y_{St}	spez. Aktivität (Standard)	Bq/g	22,3	0,3	A+B

Tabelle 3-19: Relevante Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors

f. Der Fortluftvolumenstrom wird gemessen. Nach KTA 1503.1 darf die Messunsicherheit des Volumenstromes 5 % des Nennvolumenstromes betragen.

V. Das entnommene Probenvolumen enthält eine kombinierte Messunsicherheit von $u(V) = \sqrt{3^2 + 1,7^2} \% = 3,5 \%$, siehe dazu Verfahrensbeschreibung.

3.6.5 Nicht relevante Parameter der Modellannahmen und des erweiterten Kalibrierfaktors

Die Messunsicherheiten der nicht relevanten Parametern der Modellannahmen und des erweiterten Kalibrierfaktors sind vernachlässigbar.

Parameter	Bezeichnung	Typ	Bemerkung
	x_3 („Abschirmfaktor“) x_4 („Untergrundkorrekturfaktor“)	B	Der Nulleffekt wird regelmäßig bestimmt und als Parameter eingegeben. Zusätzliche Korrekturparameter sind daher nicht nötig. Die Messbedingungen im Messraum sind konstant.
	Gesamtverlustfaktor Probenentnahme (Rohrfaktor, Entnahmefaktor)	B	Nach KTA 1503.1 ist ein Gesamtverlustfaktor nur für die Bilanzierung von „an Schwebstoffen gebundene radioaktive Stoffe“ zu berücksichtigen und somit hier nicht relevant.
	Zerfallskorrektur (aus Zeitdifferenz Probenentnahme => Messung)	B	Zeitdifferenz zwischen Probenentnahme und der Messung ist vernachlässigbar.
	Umgebungsbedingungen	B	Die Messbedingungen im Messraum (T, rel. Luftfeuchte) sind im Rahmen der Vorgaben der KTA als konstant anzusehen.
	Quenchkorrektur	B	Entfällt aufgrund Kalibrierung mit einem identisch hergestelltem Standardmesspräparat
	Korrelationsfaktor Untergrundmessung	A	Entfällt, da kein signifikanter Beitrag zur kombinierten Messunsicherheit
	Lumineszenzkorrektur	A+B	Entfällt aufgrund Kalibrierung mit einem identisch hergestelltem Standardmesspräparat

Tabelle 3-20: Nicht relevante Parameter

3.6.6 Ergebnis der Modellgleichung

Ergebnis der Modellgleichung und der zugehörigen Messunsicherheit lautet:

$$y = (r_g - r_0) \cdot w = \left(\frac{n_g}{t_g} - \frac{n_0}{t_0} \right) \cdot w = \left(\frac{17366}{660 \text{ s}} - \frac{440}{3600 \text{ s}} \right) \cdot 8,26 \cdot 10^9 \text{ Bq s} = 2,16 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$$

mit dem erweiterten Kalibrierfaktor

$$w = \frac{f}{x_5 \cdot x_6 \cdot x_7} = \frac{1,50 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{Bq s}}{0,2697 \text{ m}^3 \cdot 0,68 \cdot 0,99} = 8,26 \cdot 10^9 \text{ Bq s}.$$

mit

$$x_5 = \frac{m_{BE} \cdot m_{ME}}{m_{BG} \cdot m_{MG}} \cdot V = \frac{1,000 \text{ g} \cdot 172,6 \text{ g}}{2,37 \text{ g} \cdot 345,6 \text{ g}} \cdot 1,28 \text{ m}^3 = 0,2697 \text{ m}^3,$$

$$x_6 = \frac{\left(\frac{n_{St}}{t_{St}} - \frac{n_0}{t_0} \right)}{y_{St} \cdot m_{St}} = \frac{(r_{St} - r_0)}{y_{St} \cdot m_{St}} = \frac{\left(\frac{17394}{1140 \text{ s}} - \frac{440}{3600 \text{ s}} \right) \text{ g}}{22,3 \text{ Bq} \cdot 1,0 \text{ g}} = 0,68 \frac{1}{\text{Bq s}}$$

Die zugehörige Unsicherheit errechnet sich mittels nächster Formel

$$u(y) = \sqrt{w^2 \left[\frac{n_g}{t_g^2} + \frac{x_3^2 n_0}{t_0^2} + \left(\frac{n_0}{t_0} \right)^2 u^2(x_3) + u^2(x_4) \right] + y^2 u_{\text{rel}}^2(w)}$$

$$u(y) = \sqrt{(8,26 \cdot 10^9 \text{ Bq s})^2 \cdot \left[\frac{17366}{(660 \text{ s})^2} + \frac{1^2 \cdot 440}{(3600 \text{ s})^2} + \left(\frac{440}{3600 \text{ s}} \right)^2 \cdot 0 + 0 \right] + (2,16 \cdot 10^{11} \text{ Bq})^2 \cdot (0,088)^2}$$

$$u(y) = 1,91 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

mit

$$u(w) = w \sqrt{\sum_i \frac{u^2(x_i)}{x_i^2}} = w \sqrt{\left(\frac{u(f)}{f} \right)^2 + \left(\frac{u(x_5)}{x_5} \right)^2 + \left(\frac{u(x_6)}{x_6} \right)^2 + \left(\frac{u(x_7)}{x_7} \right)^2}$$

$$u(w) = 8,26 \cdot 10^9 \text{ Bq s} \sqrt{\left(\frac{7,5 \cdot 10^7 \text{ m}^3}{1,50 \cdot 10^9 \text{ m}^3} \right)^2 + \left(\frac{0,01 \text{ m}^3}{0,27 \text{ m}^3} \right)^2 + \left(\frac{0,01 \text{ Bq s}}{0,68 \text{ Bq s}} \right)^2 + \left(\frac{0,06}{0,99} \right)^2}$$

$$u(w) = 7,28 \cdot 10^8 \text{ Bq s}$$

$$u_{\text{rel}}(w) = \frac{u(w)}{w} = \frac{7,28 \cdot 10^8 \text{ Bq s}}{8,26 \cdot 10^9 \text{ Bq s}} = 0,088 = 8,8\%$$

3.6.7 Berechnungen der charakteristischen Größen

Für $\alpha = \beta = 0,05$ erhält man das Quantil $k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,645$ der standardisierten Normalverteilung. Damit ergibt sich eine Erkennungsgrenze für die Aktivität von

$$y^* = k \cdot \sqrt{c_0}$$

$$c_0 = w^2 \left[x_3 \frac{n_0}{t_0} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{x_3}{t_0} \right) + \left(\frac{n_0}{t_0} \right)^2 u^2(x_3) \right]$$

$$y^* = 1,645 \cdot \sqrt{(8,26 \cdot 10^9 \text{ Bq s})^2 \cdot \left[1 \cdot \frac{440}{3600 \text{ s}} \left(\frac{1}{660 \text{ s}} + \frac{1}{3600 \text{ s}} \right) + \left(\frac{440}{3600 \text{ s}} \right)^2 \cdot 0 \right]} = 2,0 \cdot 10^8 \text{ Bq}$$

Die Nachweisgrenze wird mit folgender quadratischer Gleichung berechnet:

$$y^\# = \frac{2 \cdot y^* + k^2 \cdot c_1}{1 - k^2 \cdot c_2} = \frac{2 \cdot 2,0 \cdot 10^8 \text{ Bq} + (1,645)^2 \cdot 1,25 \cdot 10^7 \text{ Bq}}{1 - (1,645)^2 \cdot 0,0078} = \frac{2,81 \cdot 10^8 \text{ Bq}}{0,98} = 4,46 \cdot 10^8 \text{ Bq}$$

$$c_1 = \frac{w}{t_g} = \frac{8,26 \cdot 10^9 \text{ Bq s}}{660 \text{ s}} = 1,25 \cdot 10^7 \text{ Bq}$$

$$c_2 = u_{\text{rel}}^2(w) = \left(\frac{u(w)}{w} \right)^2 = \left(\frac{7,28 \cdot 10^8 \text{ Bq s}}{8,26 \cdot 10^9 \text{ Bq s}} \right)^2 = (0,088)^2 = 0,0078$$

Die Berechnung des besten Schätzers $\hat{y}$ ergibt

$$\phi[y / u(y)] = \left(\frac{2,16 \cdot 10^{11}}{1,91 \cdot 10^{10}} \right) = 11,30 \equiv \omega = 1$$

$$\hat{y} = y + \frac{u(y) \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot u^2(y)}\right)}{\omega \cdot \sqrt{2\pi}} = 2,16 \cdot 10^{11} + \frac{3,1 \cdot 10^{10} \text{ Bq} \cdot \exp\left(-\frac{(2,16 \cdot 10^{11} \text{ Bq})^2}{2 \cdot (1,91 \cdot 10^{10} \text{ Bq})^2}\right)}{1 \cdot \sqrt{2 \cdot 3,14}} = 2,16 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$$

$$u(\hat{y}) = \sqrt{u^2(y) - \hat{y}(\hat{y} - y)} = \sqrt{(1,91 \cdot 10^{10} \text{ Bq})^2 - 2,16 \cdot 10^{11} \text{ Bq} \cdot (2,16 \cdot 10^{11} \text{ Bq} - 2,16 \cdot 10^{11} \text{ Bq})}$$

$$u(\hat{y}) = 1,91 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Bei der Berechnung der oberen Vertrauensgrenze $y^\triangleright$ beträgt das Quantil $k_p = 0,05$ ($\gamma = 0,05$);

$$y^\triangleright = y + k_q u(y) = 2,54 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$$

3.6.8 Dokumentation

Probenentnahme und Messung von $^{14}\text{CO}_2$ in vierteljährig entnommener Molekularsiebprobe aus der Fortluft eines Kernkraftwerkes

Die Auswertung erfolgte nach DIN ISO 11929.

Gesamtergebnis		
	$k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,645$ $\gamma = 0,05$	
		Bq
Primäres Messergebnis	y	$2,16 \cdot 10^{11}$
Standardunsicherheit zu y	$u(y)$	$1,91 \cdot 10^{10}$
Erkennungsgrenze	y^*	$2,00 \cdot 10^8$
Messeffekt erkannt?	$y > y^* ?$	Ja
Nachweisgrenze	$y^\#$	$4,46 \cdot 10^8$
Messverfahren für Messzweck geeignet?	$y^\# \leq y_r ?$	Ja
Oberer Vertrauensgrenze	$y^>$	$2,54 \cdot 10^{11}$
Bester Schätzwert	$\hat{y}$	$2,16 \cdot 10^{11}$
Standardunsicherheit zu $\hat{y}$	$u(\hat{y})$	$1,91 \cdot 10^{10}$
Nachweisgrenze nach KTA ($y^\#$)	y_r	$1,00 \cdot 10^9$

Tabelle 3-21: Ergebnis und charakteristische Grenzen

3.7 Tritium im Abwasser kerntechnischer Anlagen

Hinweis:

Grundlage dieser Betrachtungen sind die Anforderungen nach KTA 1504.

3.7.1 Verfahrensbeschreibung

Die beschriebene Methode ist in Anlehnung an [20] und ist zur Bestimmung von Tritium in Abwasserproben beliebiger Zusammensetzung geeignet. Das Tritium muss als HTO vorliegen und vor der Messung von allen anderen Betastrahlern abgetrennt werden. Das Probenwasser wird mit Rückhalteträgern versehen und mit einer Festphasenextraktionssäule von Aktivierungsprodukten (z. B. Fe-55, Ni-63) gereinigt und bei weiterer Verunreinigung mit flüchtigen Radionukliden (z. B. S-35, I-131) aus alkalischer Lösung destilliert. Die Anreicherung mit HTO während der Destillation aufgrund des Isotopentrennfaktors wurde mit der Einführung des Faktors x_2 berücksichtigt. Die geforderte Nachweisgrenze nach KTA liegt bei $4 \cdot 10^4$ Bq/m³.

Das folgende Verfahren berücksichtigt die Korrelation zwischen zwei Eingangsgrößen. Die gemessene Bruttozählrate geht sowohl in die Berechnung der Nettozählrate als auch der Zählkreisbeute ein.

3.7.2 Betrachtetes Messgerät

Flüssigszintillationszähler

3.7.3 Allgemeine Betrachtung der relevanten Parameter

Die Aktivitätskonzentration von Tritium wird über folgende Modellgleichung berechnet:

$$y = \left(\frac{n_g}{t_g} - \frac{n_0}{t_0} \right) \cdot w = (r_g - r_0) \cdot w = r_n \cdot w$$

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
y	Aktivitätskonzentration	Bq/m ³			A+B
r_g	Bruttozählrate	1/s	0,149	$\sqrt{\frac{r_g}{t_g}}$	A
r_0	Nulleffektzählrate	1/s	0,047	$\sqrt{\frac{r_0}{t_0}}$	A
w	erweiterter Kalibrierfaktor siehe nachfolgende Berechnungen	Bq · s/m ³	$6,3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^4$ (6,3 %)	B
n_g	Anzahl Bruttoimpulse	-	1786	$\sqrt{n_g}$	A
n_0	Anzahl Nulleffekt Impulse	-	564	$\sqrt{n_0}$	A
t_g	Messdauer des Bruttoeffekts	s	12000	-	-
t_0	Messdauer des Nulleffekts	s	12000	-	-

Tabelle 3-22: Relevante Parameter zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Tritium

3.7.4 Spezielle Betrachtung der relevanten Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors

Der erweiterte Kalibrierfaktor w des Messplatzes wird über folgende Gleichungen bestimmt:

$$w = \frac{1}{x_5 \cdot x_6 \cdot x_7} \quad \text{mit} \quad x_5 = \frac{\left(\frac{n_b}{t_b} - \frac{n_g}{t_g} \right)}{y_{St} \cdot m_{St}} = \frac{(r_b - r_g)}{y_{St} \cdot m_{St}} = \frac{r_t}{y_{St} \cdot m_{St}}$$

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Beispielhafter Messwert/ Einstellung	Messunsicherheit	Typ
x_5	Zählausbeute	1/(Bq s)	0,319	0,009 (3 %)	A+B
x_6	Analysenaliquot	m ³	$5,00 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-8}$ (1 %)	B
x_7	mittlere chemische Ausbeute	-	0,99	0,05 (5 %)	B
r_b	Bruttozählrate (Probe+Standard)	1/s	15,26	$\sqrt{r_t}$	A
r_t	Nettozählrate (Standard)	1/s	1,225	$\sqrt{r_t}$	A
n_b	Anzahl Impulse (Standard+Probe)	-	16600	$\sqrt{n}$	A
t_{St}	Messdauer (Standard+Probe)	s	12000	0,01	B
m_{St}	Masse Standardlösung	g	0,0490	0,0005	B
y_{St}	spez. Aktivität (Standard)	Bq/g	78,30	0,08	A+B

Tabelle 3-23: Relevante Parameter des erweiterten Kalibrierfaktors

3.7.5 Nicht relevante Parameter der Modellannahmen und des erweiterten Kalibrierfaktors

Parameter	Bezeichnung	Typ	Bemerkung
	x_3 („Abschirmfaktor“) x_4 („Untergrundkorrekturfaktor“)	B	Der Nulleffekt wird zeitnah mitbestimmt. Zusätzliche Korrekturparameter sind daher nicht nötig. Die Messbedingungen im Messraum sind konstant.
	Probenentnahme	B	Es wird eine repräsentative Probenentnahme vorausgesetzt.
	Zerfallskorrektur (aus Zeitdifferenz Probenentnahme => Messung)	B	Zeitdifferenz zwischen Probenentnahme und der Messung ist vernachlässigbar.
	Umgebungsbedingungen	B	Die Messbedingungen im Messraum (T, rel. Luftfeuchte) sind konstant anzusehen.
	Korrelationsfaktor Standardaddition	A	vernachlässigbar, wenn Produkt aus $r_t \cdot r_n > u^2(r_b)$, die Herleitung siehe 3.7.6
	Quenchkorrektur	B	Entfällt aufgrund Kalibrierung mit einem identisch hergestelltem Standardmesspräparat
	Korrelationsfaktor Untergrundmessung	A	Entfällt, da kein signifikanter Beitrag zur kombinierten Messunsicherheit
	Lumineszenz Korrektur	A+B	Entfällt aufgrund Kalibrierung mit einem identisch hergestelltem Standardmesspräparat

Tabelle 3-24: Nicht relevante Parameter

3.7.6 Das Ergebnis der Modellgleichung für Tritium Bestimmung

$$y = (r_g - r_0) \cdot w = \left(\frac{n_g}{t_g} - \frac{n_0}{t_0} \right) \cdot w = \left(\frac{1786}{12000s} - \frac{564}{12000s} \right) \cdot 6,33 \cdot 10^5 \text{ Bq s/m}^3 = 6,5 \cdot 10^4 \text{ Bq/m}^3$$

wobei

$$w = \frac{1}{x_5 \cdot x_6 \cdot x_7} = \frac{1 \text{ Bqs}}{0,319 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 0,99} = 6,3 \cdot 10^5 \text{ Bq s/m}^3$$

Die Modellgleichung enthält eine Kovarianz $\text{cov}(r_n, r_t)$, da die Probe zweimal gemessen wird, einmal ohne und einmal mit der Addition von einer Standardlösung. Bei der Berechnung taucht die Bruttozählrate r_g zweimal auf.

$$\begin{aligned} r_n &= r_g - r_0 \\ r_t &= r_b - r_g \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} r_n &= r_g - r_0 \\ r_t &= r_b - r_g \end{aligned}} \right\} \text{ Kovarianz}$$

$$y = (r_g - r_0) \cdot w = (r_g - r_0) \cdot \frac{1}{x_5 \cdot x_6 \cdot x_7} = \frac{(r_g - r_0) \cdot y_{\text{St}} \cdot m_{\text{St}}}{(r_b - r_g) \cdot x_6 \cdot x_7} = \frac{r_n \cdot y_{\text{St}} \cdot m_{\text{St}}}{r_t \cdot x_6 \cdot x_7} = \frac{r_n}{r_t} \cdot z$$

Die folgende Gleichung berücksichtigt in Erweiterung der Gleichung 2-1 einen Kovarianzterm.

$$u^2(y) = \left(\frac{\partial y}{\partial r_n} \right)^2 \cdot u^2(r_n) + \left(\frac{\partial y}{\partial r_t} \right)^2 \cdot u^2(r_t) + \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)^2 \cdot u^2(z) + 2 \cdot \frac{\partial y}{\partial r_n} \cdot \frac{\partial y}{\partial r_t} \cdot \text{cov}(r_n, r_t)$$

$$\text{cov}(r_n, r_t) = \frac{\partial r_n}{\partial r_b} \cdot \frac{\partial r_t}{\partial r_b} \cdot u^2(r_b) = 1 \cdot (-1) \cdot u^2(r_b) = -u^2(r_b)$$

Somit folgt:

$$u_{\text{rel}}^2(y) = u_{\text{rel}}^2(r_n) + u_{\text{rel}}^2(r_t) + u_{\text{rel}}^2(z) + 2 \cdot \frac{u_{\text{rel}}^2(r_n)}{r_n \cdot r_t}$$

Nach Ableitung ist zu erkennen, dass der letzte Kovarianzterm vernachlässigbar ist, wenn der Nenner $(r_n \cdot r_t)$ ausreichend groß ist.

Die zugehörige Unsicherheit errechnet sich mittels folgender Formel

$$\begin{aligned} u(y) &= \sqrt{w^2 \left[\frac{n_g}{t_g^2} + \frac{x_3^2 n_0}{t_0^2} + \left(\frac{n_0}{t_0} \right)^2 u^2(x_3) + u^2(x_4) \right] + y^2 u_{\text{rel}}^2(w)} \\ u(y) &= \sqrt{\left(6,3 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq s}}{\text{m}^3} \right)^2 \cdot \left[\frac{1786}{(12000 \text{ s})^2} + \frac{1^2 \cdot 564}{(12000 \text{ s})^2} + \left(\frac{564}{12000 \text{ s}} \right)^2 \cdot 0 + 0 \right] + (6,5 \cdot 10^4 \text{ Bq})^2 \cdot (0,063)^2} \\ u(y) &= 4,6 \cdot 10^3 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

mit

$$u(w) = w \sqrt{\sum_i \frac{u^2(x_i)}{x_i^2}} = w \sqrt{\left(\frac{u(x_5)}{x_5}\right)^2 + \left(\frac{u(x_6)}{x_6}\right)^2 + \left(\frac{u(x_7)}{x_7}\right)^2}$$

$$u(w) = 6,3 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{Bq s}}{\text{m}^3} \sqrt{\left(\frac{0,009 \text{ m}^3}{0,319 \text{ m}^3}\right)^2 + \left(\frac{5 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 10^{-6}}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{0,99}\right)^2}$$

$$u(w) = 3,7 \cdot 10^4 \frac{\text{Bq s}}{\text{m}^3}$$

$$u_{\text{rel}}(w) = \frac{u(w)}{w} = \frac{3,7 \cdot 10^4 \text{ Bq s m}^3}{6,3 \cdot 10^5 \text{ Bq s m}^3} = 0,059 = 5,9\%$$

3.7.7 Berechnungen der charakteristischen Größen

Für $\alpha = 0,05$ erhält man das Quantil $k_{1-\alpha} = 1,645$ der standardisierten Normalverteilung $\Phi(k_{1-\alpha})$. Damit ergibt sich eine Erkennungsgrenze für die Aktivitätskonzentration von

$$y^* = k \cdot \sqrt{c_0}$$

$$c_0 = w^2 \left[x_3 \frac{n_0}{t_0} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{x_3}{t_0} \right) + \left(\frac{n_0}{t_0} \right)^2 u^2(x_3) \right]$$

$$y^* = 1,645 \cdot \sqrt{\left(6,3 \cdot 10^5 \frac{\text{Bq s}}{\text{m}^3} \right)^2 \cdot \left[1 \cdot \frac{564}{12000 \text{ s}} \left(\frac{1}{12000 \text{ s}} + \frac{1}{12000 \text{ s}} \right) + \left(\frac{564}{12000 \text{ s}} \right)^2 \cdot 0 \right]} = 2,9 \cdot 10^3 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$$

Bei $k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta}$ dann kann die Nachweisgrenze $y^\#$ mit folgender quadratischen Gleichung berechnet werden:

$$y^\# = \frac{2 \cdot y^* + k^2 \cdot c_1}{1 - k^2 \cdot c_2} = \frac{2 \cdot 2,9 \cdot 10^3 \text{ Bq} + (1,645)^2 \cdot 52,75 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}}{1 - (1,645)^2 \cdot 0,00345} = \frac{5,94 \cdot 10^3}{0,986} = 6,0 \cdot 10^3 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$$

$$c_1 = \frac{w}{t_g} = \frac{6,3 \cdot 10^5 \text{ Bq s}}{\text{m}^3 \cdot 12000 \text{ s}} = 52,75 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$$

$$c_2 = u_{\text{rel}}^2(w) = \left(\frac{u(w)}{w} \right)^2 = \left(\frac{3,7 \cdot 10^4 \text{ Bq s m}^3}{6,3 \cdot 10^5 \text{ Bq s m}^3} \right)^2 = (0,059)^2 = 0,00345$$

Die Berechnung des besten Schätzwertes $\hat{y}$ ergibt

$$\phi[y / u(y)] = \left(\frac{6,3 \cdot 10^5}{3,7 \cdot 10^4} \right) = 13,8 \Rightarrow \omega \approx 1$$

$$\hat{y} = y + \frac{u(y) \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot u^2(y)}\right)}{\omega \cdot \sqrt{2\pi}} = 6,5 \cdot 10^4 + \frac{4,7 \cdot 10^3 \text{ Bq} \cdot \exp\left(-\frac{(6,5 \cdot 10^4 \text{ Bq m}^3)^2}{2 \cdot (4,7 \cdot 10^3 \text{ Bq m}^3)^2}\right)}{1 \cdot \sqrt{2 \cdot 3,14}} = 6,5 \cdot 10^4 \text{ Bq/m}^3$$

$$u(\hat{y}) = \sqrt{u^2(y) - \hat{y}(\hat{y} - y)} = \sqrt{\left(4,7 \cdot 10^3 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right)^2 - 6,5 \cdot 10^4 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \cdot \left(6,5 \cdot 10^4 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} - 6,5 \cdot 10^4 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right)}$$

$$u(\hat{y}) = 4,6 \cdot 10^3 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$$

Bei der Berechnung der oberen Vertrauensgrenze $y^>$ beträgt das Quantil $k_p = 0,05$ ($\gamma = 0,05$).

$$y^> = y + k_q u(y) = 7,3 \cdot 10^4 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$$

3.7.8 Dokumentation

Messung von Tritium (HTO) in Anlehnung nach [20] in einer Abwasserprobe eines Kernkraftwerkes.

Die Auswertung erfolgte nach DIN ISO 11929.

Gesamtergebnis		
	$k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,645$ $\gamma = 0,05$	
		Bq/m³
Primäres Messergebnis	y	$6,5 \cdot 10^4$
Standardunsicherheit zu y	$u(y)$	$4,6 \cdot 10^3$
Erkennungsgrenze	y^*	$2,9 \cdot 10^3$
Messeffekt erkannt?	$y > y^* ?$	Ja
Nachweisgrenze	$y^\#$	$6,0 \cdot 10^3$
Messverfahren für Messzweck geeignet?	$y^\# \leq y_r ?$	Ja
Obere Vertrauensgrenze	$y^>$	$7,3 \cdot 10^4$
Bester Schätzwert	$\hat{y}$	$6,5 \cdot 10^4$
Standardunsicherheit zu $\hat{y}$	$u(\hat{y})$	$4,6 \cdot 10^3$
Nachweisgrenze nach KTA ($y^\#$)	y_r	$4,0 \cdot 10^4$

Tabelle 3-25: Ergebnis und charakteristische Grenzen

Anhang A

Darstellung der Standardunsicherheit der Messgröße $\tilde{u}(\tilde{y})$ als quadratische Gleichung

Im Folgenden wird die quadratische Gleichung am einfachen Beispiel der Gammaspektrometrie bei Auswertung einer einzelnen ungestörten Linie gezeigt. Da diese Herleitung für das Modell der Auswertung auch in allgemeiner Form gezeigt werden kann, ist diese allgemeingültig.

Ausgehend von Gleichung (2-5) kann mit $u^2(n_g) = n_g$ (wegen der Poissonstatistik) und

$n_g = \frac{\tilde{y}t}{w} + n_b$ die Funktion $\tilde{u}(\tilde{y})$ folgendermaßen geschrieben werden:

$$\tilde{u}(\tilde{y}) = \sqrt{\left(\frac{w}{t}\right)^2 \left[\tilde{y} \frac{t}{w} + n_b + u^2(n_b) \right] + \tilde{y}^2 u_{\text{rel}}^2(w)}$$

Damit kann die implizite Gleichung (2-10) $y^\# = y^* + k\tilde{u}(y^\#)$ geschrieben werden als:

$$y^\# = \frac{kw}{t} \sqrt{n_b + u^2(n_b)} + k \sqrt{w^2 \left[\left(\frac{y^\#}{w} + \frac{n_b}{t} \right) \frac{1}{t} + \frac{u^2(n_b)}{t^2} \right] + y^{\#2} u_{\text{rel}}^2(w)} \quad (\text{A-1})$$

Verschieben des ersten Terms auf der rechten Seite nach links und anschließendes Quadrieren ergibt:

$$y^{\#2} + \left(\frac{kw}{t} \right)^2 [n_b + u^2(n_b)] - 2y^\# \left(\frac{kw}{t} \right) \sqrt{n_b + u^2(n_b)} = k^2 \left\{ w^2 \left[\left(\frac{y^\#}{w} + \frac{n_b}{t} \right) \frac{1}{t} + \frac{u^2(n_b)}{t^2} \right] + y^{\#2} u_{\text{rel}}^2(w) \right\}$$

Nochmaliges umstellen ergibt eine quadratische Gleichung der Form $Ax^2+Bx+C=0$ mit $C=0$:

Hinweis:

Dies ist auch für $\alpha \neq \beta$ lösbar, die Gleichungen werden nur wesentlich länger)

$$y^{\#2} [1 - k^2 u_{\text{rel}}^2(w)] - y^\# \left[\frac{k^2 w}{t} + \frac{2kw}{t} \sqrt{n_b + u^2(n_b)} \right] = 0$$

Wegen $C=0$ vereinfacht sich die Lösung der quadratischen Gleichung zu $x = -B/A$ und damit wird

$$y^\# = \frac{\frac{kw}{t} [k + 2\sqrt{n_b + u^2(n_b)}]}{1 - k^2 u_{\text{rel}}^2(w)} \quad (\text{A-2})$$

Die Gleichung (A-1) für die Nachweisgrenze ist nun über (A-2) einfach lösbar, die Koeffizienten c_0 , c_1 und c_2 der Gleichungen (2-11) bis (2-16) folgen aus Gleichung (A-2).

Anhang B

Korrelierte Eingangsgrößen

Herleitung

Der *Erwartungswert* einer einzelnen Zufallsvariablen x , dessen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) gleich $\phi(x)$ sei, ist definiert als:

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x \phi(x) dx = \mu \quad (\text{B-1})$$

Das Symbol $\langle * \rangle$ zeigt an, dass es sich um einen Erwartungswert handelt. Oben steht das sog. „erste Moment“. Mit dem „zweiten Moment“:

$$\langle x^2 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \phi(x) dx \quad (\text{B-2})$$

kann die *Varianz* von x definiert werden. Mittels einer Hilfsgröße dx der Abweichung zwischen x und $\langle x \rangle$

$$dx = x - \mu \quad (\text{B-3})$$

ergibt sich die Varianz als:
$$\text{Var}(x) = dx dx = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2 \quad (\text{B-4})$$

Und daraus die Standardabweichung:
$$\sigma = \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} \quad (\text{B-5})$$

Mit den ersten beiden Momenten werden normalerweise (*und in der DIN ISO 11929*) die jeweiligen Zufallsvariablen vollständig (!) charakterisiert. In dieser Darstellung werden keine Annahmen über die Form der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) getroffen, lediglich deren Integrale (Verteilungsfunktion, kumulative WDF) müssen endliche Lösungen haben.

Hinweis:

Die Schreibweise der DIN ISO 11929 wurde in diesem Abschnitt modifiziert. Aus $x \rightarrow \langle x \rangle$ und aus $u^2(x) \rightarrow \text{Var}(x)$ resultiert daraus, dass für die unten einzuführende Kovarianz $\text{Cov}(x)$ kein entsprechendes Pendant in der Schreibweise der DIN ISO 11929 existiert. Die dort z. B. als x_i und x_j bezeichneten Eingangsgrößen werden hier als x und y bezeichnet.

Falls **zwei** (oder mehrere) Zufallsvariablen zu betrachten sind, die **nicht voneinander unabhängig** sind, dann muss eine *gemeinsame WDF* vorhanden sein, $\phi(x,y)$ genannt. Die Erwartungswerte sind nun ganz ähnlich definiert wie eben:

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x \phi(x,y) dx dy; \quad \langle y \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} y \phi(x,y) dx dy \quad (\text{B-6})$$

Neben den Varianzen
$$\text{Var}(x) = dx dx; \quad \text{Var}(y) = dy dy \quad (\text{B-7})$$

treten nun Terme auf, die die *Kovarianz* von x und y beschreiben:

$$\text{Cov}(x,y) = \langle dx dy \rangle = \langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle \quad (\text{B-8})$$

Die Kovarianzen sind ebenso wie die Varianzen quadratische Terme. Ähnlich wie Varianzen auf Standardabweichungen zurückgeführt werden, werden *Korrelationskoeffizienten* eingeführt:

$$\text{Corr}(x,y) = \frac{\text{Cov}(x,y)}{\sqrt{\text{Var}(x)}\sqrt{\text{Var}(y)}} = \frac{\langle dx dy \rangle}{\sqrt{\langle dx dx \rangle} \sqrt{\langle dy dy \rangle}} \quad (\text{B-9})$$

Der Nenner dieser Gleichung ist das Produkt der jeweiligen Standardabweichungen. Der Korrelationskoeffizient liegt im Intervall $[-1; 1]$ und verschwindet falls x und y voneinander unabhängig sind.

Die gemeinsame WDF löst sich dann wieder auf:
$$\phi(x,y) = \phi_1(x) \phi_2(y) \quad (\text{B-10})$$

Und man erhält:
$$\langle xy \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_1(x) dx \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_2(y) dy = \langle x \rangle \langle y \rangle \quad (\text{B-11})$$

Die Kovarianz ist nun wieder Null ((B-11) in (B-8) einsetzen).

Hinweis:

Das Gegenteil ist nicht richtig: Aus der Kovarianz NULL folgt nicht allgemein die statistische Unabhängigkeit (nur bei multivariaten Normalverteilungen, wie in der DIN ISO 11929 angenommen). Immer dann, wenn Zufallsvariablen nicht unabhängig sind, ist die alleinige Angabe der Varianz eine unvollständige Information.

Für den Fall, dass es sich nicht um eine Linearkombination handelt (und die gemeinsame WDF unbekannt ist), „rettet“ man sich quasi immer (GUM, DIN ISO 11929) mittels einer *Taylorreihenentwicklung* um die Stelle μ_i , dem Erwartungswert der jeweiligen Eingangsgröße, um den *Erwartungswert und die Varianz der Ergebnisgröße* $F(x_i)$ aus den $\langle x_i \rangle$ und den dx_i zu ermitteln:

$$F(x_i) \cong F(\mu_i) + \sum_i \left. \frac{\partial F}{\partial x_i} \right|_{\mu} (x_i - \mu_i) \quad \text{mit: } \mu_i = \langle x_i \rangle \quad (\text{B-12})$$

Durch den Abbruch der Taylorreihe nach der 1.Ordnung gilt der Ausdruck für $\text{Var}(F(x_i))$ nur noch näherungsweise:

$$\text{Var}(F(x_i)) \cong \sum_i a_i^2 \text{Var}(x_i) + 2 \sum_{i < j} \sum_j a_i a_j \text{Cov}(x_i, x_j) \quad (\text{B-13})$$

Die als die „Gauß’sche Fehlerfortpflanzung“ bekannte Formel (B-13) ist also immer eine Näherung, die nur dann sinnvolle Ergebnisse liefert, wenn gewährleistet ist, dass:

$$\text{Var}(x_i) = \langle dx_i dx_i \rangle \ll \mu_i^2 = \langle x_i \rangle^2 \quad (\text{B-14})$$

Mit großen Unsicherheiten behaftete Eingangsgrößen sind also mathematisch wesentlich aufwendiger zu behandeln, da die Ungleichung (B-14) dann nicht gilt!

Hinweis:

Hier wäre ein theoretisch eleganter Übergang zum Themenkomplex des Abschnitts 2.5.4 möglich, dort wird jedoch ein praxisorientierter Zugang gewählt.

Anhang C

Literatur

- [1] Michel, R., Kirchhoff, K.: Nachweis-, Erkennungs- und Vertrauensgrenzen bei Kernstrahlungsmessungen, Publikationsreihe FORTSCHRITTE IM STRAHLENSCHUTZ des Fachverbandes für Strahlenschutz, FS-99-108-AKSIGMA, ISSN 1013-4506, TÜV-Rheinland Verlag, Köln (1999).
- [2] Altschuler, B., Pasternack, B.: Statistical measures of the lower limit of detection of a radioactivity, Health Physics 9, 293 – 298 (1963).
- [3] Nicholson, W. L.: Fixed time estimation of counting rates with background corrections, Hanford Laboratories, Richland (1963).
- [4] Currie, L. A.: Limits for qualitative detection and quantitative determination, Anal. Chem. 40, 586 - 593 (1968).
- [5] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement , ISO, Geneva 1993
- [6] R. Mameghani, Konsequenzen der ISO 11929 für die Strahlungs- und Aktivitätsüberwachung in kerntechnischen Anlagen, TÜV SÜD, Bericht ETS 1-34/2011
- [7] DIN 25457-1 (2013-03): Aktivitätsmessverfahren für die Freigabe von radioaktiven Stoffen und kerntechnischen Anlagenteilen — Teil 1: Grundlagen
- [8] ISO 10703 (2007-11), Water quality – Determination of the activity concentration of radionuclides – Method by high resolution gamma-ray spectrometry
- [9] E DIN ISO 18589-3 (2014-02): Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Erdboden – Teil 3: Messung von Gammastrahlung emittierenden Radionukliden (ISO/DIS 18589-3:2013-08)
- [10] Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen; Deutsche Fassung ENV 13005:1999
- [11] Strom D. J., MacLellan J. A.: Evaluation of eight decision Rules for Low-Level Radioactivity Counting Health Physics 81, No. 1 (2001)
- [12] Alvarez J. L.: Poisson-Based Detection Limit and Signal Confidence Intervals for Few Total Counts; Health Physics 93, No. 2 (2007)
- [13] JCGM 101:2008: Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method
- [14] L. Hummel: DIN 25457: Eignung von Freigabemessverfahren nach der DIN ISO 11929; TÜV SÜD, 9. Expertentreffen Strahlenschutz, Schloss Hohenkammer, 12. – 14. März 2014
- [15] Empfehlung 2004/2/Euratom der Kommission vom 18. Dezember 2003 zu standardisierten Informationen über Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft und dem Abwasser aus Kernkraftwerken und Wiederaufarbeitungsanlagen in die Umwelt im Normalbetrieb
- [16] DIN ISO 11929 Beiblatt 1 (2014-08): Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlungen – Grundlagen und Anwendungen: Beiblatt 1: Beispiele
- [17] K. Vogl, P. Gesewsky, Verfahren zur Bestimmung der mittleren Aktivitätskonzentration von Kohlenstoff-14 in der Fortluft kerntechnischer Anlagen, J-C-14-ALUFT-01, BMU-Messanleitung, Version Mai 2009.
- [18] K. Vogl, P. Gesewsky, Verfahren zur Bestimmung der mittleren Aktivitätskonzentration von Tritium in der Fortluft kerntechnischer Anlagen, J-H-3-ALUFT-01, BMU-Messanleitung, Version Mai 2009.
- [19] P. Gesewsky, K. Vogl, P. Gumbrecht, B., v. Helden, Probeentnahme und Messung von C-14 und H-3 in der Fortluft von Kernkraftwerken mit Hilfe von Molekularsieben, BfS ST2-18/1996 Teil 1 und 2.
- [20] H. U. Fusban, H. Rühle, I. Gans Verfahren zur Bestimmung von Tritium in Abwasser, H-H-3-AWASS-01, BMU-Messanleitung, Version September 2000.

Anhang D

Bestimmungen, auf die in diesem Bericht verwiesen wird

AtG		Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz – AtG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 26. Juli 2016 (BGBl. I 2016, Nr. 37, S. 1834) geändert worden ist
StrlSchV		Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 26. Juli 2016 (BGBl. I 2016, Nr. 37, S. 1843) geändert worden ist
SiAnf	(2015-03)	Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. März 2015 (BAnz AT 30.03.2015 B2)
Interpretationen	(2015-03)	Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 29. November 2013 (BAnz AT 10.12.2013 B4), geändert am 3. März 2015 (BAnz AT 30.03.2015 B3)
REI		Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) vom 7. Dezember 2005 (GMBL 2006, Nr. 14-17, S. 254)
KTA 1502	(2013-11)	Überwachung der Aktivitätskonzentrationen radioaktiver Stoffe in der Raumluft von Kernkraftwerken
KTA 1503.1	(2016-11)	Überwachung der Ableitung gasförmiger und an Schwebstoffen gebundener radioaktiver Stoffe; Teil 1: Überwachung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Kaminfortluft bei bestimmungsgemäßem Betrieb
KTA 1503.2	(2013-11)	Überwachung der Ableitung gasförmiger und an Schwebstoffen gebundener radioaktiver Stoffe; Teil 2: Überwachung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Kaminfortluft bei Störfällen
KTA 1503.3	(2013-11)	Überwachung der Ableitung gasförmiger und an Schwebstoffen gebundener radioaktiver Stoffe; Teil 3: Überwachung der nicht mit der Kaminfortluft abgeleiteten radioaktiven Stoffe
KTA 1504	(2015-11)	Überwachung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Wasser
KTA 1507	(2012-11)	Überwachung der Ableitungen radioaktiver Stoffe bei Forschungsreaktoren
DIN 1338	(2011-03)	Formelschreibweise und Formelsatz
DIN ISO 11929	(2011-01)	Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung - Grundlagen und Anwendungen (ISO 11929:2010)

zurückgezogene Normen

<i>DIN 25482</i>		<i>Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen,</i>
<i>DIN 25482-1</i>	<i>(1989-04)</i>	<i>Zählende Messungen ohne Berücksichtigung des Probenbehandlungseinflusses</i>
<i>DIN 25482-2</i>	<i>(1992-09)</i>	<i>Zählende spektrometrische Messungen ohne Berücksichtigung des Probenbehandlungseinflusses</i>
<i>DIN 25482-3</i>	<i>(1993-02)</i>	<i>Messungen mit linearen, analog arbeitenden Ratemetern</i>
<i>DIN 25482-4</i>	<i>(1995-12)</i>	<i>Zählende alphaspektrometrische Messungen ohne Berücksichtigung von Probenbehandlungs- und Geräteeinflüssen</i>
<i>DIN 25482-5</i>	<i>(1993-06)</i>	<i>Zählende hochauflösende gammaspektrometrische Messungen ohne Berücksichtigung des Probenbehandlungseinflusses</i>

<i>DIN 25482-6</i>	<i>(1993-02)</i>	<i>Zählende Messungen mit Berücksichtigung des Probenbehandlungs- und Geräteinflusses</i>
<i>DIN 25482-7</i>	<i>(1997-12)</i>	<i>Zählende Messungen an Filtern während der Anreicherung radioaktiver Stoffe</i>
<i>DIN 25482-10</i>	<i>(2000-05)</i>	<i>Allgemeine Anwendungen</i>
<i>DIN 25482-11</i>	<i>(2003-02)</i>	<i>Messungen mit Albedo-Dosimetern</i>
<i>DIN 25482-12</i>	<i>(2003-02)</i>	<i>Entfaltung von Spektren</i>
<i>DIN 25482-13</i>	<i>(2003-02)</i>	<i>Zählende Messungen an bewegten Objekten</i>