

DIN ISO 11929



ICS 17.240

Ersatzvermerk
siehe unten**Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung – Grundlagen und Anwendungen (ISO 11929:2010)**

Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation – Fundamentals and application (ISO 11929:2010)

Détermination des limites caractéristiques (seuil de décision, limite de détection et extrémités de l'intervalle de confiance) pour mesurages de rayonnements ionisants – Principes fondamentaux et applications (ISO 11929:2010)

Ersatzvermerk

Ersatz für DIN 25482-1:1989-04, DIN 25482-1 Beiblatt 1:1992-03, DIN 25482-2:1992-09, DIN 25482-2 Beiblatt 1:2000-09, DIN 25482-3:1993-02, DIN 25482-4:1995-12, DIN 25482-5:1993-06, DIN 25482-5 Beiblatt 1:1997-12, DIN 25482-6:1993-02, DIN 25482-6 Beiblatt 1:1998-12, DIN 25482-7:1997-12, DIN 25482-10:2000-05, DIN 25482-11:2003-02, DIN 25482-12:2003-02 und DIN 25482-13:2003-02

Gesamtumfang 82 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE
Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN
Normenausschuss Radiologie (NAR) im DIN

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort	4
Nationaler Anhang NA (informativ) Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen	5
Nationaler Anhang NB (informativ) Literaturhinweise	6
Nationaler Anhang NC (informativ) Anwendungen bei Messungen mit Albedodosimetern	7
Einleitung	24
1 Anwendungsbereich	24
2 Normative Verweisungen	25
3 Begriffe	25
4 Größen und Formelzeichen	28
5 Grundlagen	29
5.1 Allgemeines zur Messgröße	29
5.2 Modell	29
5.3 Berechnung der Standardunsicherheit als Funktion der Messgröße	31
6 Festlegung der charakteristischen Grenzen und Beurteilungen	33
6.1 Vorgaben	33
6.2 Festlegung der Erkennungsgrenze	33
6.3 Festlegung der Nachweisgrenze	33
6.4 Festlegung der Vertrauensgrenzen	35
6.5 Beurteilung eines Messergebnisses	36
6.6 Beurteilung eines Messverfahrens	37
7 Prüfbericht	37
Anhang A (informativ) Übersicht zum allgemeinen Verfahren	38
Anhang B (normativ) Einzelne Anwendungen	40
Anhang C (normativ) Anwendungen bei zählenden spektrometrischen Messungen	46
Anhang D (informativ) Anwendungsbeispiele	58
Anhang E (informativ) Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung	72
Anhang F (informativ) Erläuterungen	74
Literaturhinweise	81
Bild 1 – Iterative Berechnung der Nachweisgrenze	34
Bild 2 – Bester Schätzwert und Vertrauensgrenzen	36
Bild C.1 – Anordnung der Kanalbereiche zur Ermittlung des Untergrundes einer Linie	49
Bild F.1 – Illustration der Wahrscheinlichkeitsverteilung nach Gleichung (F.5) für eine nicht negative Messgröße Y	76
Bild F.2 – Illustration der Funktion $\tilde{u}^2(\tilde{y})$ und der Interpolationsformel nach Gleichung (19)	77
Bild F.3 – Erkennungsgrenze y^* und Nachweisgrenze $y^\#$	78
Bild F.4 – Definition der Vertrauensgrenzen und des besten Schätzwertes	80

Tabelle NC.1 – Angenommene Werte und Standardunsicherheiten der Eingangsgrößen bei der Ermittlung von H_γ und H_n mittels Albedodosimetern im Beispiel NC.6	15
Tabelle NC.2 – Unsicherheitsbudget der Photonendosis zum Messwert H_γ	16
Tabelle NC.3 – Unsicherheitsbudget der Photonendosis an der Erkennungsgrenze H_γ^*	17
Tabelle NC.4 – Unsicherheitsbudget der Photonendosis an der Nachweisgrenze $H_\gamma^\#$	18
Tabelle NC.5 – Unsicherheitsbudget der Neutronendosis zum Messwert H_n	19
Tabelle NC.6 – Unsicherheitsbudget der Neutronendosis an der Erkennungsgrenze H_n^*	20
Tabelle NC.7 – Unsicherheitsbudget der Neutronendosis an der Nachweisgrenze $H_n^\#$	21
Tabelle D.1 – Eingangsdaten, Zwischenwerte und Ergebnisse zu Beispiel 1	60
Tabelle D.2 – Eingangsdaten, Zwischenwerte und Ergebnisse zu Beispiel 2	63
Tabelle D.3 – Eingangsdaten, Zwischenwerte und Ergebnisse zu Beispiel 3	65
Tabelle D.4 – Eingangsdaten, Zwischenwerte und Ergebnisse zu den Beispielen 4, 5 und 6	68
Tabelle D.5 – Daten des Vielkanal-Spektrums zu den Beispielen 5 und 6	70
Tabelle E.1 – Verteilungsfunktion $\Phi(t)$ der standardisierten Normalverteilung	73

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN ISO 11929:2008-06.

Die Internationale Norm ISO 11929:2010 „Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation – Fundamentals and application“ ist unverändert in diese Norm übernommen worden.

Das internationale Dokument wurde vom SC 2 „Radiation protection“ des TC 85 „Nuclear Energy“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme und Abstimmung vorgelegt.

Diese Norm basiert wie die vorangegangenen ISO 11929-5 bis -8 auf der Bayes-Statistik, d. h. entsprechend [6] bis [19] können bei ihrer Anwendung auch solche unsicheren Größen und Einflüsse berücksichtigt werden, die sich bei mehrmals wiederholten oder bei zählenden Messungen nicht zufällig verhalten.

Im Zuge der Revision wurde entschieden, dass die überarbeiteten ISO 11929-1 bis -3 und die ISO 11929-4 bis -8 in ein einziges konsistentes Dokument zusammengeführt werden, weil sie alle auf der gleichen Prozedur aufbauen, die zur Berechnung von charakteristischen Grenzen gebraucht wird.

Ebenso wie ISO 11929:2010 alle Publikationen der Reihe ISO 11929 ersetzt, werden mit dieser Norm alle Normen der Reihe DIN 25482 ersetzt. Die Zuordnung zwischen beiden Normenreihen ist DIN VDE 0493 Beiblatt 1 (VDE 0493 Beiblatt 1):2006-09 zu entnehmen.

In der Normenreihe DIN 25482 gab es eine historisch bedingte systematische Inkonsistenz. DIN 25482-1 bis -7 beruhten auf konventioneller Statistik während DIN 25482-10 bis -13 bereits auf der Grundlage der Bayes-Statistik entwickelt wurden. Diese Inkonsistenz wird durch die Übernahme von ISO 11929:2010 behoben.

Für diese Norm ist das nationale Arbeitsgremium GUK 967.2 „Aktivitätsmessgeräte für den Strahlenschutz“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de), Gemeinschaftsgremium mit dem Normenausschuss Radiologie (NAR) im DIN, zuständig. Für die konzentrierte Detailbehandlung hat dieses den Arbeitskreis GAK 967.2.1 „Nachweis- und Erkennungsgrenzen bei Kernstrahlungsmessungen“ eingesetzt.

Änderungen

Gegenüber DIN 25482-1:1989-04, DIN 25482-1 Beiblatt 1:1992-03, DIN 25482-2:1992-09, DIN 25482-2 Beiblatt 1:2000-09, DIN 25482-3:1993-02, DIN 25482-4:1995-12, DIN 25482-5:1993-06, DIN 25482-5 Beiblatt 1:1997-12, DIN 25482-6:1993-02, DIN 25482-6 Beiblatt 1:1998-12, DIN 25482-7:1997-12, DIN 25482-10:2000-05, DIN 25482-11:2003-02, DIN 25482-12:2003-02 und DIN 25482-13:2003-02 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Zusammenfassung zu einem Kerndokument mit Anwendungsbeispielen in den Anhängen.
- b) Durchgängige Anwendung der Bayes-Statistik nach dem Vorbild der DIN 25482-10:2000-05, um die Messunsicherheiten nach ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement* vollständig berücksichtigen zu können (Typ-B-Unsicherheiten konnten mit der konventionellen Statistik nicht behandelt werden).
- c) Statt Häufigkeiten und Hypothesentests zu betrachten, wird allein auf der Basis von Wahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung der unvollständigen Information über die Messgröße eine Entscheidung darüber getroffen, ob ein physikalischer Effekt bei der Messung der Messgröße vorliegt oder nicht;
- d) Einführung von Formelzeichen mit einheitlicher Systematik: physikalische Größen werden mit Großbuchstaben bezeichnet und sorgfältig von ihren Werten unterschieden, die mit den entsprechenden Kleinbuchstaben bezeichnet werden.
- e) Die Anwendungen bei Messungen mit Albedodosimetern (bisher DIN 25482-11:2003-02) werden wegen der besonderen nationalen Bedeutung im Nationalen Anhang NC dieser Norm behandelt.
- f) Es ist vorgesehen, einführende Informationen in einem Beiblatt zu veröffentlichen, nach dem Vorbild der Einführung der Anwendung in ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the*

expression of uncertainty in measurement mit DIN VDE 0493 Beiblatt 2 (VDE 0493 Beiblatt 2):2007-06, *Strahlenschutz-Messgeräte – Bestimmung der Unsicherheit beim Messen (IEC/TR 62461:2006)*.

Auch wenn das Ergebnis der Überarbeitung teilweise zu den gleichen Gleichungen führt, ist doch die Begründung auf der Basis der Bayes-Statistik vollkommen unterschiedlich. Insbesondere bekommt der Begriff Wahrscheinlichkeit eine andere Bedeutung, die über die einfache Betrachtung von Häufigkeiten für Ergebnisse aus wiederholten Messungen und die Statistiken des Kernzerfalls hinausgeht.

Frühere Ausgaben

DIN 25482-1: 1989-04
DIN 25482-1 Beiblatt 1: 1992-03
DIN 25482-2: 1992-09
DIN 25482-2 Beiblatt 1: 2000-09
DIN 25482-3: 1993-02
DIN 25482-4: 1995-12
DIN 25482-5: 1993-06
DIN 25482-5 Beiblatt 1: 1997-12
DIN 25482-6: 1993-02
DIN 25482-6 Beiblatt 1: 1998-12
DIN 25482-7: 1997-12
DIN 25482-10: 2000-05
DIN 25482-11: 2003-02
DIN 25482-12: 2003-02
DIN 25482-13: 2003-02

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der im Hauptteil dieser Norm zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	ISO 31-0	–	–
–	ISO 31-9	–	–
–	ISO 3534-1	DIN ISO 3534-1	–
–	ISO/IEC Guide 98-3:2008	–	–
ENV 13005:1999	GUM:1995	Siehe DIN V ENV 13005:1999-06	–
–	–	Für Strahlungsmessungen DIN VDE 0493 Bbl 2 (VDE 0493 Bbl 2):2007-06	VDE 0493 Bbl 2
–	ISO/IEC Guide 99:2007	–	–

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN V ENV 13005:1999-06, *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen; Deutsche Fassung ENV 13005:1999*

DIN ISO 3534-1, *Statistik – Begriffe und Formelzeichen – Teil 1: Wahrscheinlichkeit und allgemeine statistische Begriffe*

DIN VDE 0493 Beiblatt 2 (VDE 0493 Beiblatt 2):2007-06, *Strahlenschutz-Messgeräte – Bestimmung der Unsicherheit beim Messen (IEC/TR 62461:2006)*

Nationaler Anhang NC (informativ)

Anwendungen bei Messungen mit Albedodosimetern

NC.1 Einleitung

Die vorliegende Norm kann auch bei Messungen mit Albedodosimetern bei der getrennten Ermittlung der Photonen- und Neutronenkomponente der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ nach DIN 6802-4 angewendet werden.

NC.2 Normative Verweisungen

Dieser Anhang NC enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen nur zu dieser Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschließlich Änderungen).

DIN 6802-1, *Neutronendosimetrie – Teil 1: Spezielle Begriffe und Benennungen*

DIN 6802-2, *Neutronendosimetrie – Teil 2: Konversionsfaktoren zur Berechnung der Orts- und Tiefen-Personendosis aus der Neutronenfluenz und Korrekturfaktoren für Strahlenschutz-Dosimeter*

DIN 6802-4, *Neutronendosimetrie – Teil 4: Verfahren zur Personendosimetrie mit Albedodosimetern*

DIN 6814-3, *Begriffe in der radiologischen Technik – Teil 3: Dosisgrößen und Dosiseinheiten*

DIN IEC 61066 (VDE 0492-3-2):2007-02, *Thermolumineszenz-Dosimetriesysteme zur Personen- und Umweltüberwachung (IEC 61066:2006)*

DIN 25483, *Verfahren zur Umgebungsüberwachung mit integrierenden Festkörperdosimetern*

NC.3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die Begriffe nach DIN 6802-1, DIN 6802-2, DIN 6802-4, DIN 6814-3 und die folgenden.

NC.3.1

Messgröße der Personendosis (bei Messungen mit Albedodosimetern)

Tiefen-Personendosis, $H_p(10)$

[DIN 6814-3]

ANMERKUNG 1 Definitionsgrundlage für die Dosisgrößen der Orts- und Personendosimetrie, die sogenannten „operativen Größen“ der Strahlenschutz-Messtechnik, ist die Äquivalentdosis. Die Personendosis ist in allgemeiner Form definiert als Äquivalentdosis gemessen an der für die Strahlenexposition repräsentativen Stelle der Körperoberfläche und damit eine Punktgröße. Als Personendosis gilt bei durchdringender Strahlung die Messgröße Tiefen-Personendosis $H_p(10)$. Die Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ ist die Äquivalentdosis in 10 mm Tiefe im Körper an der Tragestelle des Personendosimeters.

ANMERKUNG 2 In diesem Nationalen Anhang werden die Tiefen-Personendosen durch Photonen- und Neutronenstrahlung kurz als Photonendosis und Neutronendosis bezeichnet.

ANMERKUNG 3 Ein Albedodosimeter besteht aus mindestens einem Thermolumineszenz-(TL-)Detektorpaar, das sich in einer speziellen Albedodosimeterkapselung befindet und das neben den Albedoneutronen auch thermische Neutronen des äußeren Strahlungsfeldes getrennt registriert. Zur Trennung der Photonen- und Neutronenmesswertanteile ist mindestens ein Detektorpaar erforderlich, das Neutronen- und Photonenstrahlung (NG-Detektor) und Photonenstrahlung (G-Detektor) nachweist.

ANMERKUNG 4 Im Folgenden werden die Albedodosimeter kurz Dosimeter genannt.

ANMERKUNG 5 Albedoneutronen sind Neutronen, die überwiegend nach elastischer Streuung an Wasserstoffkernen im Körper des Dosimeterträgers als thermische und mittelschnelle Neutronen aus der Körperoberfläche wieder austreten.

NC.3.2

Nulleffekt (bei Messungen mit Albedodosimetern)

Anzeige unbestrahlter Dosimeter

ANMERKUNG Diese nicht zusätzlich exponierten Dosimeter erhalten während der Messzeit eine Nulleffektdosis, z. B. durch die natürliche Umgebungsstrahlung. Die Anzeigen der zur Dosismessung im zu messenden Strahlungsfeld eingesetzten Dosimeter (Bruttomessung) werden mit den Nulleffektanzeigen der nicht exponierten Dosimeter verglichen, und der Nulleffekt wird abgezogen.

NC.4 Größen und Formelzeichen

$A_j(\text{G})$ unkorrigierte Anzeige des nur photonenempfindlichen TL-Detektors j der Charge (G)

ANMERKUNG 1 Ein photonenempfindlicher TL-Detektor ist ein G-Detektor nach DIN 6802-4. Als G-Detektoren werden üblicherweise ^7LiF -Detektoren (kurz ^7Li -Detektoren) benutzt.

$A_0(\text{G})$ mittlere unkorrigierte Nullanzeige der Referenzteilcharge (G) der nur photonenempfindlichen TL-Detektoren

$A_k(\text{NG})$ unkorrigierte Anzeige des neutronen- und photonenempfindlichen TL-Detektors (NG-Detektor) k der Charge (NG)

ANMERKUNG 2 Ein neutronen- und photonenempfindlicher TL-Detektor ist ein NG-Detektor nach DIN 6802-4. Als NG-Detektoren werden üblicherweise ^6LiF -Detektoren (kurz ^6Li -Detektoren) benutzt.

$A_0(\text{NG})$ mittlere unkorrigierte Nullanzeige der Referenzteilcharge (NG) der neutronen- und photonenempfindlichen TL-Detektoren

(G) Charge nur photonenempfindlicher TL-Detektoren

H_n durch Neutronenstrahlung erzeugte Komponente der Tiefen-Personendosis, kurz Neutronendosis

H_γ durch Photonenstrahlung erzeugte Komponente der Tiefen-Personendosis, kurz Photonendosis

k_F Korrektionsfaktor für Fading

k_j, k_k individueller Korrektionsfaktor für den j -ten bzw. k -ten Detektor

ANMERKUNG 3 Der j -te ^6Li - und der k -te ^7Li -Detektor bilden zusammen das betrachtete Dosimeter.

k_n Neutronenkorrektionsfaktor

$k_{n,E,\Phi}$ Korrektionsfaktor des ^6Li -Detektors zur Berücksichtigung der Einflüsse der Neutronenenergie E und des Strahleneinfallswinkels Φ

ANMERKUNG 4 Das Formelzeichen Φ darf nicht mit der Neutronenfluenz und der Funktion $\Phi(t)$ in Anhang E verwechselt werden.

$k_{n,\text{lin}}$ Korrektionsfaktor des ^6Li -Detektors für Nichtlinearität

k_{nr} chargenspezifischer Neutronenkorrektionsfaktor

$k_{\gamma,E,\Phi}$ Korrektionsfaktor des ^7Li -Detektors zur Berücksichtigung der Einflüsse der Photonenenergie E und des Strahleneinfallswinkels Φ

$k_{\gamma,\text{lin}}$ Korrektionsfaktor des ^7Li -Detektors für Nichtlinearität

$\dot{M}_{\text{nat}}$ Messwert eines ^7Li -Detektors durch die Umgebungsstrahlung in Einheiten der Dosisleistung, z. B. in Millisievert je Tag (mSv/d)

$M_{m,6}$ Dosisanzeige der ^6Li -Detektoren

$M_{m,7}$ Dosisanzeige der ^7Li -Detektoren

- $M_{0,6}$ Dosisanzeige unbestrahlter ^6Li -Detektoren
- $M_{0,7}$ Dosisanzeige unbestrahlter ^7Li -Detektoren
- ANMERKUNG 5 Für die Dosisanzeigen $M_{m,6}$, $M_{m,7}$, $M_{0,6}$ und $M_{0,7}$ der ^6Li - und ^7Li -Detektoren werden die Einheiten der Dosis verwendet.
- (NG) Charge neutronen- und photonenempfindlicher TL-Detektoren
- $N_{\gamma,r}(n)$ Photonenkalibrierfaktor im Referenzfeld, ermittelt mit einer Teilcharge (n) der photonenempfindlichen Charge (G)
- t_e Expositionsdauer eines Dosimeters

NC.5 Grundlagen

NC.5.1 Allgemeines

Zur Messung der Personendosis in Photonen- und Neutronenfeldern werden Thermolumineszenz-(TL-)Dosimetriesysteme in Form von Albedodosimetern eingesetzt. Sie ermöglichen die getrennte Bestimmung der Photonen- und Neutronendosis. In diesem Nationalen Anhang wird vorausgesetzt, dass es sich bei den verwendeten Dosimetern um Albedodosimeter nach DIN 6802-4 handelt.

Ein TL-Dosimetriesystem besteht aus einem Satz gleichartiger TL-Dosimetersonden zusammen mit dem Auslesegerät und dem Auswerteverfahren und den Behandlungsvorschriften. Auch die rechnerische Auswertung der Messdaten ist ein wesentlicher Teil des Messverfahrens. Näheres siehe NC.5.2 sowie die Literaturhinweise [NC1] und [NC2] in NC.8.

Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass das TL-Dosimetriesystem in Voruntersuchungen (z. B. im Rahmen der Bauartprüfung) kalibriert wurde und die Kalibrierung und die damit zusammenhängenden Standardunsicherheiten im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen regelmäßig geprüft werden.

NC.5.2 Modelle bei Messungen mit Albedodosimetern

Bei der rechnerischen Auswertung der Dosismessungen wird angenommen, dass die einzelnen Dosimeter im interessierenden Dosisbereich hinreichend linear anzeigen. Die Anzeige eines Dosimeters hängt also, mit Unsicherheit behaftet, linear mit der jeweils aufgetragenen Dosis zusammen.

Entsprechend DIN 6802-4 können für die Ermittlung der Photonendosis H_γ und der Neutronendosis H_n als Modelle der Auswertung die Gleichungen (NC.1) und (NC.2) angewendet werden:

$$H_\gamma = k_{\gamma,E,\Phi} \cdot \left[k_{\gamma,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7}) - \dot{M}_{\text{nat}} \cdot t_e \right] \quad (\text{NC.1})$$

und

$$H_n = k_{n,E,\Phi} \cdot \left[k_{n,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,6} - M_{0,6}) - k_{\gamma,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7}) \right] \quad (\text{NC.2})$$

Eine Begründung der Modellfunktionen (NC.1) und (NC.2) ist in Abschnitt NC.7 gegeben.

In diesem nationalen Anhang werden die charakteristischen Grenzen bei Messungen der Photonendosis und der Neutronendosis im Rahmen der Personendosisüberwachung mit Albedodosimetern nach dem speziellen Modell der Gleichungen (NC.1) und (NC.2) dargestellt. Ein numerisches Beispiel ist in Abschnitt NC.6 aufgeführt.

Hier wird vorausgesetzt, dass im Rahmen der Kalibrierung des Dosimetriesystems alle Korrekturfaktoren und die Anzeige $\dot{M}_{\text{nat}} \cdot t_e$ durch die Umgebungsstrahlung während der Expositionsdauer t_e und die mit ihnen verbundenen Standardunsicherheiten bestimmt wurden.

NC.5.3 Anwendung auf die Photonendosis

NC.5.3.1 Ermittlung der Photonendosis und der zugehörigen Standardunsicherheit

Die Photonendosis H_γ ist mit dem Modell nach Gleichung (NC.1) zu ermitteln. Mit Gleichung (NC.1) und Gleichung (3) in 5.2.1 ergibt sich die Standardunsicherheit der Photonendosis $u(H_\gamma)$ zu:

$$\begin{aligned}
 u^2(H_\gamma) = & u^2(k_{\gamma,E,\Phi}) \cdot [k_{\gamma,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7}) - \dot{M}_{\text{nat}} \cdot t_e]^2 \\
 & + u^2(k_{\gamma,\text{lin}}) \cdot [k_{\gamma,E,\Phi} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7})]^2 \\
 & + u^2(k_F) \cdot [k_{\gamma,E,\Phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot M_{m,7}]^2 \\
 & + u^2(M_{m,7}) \cdot [k_{\gamma,E,\Phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot k_F]^2 \\
 & + u^2(M_{0,7}) \cdot [-k_{\gamma,E,\Phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}}]^2 \\
 & + u^2(\dot{M}_{\text{nat}}) \cdot [-k_{\gamma,E,\Phi} \cdot t_e]^2 \\
 & + u^2(t_e) \cdot [-k_{\gamma,E,\Phi} \cdot \dot{M}_{\text{nat}}]^2
 \end{aligned} \tag{NC.3}$$

Die $M_{m,7}$ zugeordnete Standardunsicherheit $u(M_{m,7})$ ist nach DIN 6802-4 gegeben durch:

$$u^2(M_{m,7}) = u^2(M_{0,7}) + (B_7 \cdot M_{m,7})^2 \tag{NC.4}$$

mit dem Variationskoeffizienten B_7 , der im Rahmen der Bauartzulassung oder experimentell für große Dosiswerte von $M_{m,7}$ ermittelt wird, d. h. für $M_{m,7} \square M_{0,7}$.

Formal ist Gleichung (NC.3) von der Form

$$u^2(H_\gamma) = \sum_{l=1}^L c_l^2 \cdot u^2(x_l) = \sum_{l=1}^L u_l^2(H_\gamma) \tag{NC.5}$$

mit

$$u_l(H_\gamma) = c_l \cdot u(x_l) \quad \text{und} \quad L = 7 \tag{NC.6}$$

Die Sensitivitätskoeffizienten

$$c_l = \frac{\partial G}{\partial x_l} = \frac{\partial G}{\partial X_l} \bigg|_{X_1=x_1, \dots, X_L=x_L} \tag{NC.7}$$

sind die partiellen Ableitungen der Gleichung (NC.1). In Gleichung (NC.3) sind dies die Ausdrücke in eckigen Klammern. Der Vorteil, mit Sensitivitätskoeffizienten zu arbeiten, besteht darin, dass über die Ermittlung der $u_l(H_\gamma)$ die Beiträge der einzelnen Eingangsgrößen X_l zur Gesamtunsicherheit deutlich werden, wenn – wie hier – die Kovarianzen vernachlässigbar sind.

NC.5.3.2 Berechnung der Standardunsicherheit als Funktion der Messgröße $\tilde{H}_\gamma$

Ein wichtiger Zwischenschritt bei der Ermittlung der Erkennungs- und Nachweisgrenze ist die Bestimmung der Standardunsicherheit $\tilde{u}(\tilde{H}_\gamma)$ als Funktion des wahren Wertes $\tilde{H}_\gamma$ der Messgröße. In der Modellgleichung (NC.1) wird für H_γ der Parameter $\tilde{H}_\gamma$ eingesetzt und nach $M_{m,7}$ aufgelöst:

$$M_{m,7}(\tilde{H}_\gamma) = \frac{\tilde{H}_\gamma}{k_{\gamma,E,\Phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot k_F} + \frac{M_{0,7}}{k_F} + \frac{\dot{M}_{\text{nat}} \cdot t_e}{k_{\gamma,\text{lin}} \cdot k_F} \tag{NC.8}$$

$M_{m,7}(\tilde{H}_\gamma)$ nach Gleichung (NC.8) wird für $M_{m,7}$ in Gleichung (NC.3) und Gleichung (NC.4) eingesetzt und man erhält die Standardunsicherheit $\tilde{u}^2(\tilde{H}_\gamma)$ als Funktion des wahren Wertes $\tilde{H}_\gamma$.

NC.5.3.3 Erkennungsgrenze

Die Erkennungsgrenze ist nach Gleichung (21) in 6.2 und unter Berücksichtigung von NC.5.3.2:

$$H_\gamma^* = k_{1-\alpha} \cdot \tilde{u}(\tilde{H}_\gamma = 0) \quad (\text{NC.9})$$

mit

$$\begin{aligned} \tilde{u}^2(0) = & u^2(k_{\gamma,\text{lin}}) \cdot \left[\frac{k_{\gamma,E,\Phi} \cdot \dot{M}_{\text{nat}} \cdot t_e}{k_{\gamma,\text{lin}}} \right]^2 \\ & + u^2(k_F) \cdot \left[\frac{k_{\gamma,E,\Phi}}{k_F} \cdot (\dot{M}_{\text{nat}} \cdot t_e + k_{\gamma,\text{lin}} \cdot M_{0,7}) \right]^2 \\ & + (u^2(M_{0,7}) + (B_7 \cdot M_{m,7}(\tilde{H}_\gamma = 0))^2) \cdot [k_{\gamma,E,\Phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot k_F]^2 \\ & + u^2(M_{0,7}) \cdot [-k_{\gamma,E,\Phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}}]^2 \\ & + u^2(\dot{M}_{\text{nat}}) \cdot [-k_{\gamma,E,\Phi} \cdot t_e]^2 \\ & + u^2(t_e) \cdot [-k_{\gamma,E,\Phi} \cdot \dot{M}_{\text{nat}}]^2 \end{aligned} \quad (\text{NC.10})$$

Man erhält $M_{m,7}(\tilde{H}_\gamma = 0)$ nach (NC.8) durch Einsetzen von $\tilde{H}_\gamma = 0$.

Es ist zu beachten, dass die Erkennungsgrenze außer von den bei der Kalibrierung des Dosimetriesystems ermittelten Größen auch von der Dauer der Exposition des Albedodosimeters abhängt.

NC.5.3.4 Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenze ist nach Gleichung (22) in 6.3 und unter Berücksichtigung von NC.5.3.2:

$$H_\gamma^\# = H_\gamma^* + k_{1-\beta} \cdot \tilde{u}(\tilde{H}_\gamma = H_\gamma^\#) \quad (\text{NC.11})$$

mit

$$\begin{aligned} \tilde{u}^2(\tilde{H}_\gamma) = & u^2(k_{\gamma,E,\Phi}) \cdot [k_{\gamma,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,7}(\tilde{H}_\gamma) - M_{0,7}) - \dot{M}_{\text{nat}} \cdot t_e]^2 \\ & + u^2(k_{\gamma,\text{lin}}) \cdot [k_{\gamma,E,\Phi} \cdot (k_F \cdot M_{m,7}(\tilde{H}_\gamma) - M_{0,7})]^2 \\ & + u^2(k_F) \cdot [k_{\gamma,E,\Phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot M_{m,7}(\tilde{H}_\gamma)]^2 \\ & + u^2(M_{m,7}(\tilde{H}_\gamma)) \cdot [k_{\gamma,E,\Phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot k_F]^2 \\ & + u^2(M_{0,7}) \cdot [-k_{\gamma,E,\Phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}}]^2 \\ & + u^2(\dot{M}_{\text{nat}}) \cdot [-k_{\gamma,E,\Phi} \cdot t_e]^2 \\ & + u^2(t_e) \cdot [-k_{\gamma,E,\Phi} \cdot \dot{M}_{\text{nat}}]^2 \end{aligned} \quad (\text{NC.12})$$

mit

$$M_{m,7}(\tilde{H}_\gamma) = \frac{\tilde{H}_\gamma}{k_{\gamma,E,\Phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot k_F} + \frac{M_{0,7}}{k_F} + \frac{\dot{M}_{\text{nat}} \cdot t_e}{k_{\gamma,\text{lin}} \cdot k_F} \quad (\text{NC.13})$$

und

$$u^2(M_{m,7}(\tilde{H}_\gamma)) = u^2(M_{0,7}) + (B_7 \cdot M_{m,7}(\tilde{H}_\gamma))^2 \quad (\text{NC.14})$$

Gleichung (NC.11) ist eine implizite Gleichung, die zweckmäßig mit dem Anfangswert $H_\gamma^\# = 2 \cdot H_\gamma^*$ iterativ gelöst werden kann. Diese Iteration ist fast immer konvergent, andernfalls ist das Messverfahren gänzlich ungeeignet.

NC.5.3.5 Grenzen des Vertrauensbereichs und bester Schätzwert

Die Vertrauensgrenzen $H_\gamma^<$ und $H_\gamma^>$ werden nach den Gleichungen (29), (30) und (31) in 6.4 mit der Standardunsicherheit von H_γ nach Gleichung (NC.3) berechnet.

Der beste Schätzwert $\hat{H}_\gamma$ und die ihm zugeordnete Standardunsicherheit $u(\hat{H}_\gamma)$ werden nach den Gleichungen (33) und (34) in 6.5 mit der Standardunsicherheit von H_γ nach Gleichung (NC.3) berechnet.

NC.5.4 Anwendung auf die Neutronendosis

NC.5.4.1 Ermittlung der Neutronendosis und der zugehörigen Standardunsicherheit

Die Neutronendosis H_n ist mit dem Modell nach Gleichung (NC.2) zu ermitteln. Mit Gleichung (NC.2) und Gleichung (3) in Abschnitt 5.2.1 ergibt sich die Standardunsicherheit der Neutronendosis $u(H_n)$ zu:

$$\begin{aligned} u^2(H_n) = & u^2(k_{n,E,\phi}) \cdot [k_{n,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,6} - M_{0,6}) - k_{\gamma,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7})]^2 \\ & + u^2(k_{n,\text{lin}}) \cdot [k_{n,E,\phi} \cdot (k_F \cdot M_{m,6} - M_{0,6})]^2 \\ & + u^2(k_F) \cdot [k_{n,E,\phi} \cdot (k_{n,\text{lin}} \cdot M_{m,6} - k_{\gamma,\text{lin}} \cdot M_{m,7})]^2 \\ & + u^2(M_{m,6}) \cdot [k_{n,E,\phi} \cdot k_{n,\text{lin}} \cdot k_F]^2 \\ & + u^2(M_{0,6}) \cdot [-k_{n,E,\phi} \cdot k_{n,\text{lin}}]^2 \\ & + u^2(k_{\gamma,\text{lin}}) \cdot [-k_{n,E,\phi} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7})]^2 \\ & + u^2(M_{m,7}) \cdot [-k_{n,E,\phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot k_F]^2 \\ & + u^2(M_{0,7}) \cdot [k_{n,E,\phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}}]^2 \end{aligned} \quad (\text{NC.15})$$

Die $M_{m,6}$ zugeordnete Standardunsicherheit $u(M_{m,6})$ ist nach DIN 6802-4 gegeben durch:

$$u^2(M_{m,6}) = u^2(M_{0,6}) + (B_6 \cdot M_{m,6})^2 \quad (\text{NC.16})$$

mit dem Variationskoeffizienten B_6 , der im Rahmen der Bauartzulassung oder experimentell für große Dosiswerte von $M_{m,6}$ ermittelt wird, d. h. für $M_{m,6} \geq M_{0,6}$. Die Standardunsicherheit $u(M_{m,7})$ folgt aus Gleichung (NC.4).

Formal ist Gleichung (NC.15) von der Form

$$u^2(H_n) = \sum_{l=1}^L c_l^2 \cdot u^2(x_l) = \sum_{l=1}^L u_l^2(H_n) \quad (\text{NC.17})$$

mit

$$u_l(H_n) = c_l \cdot u(x_l) \quad \text{und} \quad L = 8 \quad (\text{NC.18})$$

Die Sensitivitätskoeffizienten

$$c_l = \frac{\partial G}{\partial x_l} = \frac{\partial G}{\partial X_l} \bigg|_{X_1=x_1, \dots, X_L=x_L} \quad (\text{NC.19})$$

sind die partiellen Ableitungen der Gleichung (NC.2). Es gelten entsprechend die Erläuterungen aus NC.5.3.1.

NC.5.4.2 Berechnung der Standardunsicherheit als Funktion der Messgröße $\tilde{H}_n$

Für die Ermittlung der Erkennungs- und Nachweisgrenze ist die Bestimmung der Standardunsicherheit $\tilde{u}(\tilde{H}_n)$ als Funktion des wahren Wertes $\tilde{H}_n$ der Messgröße erforderlich. In der Modellgleichung (NC.2) wird für H_n der Parameter $\tilde{H}_n$ eingesetzt und nach $M_{m,6}$ aufgelöst:

$$M_{m,6}(\tilde{H}_n) = \frac{\tilde{H}_n}{k_{n,E,\Phi} \cdot k_{n,\text{lin}} \cdot k_F} + \frac{k_{\gamma,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7})}{k_{n,\text{lin}} \cdot k_F} + \frac{M_{0,6}}{k_F} \quad (\text{NC.20})$$

$M_{m,6}(\tilde{H}_n)$ nach Gleichung (NC.20) wird für $M_{m,6}$ in Gleichung (NC.15) und Gleichung (NC.16) eingesetzt und man erhält die Standardunsicherheit $\tilde{u}^2(\tilde{H}_n)$ als Funktion des wahren Wertes $\tilde{H}_n$.

NC.5.4.3 Erkennungsgrenze

Für Neutronen hängt die Erkennungsgrenze H_n^* auch vom Messwert H_γ bzw. $M_{m,7}$ der Photonendosis ab, da H_n als Differenz von der Anzeige eines ^6Li - und eines ^7Li -TL-Detektors berechnet werden muss.

Die Erkennungsgrenze ist nach Gleichung (21) aus 6.2 und unter Berücksichtigung von NC.5.4.2:

$$H_n^* = k_{1-\alpha} \cdot \tilde{u}(\tilde{H}_n = 0) \quad (\text{NC.21})$$

mit

$$\begin{aligned} \tilde{u}^2(0) = & u^2(k_{n,\text{lin}}) \cdot [k_{n,E,\Phi} \cdot (k_F \cdot M_{m,6}(\tilde{H}_n = 0) - M_{0,6})]^2 \\ & + u^2(k_F) \cdot [k_{n,E,\Phi} \cdot (k_{n,\text{lin}} \cdot M_{m,6}(\tilde{H}_n = 0) - k_{\gamma,\text{lin}} \cdot M_{m,7})]^2 \\ & + u^2(M_{m,6}(\tilde{H}_n = 0)) \cdot [k_{n,E,\Phi} \cdot k_{n,\text{lin}} \cdot k_F]^2 \\ & + u^2(M_{0,6}) \cdot [-k_{n,E,\Phi} \cdot k_{n,\text{lin}}]^2 \\ & + u^2(k_{\gamma,\text{lin}}) \cdot [-k_{n,E,\Phi} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7})]^2 \\ & + u^2(M_{m,7}) \cdot [-k_{n,E,\Phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot k_F]^2 \\ & + u^2(M_{0,7}) \cdot [k_{n,E,\Phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}}]^2 \end{aligned} \quad (\text{NC.22})$$

Man erhält $M_{m,6}(\tilde{H}_n = 0)$ nach Gleichung (NC.20) durch Einsetzen von $\tilde{H}_n = 0$ und $u(M_{m,6}(\tilde{H}_n = 0))$ nach Gleichung (NC.16) durch Einsetzen von $M_{m,6}(\tilde{H}_n = 0)$.

NC.5.4.4 Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenze ist nach Gleichung (22) aus 6.3 und mit der Erkennungsgrenze nach Gleichung (NC.21) unter Berücksichtigung von NC.5.4.2

$$H_n^\# = H_n^* + k_{1-\beta} \cdot \tilde{u}(\tilde{H}_n = H_n^\#) \quad (\text{NC.23})$$

$$\begin{aligned}
\tilde{u}^2(\tilde{H}_n) = & u^2(k_{n,E,\phi}) \cdot \left[k_{n,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,6}(\tilde{H}_n) - M_{0,6}) - k_{\gamma,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7}) \right]^2 \\
& + u^2(k_{n,\text{lin}}) \cdot \left[k_{n,E,\phi} \cdot (k_F \cdot M_{m,6}(\tilde{H}_n) - M_{0,6}) \right]^2 \\
& + u^2(k_F) \cdot \left[k_{n,E,\phi} \cdot (k_{n,\text{lin}} \cdot M_{m,6}(\tilde{H}_n) - k_{\gamma,\text{lin}} \cdot M_{m,7}) \right]^2 \\
& + u^2(M_{m,6}(\tilde{H}_n)) \cdot \left[k_{n,E,\phi} \cdot k_{n,\text{lin}} \cdot k_F \right]^2 \\
& + u^2(M_{0,6}) \cdot \left[-k_{n,E,\phi} \cdot k_{n,\text{lin}} \right]^2 \\
& + u^2(k_{\gamma,\text{lin}}) \cdot \left[-k_{n,E,\phi} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7}) \right]^2 \\
& + u^2(M_{m,7}) \cdot \left[-k_{n,E,\phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot k_F \right]^2 \\
& + u^2(M_{0,7}) \cdot \left[k_{n,E,\phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \right]^2
\end{aligned} \tag{NC.24}$$

mit

$$M_{m,6}(\tilde{H}_n) = \frac{1}{k_F} \cdot \left(\frac{\tilde{H}_n / k_{n,E,\phi} + k_{\gamma,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7})}{k_{n,\text{lin}}} + M_{0,6} \right) \tag{NC.25}$$

und

$$u^2(M_{m,6}(\tilde{H}_n)) = u^2(M_{0,6}) + (B_6 \cdot M_{m,6}(\tilde{H}_n))^2 \tag{NC.26}$$

Gleichung (NC.23) ist eine implizite Gleichung, die zweckmäßig mit dem Anfangswert $H_n^\# = 2 \cdot H_n^*$ iterativ gelöst werden kann. Diese Iteration ist fast immer konvergent, andernfalls ist das Messverfahren gänzlich ungeeignet.

NC.5.4.5 Grenzen des Vertrauensbereichs und bester Schätzwert

Die Vertrauensgrenzen $H_n^\triangleleft$ und $H_n^\triangleright$ werden nach den Gleichungen (29), (30) und (31) in 6.4 mit der Standardunsicherheit von H_n nach Gleichung (NC.15) berechnet.

Der beste Schätzwert $\hat{H}_n$ und die ihm zugeordnete Standardunsicherheit $u(\hat{H}_n)$ werden nach den Gleichungen (33) und (34) in 6.5 mit der Standardunsicherheit von H_n nach Gleichung (NC.15) berechnet.

NC.6 Anwendungsbeispiel zur Personendosimetrie mit Albedodosimetern

NC.6.1 Allgemeines

Zur Verdeutlichung der Anwendung dieser Norm wird ein numerisches Beispiel zur Ermittlung von H_γ und H_n sowie die Berechnung der charakteristischen Grenzen gegeben. Dabei werden Albedodosimeter mit dem Modell der Auswertung der Gleichungen (NC.1) und (NC.2) benutzt. Es gelten die Vorgaben aus Tabelle NC.1.

ANMERKUNG Um ein Nachvollziehen der Zwischenrechnungen zu ermöglichen, werden die Zwischenergebnisse mit einer größeren Anzahl von Dezimalstellen angegeben als dies in der Praxis für Endergebnisse sinnvoll ist. Die letzte Stelle kann gerundet sein.

Tabelle NC.1 – Angenommene Werte und Standardunsicherheiten der Eingangsgrößen bei der Ermittlung von H_γ und H_n mittels Albedodosimetern im Beispiel NC.6

Dosimeter	Eingangsgröße	Wert	Standardunsicherheit	Einheit
	t_e	60	4	d
	$\dot{M}_{\text{nat}}$	2	0,1	$\mu\text{Sv/d}$
	k_F	1,1	0,1	
^7Li	$M_{m,7}$	190	8,588	μSv
	$k_{\gamma,E,\phi}$	1	0,12	
	$k_{\gamma,\text{lin}}$	1	0,058	
	$M_{0,7}$	25	4	μSv
	B_7	0,04		
^6Li	$M_{m,6}$	300	12,649	μSv
	$k_{n,E,\phi}$	1,2	0,35	
	$k_{n,\text{lin}}$	1	0,058	
	$M_{0,6}$	25	4	μSv
	B_6	0,04		

NC.6.2 Ermittlung der charakteristischen Grenzen der Photonendosis

Zur Ermittlung der Photonendosis wird das Modell nach Gleichung (NC.1) in NC.5.2 herangezogen:

$$H_\gamma = k_{\gamma,E,\phi} \cdot \left[k_{\gamma,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7}) - \dot{M}_{\text{nat}} \cdot t_e \right] \quad (\text{NC.27})$$

Mit Gleichung (NC.27) und den Werten aus Tabelle NC.1 ergibt sich eine Photonendosis

$$H_\gamma = 1 \cdot \left[1 \cdot (1,1 \cdot 190 \mu\text{Sv} - 25 \mu\text{Sv}) - 2 \cdot 60 \mu\text{Sv} \right] = 64,0 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.28})$$

und mit Gleichung (NC.3) aus NC.5.3.1 die zugeordnete Varianz und Standardunsicherheit:

$$u^2(H_\gamma) = 739,1 \mu\text{Sv}^2 \quad (\text{NC.29})$$

$$u(H_\gamma) = 27,19 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.30})$$

Das zugehörige Unsicherheitsbudget ist in Tabelle NC.2 gegeben.

Tabelle NC.2 – Unsicherheitsbudget der Photonendosis zum Messwert H_γ

	Größe	Wert	Standardmess- unsicherheit	Sensitivitäts- koeffizient	Unsicher- heitsbeitrag
1	t_e	60 d	4 d	-2,0 μSv/d	8,0 μSv
2	$\dot{M}_{\text{nat}}$	2 μSv/d	0,1 μSv/d	-60,0 d	6,0 μSv
3	$M_{\text{m},7}$	190 μSv	8,588 μSv	1,1	9,447 μSv
4	$k_{\gamma,E,\phi}$	1	0,12	64,0 μSv	7,68 μSv
5	$k_{\gamma,\text{lin}}$	1	0,058	184,0 μSv	10,67 μSv
6	k_F	1,1	0,1	190,0 μSv	19,0 μSv
7	$M_{0,7}$	25 μSv	4 μSv	-1,0	4,0 μSv
	H_γ	64,0 μSv	Gesamtunsicherheit: $u(H_\gamma) = 27,19 \mu\text{Sv}^{*)}$		

*) Wurzel aus der Quadratsumme der Unsicherheitsbeiträge.

Dabei seien bis auf $M_{\text{m},7}$ alle Eingangsgrößen mit ihren zugeordneten Standardunsicherheiten im Rahmen der Kalibrierung des Dosimetriesystems und sonstiger qualitätssichernder Maßnahmen vorab ermittelt oder festgelegt worden und somit bekannt. Die Zahlenwerte dieser Größen sowie die aktuellen Werte der Dosisanzeige, der Expositionsdauer und ihrer aufgrund von Transport- und Lagerzeiten angenommenen Standardunsicherheiten sind in Tabelle NC.1 angegeben. Vorab wurden die Wahrscheinlichkeiten $\alpha = \beta = 0,05$ und $1 - \gamma = 0,95$ festgelegt.

Die Erkennungsgrenze wird nach Gleichung (NC.9) mit der Festlegung der Gleichung (NC.10) berechnet. Mit den Daten aus Tabelle NC.1 ergibt sich die Erkennungsgrenze:

$$H_\gamma^* = k_{1-\alpha} \cdot \tilde{u}(0) = 1,645 \cdot 19,78 \mu\text{Sv} = 32,54 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.31})$$

Tabelle NC.3 zeigt das entsprechende Unsicherheitsbudget für $\tilde{u}(0)$.

Die Erkennungsgrenze ist außer von den bei der Kalibrierung des Dosimetersystems ermittelten Größen auch von der Expositionsdauer t_e und deren Unsicherheit abhängig.

Tabelle NC.3 – Unsicherheitsbudget der Photonendosis an der Erkennungsgrenze H_γ^*

	Größe	Wert	Standardmess- unsicherheit	Sensitivitäts- koeffizient	Unsicher- heitsbeitrag
1	t_e	60 d	4 d	$-2,0 \mu\text{Sv/d}$	$8,0 \mu\text{Sv}$
2	$\dot{M}_{\text{nat}}$	$2 \mu\text{Sv/d}$	$0,1 \mu\text{Sv/d}$	$-60,0 \text{ d}$	$6,0 \mu\text{Sv}$
3	$M_{\text{m},7}$	$131,8 \mu\text{Sv}$	$6,618 \mu\text{Sv}$	1,1	$7,28 \mu\text{Sv}$
4	$k_{\gamma,E,\Phi}$	1	0,12	$0 \mu\text{Sv}$	$0 \mu\text{Sv}$
5	$k_{\gamma,\text{lin}}$	1	0,058	$120,0 \mu\text{Sv}$	$6,96 \mu\text{Sv}$
6	k_F	1,1	0,1	$131,82 \mu\text{Sv}$	$13,18 \mu\text{Sv}$
7	$M_{0,7}$	$25 \mu\text{Sv}$	$4 \mu\text{Sv}$	$-1,0$	$4,0 \mu\text{Sv}$
	$\tilde{H}_\gamma$	$0 \mu\text{Sv}$	Gesamtunsicherheit: $\tilde{u}(0) = 19,78 \mu\text{Sv}^{*)}$		

^{*)} Wurzel aus der Quadratsumme der Unsicherheitsbeiträge.

Die Nachweisgrenze wird nach Gleichung (NC.11) mit der Erkennungsgrenze nach Gleichung (NC.9) und den Festlegungen der Gleichungen (NC.12), (NC.13) und (NC.14) berechnet. Die implizite Gleichung (NC.11) wird durch Iteration gelöst. Als Anfangswert für die Iteration wird $H_\gamma^\# = 2 \cdot H_\gamma^* = 65,08 \mu\text{Sv}$ gewählt. Das Verfahren konvergiert, mit den Daten aus Tabelle NC.1 ist die Lösung im nachfolgenden Unsicherheitsbudget in Tabelle NC.4 angegeben.

Die Nachweisgrenze ist dann:

$$H_\gamma^\# = H_\gamma^* + k_{1-\beta} \cdot \tilde{u}(H_\gamma^\#) = 32,54 \mu\text{Sv} + 1,645 \cdot 29,50 \mu\text{Sv} = 81,06 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.32})$$

Die Nachweisgrenze ist mit dem Richtwert aus rechtlichen oder sonstigen Vorgaben zu vergleichen. Ist die Nachweisgrenze kleiner als der Richtwert, ist das Verfahren zur Bestimmung der Photonendosis in der Personendosimetrie geeignet.

Da H_γ mit $64,0 \mu\text{Sv}$ für das exponierte Dosimeter größer ist als die Erkennungsgrenze von $32,5 \mu\text{Sv}$, ist eine Photonendosis größer null erkannt worden.

Die anzugebenden Vertrauensgrenzen $H_\gamma^\triangleleft$ und $H_\gamma^\triangleright$ der Photonendosis werden zur Wahrscheinlichkeit $1 - \gamma = 0,95$ für den erhaltenen Wert der Photonendosis $H_\gamma = 64,0 \mu\text{Sv}$ mit der zugeordneten Standardunsicherheit $u(H_\gamma) = 27,2 \mu\text{Sv}$ berechnet (siehe NC.5.3.5). Aus der Standardnormalverteilung ergeben sich die Parameter

$$\omega = \Phi(H_\gamma / u(H_\gamma)) = \Phi(64,0 / 27,19) = \Phi(2,354) = 0,9907 \quad (\text{NC.33})$$

und

$$p = \omega \cdot (1 - \frac{\gamma}{2}) = 0,9907 \cdot (1 - \frac{0,05}{2}) = 0,9659 \Rightarrow k_p = 1,824 \quad (\text{NC.34})$$

sowie

$$q = 1 - \omega \cdot \frac{\gamma}{2} = 1 - 0,9907 \cdot \frac{0,05}{2} = 0,9752 \Rightarrow k_q = 1,964 \quad (\text{NC.35})$$

Tabelle NC.4 – Unsicherheitsbudget der Photonendosis an der Nachweisgrenze $H_\gamma^\#$

	Größe	Wert	Standardmess- unsicherheit	Sensitivitäts- koeffizient	Unsicher- heitsbeitrag
1	t_e	60 d	4 d	-2,0 $\mu\text{Sv/d}$	8,0 μSv
2	$\dot{M}_{\text{nat}}$	2 $\mu\text{Sv/d}$	0,1 $\mu\text{Sv/d}$	-60,0 d	6,0 μSv
3	$M_{\text{m},7}$	205,5 μSv	9,142 μSv	1,1	10,06 μSv
4	$k_{\gamma,E,\Phi}$	1	0,12	81,06 μSv	9,727 μSv
5	$k_{\gamma,\text{lin}}$	1	0,058	201,1 μSv	11,66 μSv
6	k_F	1,1	0,1	205,5 μSv	20,55 μSv
7	$M_{0,7}$	25 μSv	4 μSv	-1,0	4,0 μSv
	$H_\gamma^\#$	81,058 μSv	Gesamtunsicherheit: $\tilde{u}(H_\gamma^\#) = 29,50 \mu\text{Sv}^*)$		
*) Wurzel aus der Quadratsumme der Unsicherheitsbeiträge.					

Damit sind die Vertrauensgrenzen:

$$H_\gamma^\triangleright = H_\gamma - k_p \cdot u(H_\gamma) = 64,0 \mu\text{Sv} - 1,824 \cdot 27,19 \mu\text{Sv} = 14,40 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.36})$$

$$H_\gamma^\triangleleft = H_\gamma + k_q \cdot u(H_\gamma) = 64,0 \mu\text{Sv} + 1,964 \cdot 27,19 \mu\text{Sv} = 117,4 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.37})$$

Berechnung des besten Schätzwertes für die Photonendosis:

$$\begin{aligned} \hat{H}_\gamma &= H_\gamma + \frac{u(H_\gamma)}{\omega\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{H_\gamma^2}{2u^2(H_\gamma)}\right) \\ &= 64,0 \mu\text{Sv} + \frac{27,19 \mu\text{Sv}}{0,9907 \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{64,0^2 \mu\text{Sv}^2}{2 \cdot 27,19^2 \mu\text{Sv}^2}\right) = 64,69 \mu\text{Sv} \end{aligned} \quad (\text{NC.38})$$

Die zugehörige Standardunsicherheit ist:

$$\begin{aligned} u(\hat{H}_\gamma) &= \sqrt{u^2(H_\gamma) - (\hat{H}_\gamma - H_\gamma) \cdot \hat{H}_\gamma} \\ &= \sqrt{27,19^2 \mu\text{Sv}^2 - (64,69 \mu\text{Sv} - 64,0 \mu\text{Sv}) \cdot 64,69 \mu\text{Sv}} = 26,36 \mu\text{Sv} \end{aligned} \quad (\text{NC.39})$$

NC.6.3 Ermittlung der charakteristischen Grenzen der Neutronendosis

Zur Ermittlung der Neutronendosis wird das Modell nach Gleichung (NC.2) in NC.5.2 herangezogen:

$$H_n = k_{n,E,\Phi} \cdot \left[k_{n,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{\text{m},6} - M_{0,6}) - k_{\gamma,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{\text{m},7} - M_{0,7}) \right] \quad (\text{NC.40})$$

Mit Gleichung (NC.40) und den Werten aus Tabelle NC.1 ergibt sich eine Neutronendosis

$$H_n = 1,2 \cdot [1 \cdot (1,1 \cdot 300 - 25) - 1 \cdot (1,1 \cdot 190 - 25)] \mu\text{Sv} = 145,2 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.41})$$

und mit Gleichung (NC.15) in NC.5.4.1 die zugeordnete Varianz und Standardunsicherheit:

$$u^2(H_n) = 3\,036 \mu\text{Sv}^2 \quad (\text{NC.42})$$

$$u(H_n) = 55,10 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.43})$$

Das zugehörige Unsicherheitsbudget ist:

Tabelle NC.5 – Unsicherheitsbudget der Neutronendosis zum Messwert H_n

	Größe	Wert	Standardmess- unsicherheit	Sensitivitäts- koeffizient	Unsicher- heitsbeitrag
1	$M_{m,7}$	190 μSv	8,588 μSv	-1,32	11,34 μSv
2	$k_{\gamma,\text{lin}}$	1	0,058	-220,8 μSv	12,81 μSv
3	$M_{0,7}$	25 μSv	4 μSv	1,2	4,80 μSv
4	$M_{m,6}$	300 μSv	12,65 μSv	1,32	16,70 μSv
5	$k_{n,E,\phi}$	1,2	0,35	121,0 μSv	42,35 μSv
6	$k_{n,\text{lin}}$	1	0,058	366,0 μSv	21,23 μSv
7	k_F	1,1	0,1	132,0 μSv	13,20 μSv
8	$M_{0,6}$	25 μSv	4 μSv	-1,2	4,80 μSv
	H_n	145,2 μSv	Gesamtunsicherheit: $u(H_n) = 55,10 \mu\text{Sv}^*)$		

*) Wurzel aus der Quadratsumme der Unsicherheitsbeiträge.

Für dieses Beispiel seien bis auf $M_{m,7}$ und $M_{m,6}$ alle Eingangsgrößen mit ihren zugeordneten Standardunsicherheiten im Rahmen der Kalibrierung des Dosimetriesystems und sonstiger qualitätssichernder Maßnahmen vorab ermittelt oder festgelegt worden und somit bekannt. Die Zahlenwerte dieser Größen sowie die aktuellen Werte der Dosisanzeigen, der Expositionszeit und ihrer aufgrund von Transport- und Lagerzeiten angenommenen Unsicherheit sind in Tabelle NC.1 angegeben. Vorab wurden die Wahrscheinlichkeiten $\alpha = \beta = 0,05$ und $1 - \gamma = 0,95$ festgelegt.

Die Erkennungsgrenze wird nach Gleichung (NC.21) mit der Festlegung der Gleichungen (NC.22) berechnet. Es sollte beachtet werden, dass die Erkennungsgrenze für die Neutronendosis von der Photonendosis bzw. von der Dosisanzeige $M_{m,7}$ der Photonendosis abhängt. Mit den Daten aus Tabelle NC.1 ergibt sich die Erkennungsgrenze:

$$H_n^*(H_\gamma = 64,0 \mu\text{Sv}) = k_{1-\alpha} \cdot \tilde{u}(\tilde{H}_n = 0) = 1,645 \cdot 25,12 \mu\text{Sv} = 41,33 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.44})$$

Tabelle NC.6 zeigt das entsprechende Unsicherheitsbudget für $\tilde{u}(0)$.

Tabelle NC.6 – Unsicherheitsbudget der Neutronendosis an der Erkennungsgrenze H_n^*

	Größe	Wert	Standardmess- unsicherheit	Sensitivitäts- koeffizient	Unsicher- heitsbeitrag
1	$M_{m,7}$	190 μSv	8,588 μSv	-1,32	11,34 μSv
2	$k_{\gamma,\text{lin}}$	1	0,058	-220,8 μSv	12,81 μSv
3	$M_{0,7}$	25 μSv	4 μSv	1,2	4,8 μSv
4	$M_{m,6}$	190 μSv	8,588 μSv	1,32	11,34 μSv
5	$k_{n,E,\phi}$	1,2	0,35	0 μSv	0 μSv
6	$k_{n,\text{lin}}$	1	0,058	220,8 μSv	12,81 μSv
7	k_F	1,1	0,1	0 μSv	0 μSv
8	$M_{0,6}$	25 μSv	4 μSv	-1,2	4,8 μSv
	$\tilde{H}_n$	0 μSv	Gesamtunsicherheit: $\tilde{u}(0) = 25,12 \mu\text{Sv}^{*)}$		
*) Wurzel aus der Quadratsumme der Unsicherheitsbeiträge.					

ANMERKUNG 1 In einem reinen Neutronenfeld (also $H_\gamma = 0$) erreicht die Erkennungsgrenze der Neutronendosis ihr Minimum:

$$H_n^*(H_\gamma = 0 \mu\text{Sv}) = k_{1-\alpha} \cdot \tilde{u}(0) = 1,645 \cdot 18,03 \mu\text{Sv} = 29,66 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.45})$$

ANMERKUNG 2 Die Erkennungsgrenze der Neutronendosis hängt nicht explizit von der Expositionsdauer des Albedodosimeters ab, sondern nur implizit über die akkumulierte Photonendosis.

Die Nachweisgrenze wird nach Gleichung (NC.23) mit der Erkennungsgrenze nach Gleichung (NC.21) und den Festlegungen der Gleichungen (NC.24), (NC.25) und (NC.26) berechnet. Die implizite Gleichung (NC.23) wird durch Iteration gelöst. Als Anfangswert für die Iteration wird $H_n^\# = 2 \cdot H_n^* = 82,66 \mu\text{Sv}$ gewählt. Es sollte beachtet werden, dass die Nachweisgrenze für die Neutronendosis von der Photonendosis bzw. von der Dosisanzeige $M_{m,7}$ der Photonendosis abhängt. Das Verfahren konvergiert. Mit den Daten aus Tabelle NC.1 ist die Lösung im nachfolgenden Unsicherheitsbudget angegeben.

Tabelle NC.7 – Unsicherheitsbudget der Neutronendosis an der Nachweisgrenze $H_n^\#$

	Größe	Wert	Standardmess- unsicherheit	Sensitivitäts- koeffizient	Unsicher- heitsbeitrag
1	$M_{m,7}$	190 μSv	8,588 μSv	-1,32	11,34 μSv
2	$k_{\gamma,\text{lin}}$	1	0,058	-220,8 μSv	12,81 μSv
3	$M_{0,7}$	25 μSv	4 μSv	1,2	4,8 μSv
4	$M_{m,6}$	281,7 μSv	11,96 μSv	1,32	15,78 μSv
5	$k_{n,E,\phi}$	1,2	0,35	100,87 μSv	35,30 μSv
6	$k_{n,\text{lin}}$	1	0,058	341,84 μSv	19,83 μSv
7	k_F	1,1	0,1	110,0 μSv	11,0 μSv
8	$M_{0,6}$	25 μSv	4 μSv	-1,2	4,8 μSv
	$H_n^\#$	121,0 μSv	Gesamtunsicherheit: $\tilde{u}(H_n^\#) = 48,46 \mu\text{Sv}^*)$		

^{*)} Wurzel aus der Quadratsumme der Unsicherheitsbeiträge.

Die Nachweisgrenze ist dann

$$H_n^\# = H_n^* + k_{1-\beta} \cdot \tilde{u}(H_n^\#) = 41,33 \mu\text{Sv} + 1,645 \cdot 48,46 \mu\text{Sv} = 121,0 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.46})$$

Die Nachweisgrenze ist mit dem Richtwert aus rechtlichen oder sonstigen Vorgaben zu vergleichen. Ist die Nachweisgrenze kleiner als der Richtwert, ist das Verfahren zur Bestimmung der Neutronendosis in der Personendosimetrie geeignet.

Da H_n mit 145 μSv für das exponierte Albedodosimeter größer ist als die Erkennungsgrenze von 41,3 μSv , ist eine Neutronendosis größer null erkannt worden.

Die anzugebenden Vertrauensgrenzen $H_n^\triangleleft$ und $H_n^\triangleright$ der Neutronendosis werden zur Wahrscheinlichkeit $1 - \gamma = 0,95$ für den erhaltenen Wert der Neutronendosis $H_n = 145 \mu\text{Sv}$ mit der zugeordneten Standardunsicherheit $u(H_n) = 55,1 \mu\text{Sv}$ berechnet (siehe NC.5.4.5). Aus der Standardnormalverteilung ergeben sich die Parameter

$$\begin{aligned} \omega &= \Phi(H_n / u(H_n)) = \Phi(145,2 / 55,10) = \Phi(2,635) = 0,995\,8 \\ p &= \omega \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{2}\right) = 0,995\,8 \cdot \left(1 - \frac{0,05}{2}\right) = 0,970\,9 \Rightarrow k_p = 1,894 \\ q &= 1 - \omega \cdot \frac{\gamma}{2} = 1 - 0,995\,8 \cdot \frac{0,05}{2} = 0,975\,1 \Rightarrow k_q = 1,962 \end{aligned} \quad (\text{NC.47})$$

Damit sind die Vertrauensgrenzen:

$$H_n^\triangleleft = H_n - k_p \cdot u(H_n) = 145,2 \mu\text{Sv} - 1,894 \cdot 55,10 \mu\text{Sv} = 40,83 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.48})$$

$$H_n^\triangleright = H_n + k_q \cdot u(H_n) = 145,2 \mu\text{Sv} + 1,962 \cdot 55,10 \mu\text{Sv} = 253,3 \mu\text{Sv} \quad (\text{NC.49})$$

Berechnung des besten Schätzwertes für die Neutronendosis:

$$\begin{aligned}\hat{H}_n &= H_n + \frac{u(H_n)}{\omega\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{H_n^2}{2u^2(H_n)}\right) \\ &= 145,2 \mu\text{Sv} + \frac{55,10 \mu\text{Sv}}{0,9958 \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{145,2^2 \mu\text{Sv}^2}{2 \cdot 55,10^2 \mu\text{Sv}^2}\right) = 145,9 \mu\text{Sv}\end{aligned}\quad (\text{NC.50})$$

Die zugehörige Standardunsicherheit ist:

$$\begin{aligned}u(\hat{H}_n) &= \sqrt{u^2(H_n) - (\hat{H}_n - H_n) \cdot \hat{H}_n} \\ &= \sqrt{55,10^2 \mu\text{Sv}^2 - (145,9 \mu\text{Sv} - 145,2 \mu\text{Sv}) \cdot 145,9 \mu\text{Sv}} = 54,18 \mu\text{Sv}\end{aligned}\quad (\text{NC.51})$$

NC.7 Erläuterungen zu den Modellen bei Messungen mit Albedodosimetern

Da die Modellfunktionen (NC.1) und (NC.2) in NC.5.2 nicht unmittelbar aus der DIN 6802-4 ersichtlich sind, wird in diesem Anhang die Begründung für diese Modellfunktionen gegeben.

Nach DIN 6802-4 ergibt sich unter Ersetzung der individuellen unkorrigierten Nullanzeige $A_{0j}(\text{G})$ des Detektors j durch die mittlere unkorrigierte Nullanzeige $A_0(\text{G})$ der Charge (G):

$$H_\gamma = N_{\gamma,r}(n) \cdot k_j [A_j(\text{G}) - A_0(\text{G})] \quad (\text{NC.52})$$

Beim Einsatz des Albedodosimeters ist nicht immer mit Strahleneinfall überwiegend aus einer Richtung zu rechnen. Deshalb wird hier über DIN 6802-4 hinausgehend ein Richtungskorrektionsfaktor k_ϕ eingeführt:

Richtungs- und Energieabhängigkeit von Dosimetern sind eng miteinander verknüpft. Für Photonen ist der Korrektionsfaktor $k_{\gamma,E,\phi}$ für Energie und Richtung der Quotient des Kalibrierfaktors $N_\gamma(E,\phi)$ für ein Strahlungsfeld der Photonenenergie E , mit den Einfallswinkeln ϕ und dem Photonenkalibrierfaktor $N_{\gamma,r}(n)$ unter Referenzbedingungen:

$$k_{\gamma,E,\phi} = \frac{N_\gamma(E,\phi)}{N_{\gamma,r}(n)} \quad (\text{NC.53})$$

Da hier insbesondere sehr kleine Dosiswerte gemessen werden sollen, berücksichtigt der Korrektionsfaktor $k_{\gamma,\text{lin}}$ eventuelle Unterschiede des Kalibrierfaktors bei kleinen Dosen im Vergleich zum Photonenkalibrierfaktor $N_{\gamma,r}(n)$, der mit der Referenzdosis $H_{\gamma,\rho}$ ermittelt wird (siehe DIN 25483:2000-09 Gleichung (6)). Das Fadingverhalten der LiF-Detektoren wird durch einen Korrektionsfaktor k_F berücksichtigt.

$$\begin{aligned}H_\gamma &= k_{\gamma,E,\phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot k_j \cdot N_{\gamma,r}(n) \cdot [k_F \cdot A_j(\text{G}) - A_0(\text{G})] \\ &= k_{\gamma,E,\phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot [k_F \cdot k_j \cdot N_{\gamma,r}(n) \cdot A_j(\text{G}) - k_j \cdot N_{\gamma,r}(n) \cdot A_0(\text{G})] \\ &= k_{\gamma,E,\phi} \cdot k_{\gamma,\text{lin}} \cdot [k_F \cdot M_j(\text{G}) - M_0(\text{G})]\end{aligned}\quad (\text{NC.54})$$

In Gleichung (NC.54) wird abweichend von DIN 6802-4 mit M ein teilkorrigierter Dosiswert zur Anzeige A festgelegt:

$$M = k_j \cdot N_{\gamma,r}(n) \cdot A \quad (\text{NC.55})$$

Als neutronen- und photonenempfindliche Detektoren werden üblicherweise ^6LiF -Detektoren, als photonenempfindliche Detektoren ^7LiF -Detektoren verwendet. Deshalb wird (NG) durch den Index 6 und (G) durch den Index 7 ersetzt.

Bei Festkörperdosimetern wird die natürliche Strahlung von der Regenerierung bis zur Auswertung während der Expositionsdauer t_e aufintegriert. Die Anzeige der NG- und G-Detektoren wird täglich um einen Wert entsprechend einer Photonendosis von etwa $2 \mu\text{Sv}$ erhöht. Dieser Anteil der natürlichen Strahlung, der nach Strahlenschutzverordnung nicht zur beruflichen Strahlenexposition beiträgt, muss subtrahiert werden. Die Dosisleistung $\dot{M}_{\text{nat}}$ der natürlichen Strahlung wird mit dem gleichen Albedo-Dosimetriesystem gemessen.

Als endgültige Gleichung zur Ermittlung der Photonendosis ergibt sich dann aus Gleichung (NC.54):

$$H_\gamma = k_{\gamma,E,\phi} \cdot \left[k_{\gamma,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7}) - \dot{M}_{\text{nat}} \cdot t_e \right] \quad (\text{NC.56})$$

ANMERKUNG In DIN 6802-4 werden die Detektoren durch die Zugehörigkeit zu einer Charge (G) photonenempfindlicher Detektoren oder zu einer Charge (NG) neutronen- und photonenempfindlicher Detektoren und jeweils einer Detektornummer definiert. Systembedingt ist es möglich, dass Detektoren durch eine Detektorkartenummer und Detektorposition definiert werden.

Nach den Gleichungen (A.1) und (B.8) in DIN 6802-4:1998-04 ergibt sich unter Ersetzung der individuellen unkorrigierten Nullanzeigen $A_{0k}(\text{NG})$ und $A_{0j}(\text{G})$ der Detektoren j und k durch die mittlere unkorrigierte Nullanzeige $A_0(\text{NG})$ und $A_0(\text{G})$ der Chargen (NG) und (G):

$$H_n = k_n \cdot k_{nr} \cdot N_{\gamma,r}(n) \cdot \left[k_k \cdot (A_k(\text{NG}) - A_0(\text{NG})) - k_j \cdot (A_j(\text{G}) - A_0(\text{G})) \right] \quad (\text{NC.57})$$

Mit Hilfe der Korrekturfaktoren k_n und k_{nr} kann der Neutronenkalibrierfaktor N_n für das Strahlungsfeld beim Anwender auf den Photonenkalibrierfaktor $N_{\gamma,r}(n)$ für das Referenzfeld (z. B. einer Cs-137-Quelle) zurückgeführt werden.

$$N_n = k_n k_{nr} \cdot N_{\gamma,r} \quad (\text{NC.58})$$

Mit den Korrekturfaktoren k_n und k_{nr} ist der auf das Neutronenstrahlungsfeld (N1 bis N4) beim Anwender bzw. auf die Strahlungsenergie bezogene Neutronenkorrekturfaktor $k_{n,E}$:

$$k_n \cdot k_{nr} = \frac{N_n}{N_{\gamma,r}} = k_{n,E} \quad (\text{NC.59})$$

Auch hier wird ein Richtungskorrekturfaktor $k_{n,\phi}$ eingeführt und zusammen mit den Korrekturfaktoren für die Energie und die Dosimetriesysteme zu einem Faktor vereint:

$$k_{n,E,\phi} = k_n \cdot k_{nr} \cdot k_{n,\phi} \quad (\text{NC.60})$$

Es gilt analog zum Korrekturfaktor $k_{\gamma,\text{lin}}$ ein Korrekturfaktor $k_{n,\text{lin}}$ für die Linearität der Dosisanzeige bei kleinen Dosen im Vergleich zur Referenzdosis bei der Kalibrierung. Ferner wird auch hier ein Fadingfaktor berücksichtigt. Der Korrekturfaktor $k_{n,\text{lin}}$ ist im Allgemeinen gleich nach einer Neutronen- oder Photonenbestrahlung. Gleichung (NC.57) erweitert sich damit zu:

$$H_n = k_{n,E,\phi} \cdot \left[k_{n,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,6} - M_{0,6}) - k_{\gamma,\text{lin}} \cdot (k_F \cdot M_{m,7} - M_{0,7}) \right] \quad (\text{NC.61})$$

NC.8 Literaturhinweise

- [NC1] Bauer, B. W., Alberts, W. NC., Luszik-Bhadra, M., Siebert, B. R. L.: *Experimental investigation into the influence of neutron energy, angle of incidence, and phantom shape on the response of individual neutron dosimeters: detailed analysis of results for the albedo neutron dosimeter in use at the PTB*. Bericht PTB-N-2, PTB, Braunschweig, 1990.
- [NC2] Piesch, E., Burgkhardt, B.: *Environmental monitoring: European Interlaboratory Test Programs for Integrating Dosimeter Systems*. Radiological Protection 29, EUR 8932, CEC (Luxemburg) 1984.

Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung – Grundlagen und Anwendungen

Einleitung

Die nach dieser Norm mittels statistischer Tests und vorgegebener Wahrscheinlichkeiten festzulegenden Grenzen gestatten es, Nachweismöglichkeiten für eine Messgröße und den durch diese Messgröße quantifizierten physikalischen Effekt wie folgt zu beurteilen:

- Die „Erkennungsgrenze“ erlaubt eine Entscheidung darüber, ob der durch die Messgröße quantifizierte physikalische Effekt vorliegt oder nicht.
- Die „Nachweisgrenze“ gibt an, welcher kleinste wahre Wert der Messgröße mit einem anzuwendenden Messverfahren noch nachgewiesen werden kann. Sie erlaubt damit eine Entscheidung darüber, ob das Messverfahren gestellten Anforderungen genügt und damit für den vorgesehenen Messzweck geeignet ist oder nicht.
- Die „Vertrauensgrenzen“ schließen im Fall, dass das Vorliegen des physikalischen Effektes erkannt wird, einen Vertrauensbereich ein, der mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit den wahren Wert der Messgröße enthält.

Die genannten Grenzen werden im Folgenden zusammenfassend „charakteristische Grenzen“ genannt.

Weil der Messunsicherheit in dieser Norm eine wichtige Rolle zukommt, werden die Auswertung von Messungen und die Behandlung von Messunsicherheiten nach den allgemeinen Verfahren gemäß ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO/IEC GUIDE 98-3:1995)* (siehe auch Literaturhinweise [1], [2]) durchgeführt. Dies ermöglicht die strikte Trennung der Auswertung der Messungen einerseits (Abschnitt 5) und der Festlegung und Berechnung der charakteristischen Grenzen andererseits (Abschnitt 6). Diese Norm basiert auf der Bayes-Statistik, d. h. entsprechend [6] bis [19] können bei ihrer Anwendung auch solche unsichere Größen und Einflüsse berücksichtigt werden, die sich bei mehrmals wiederholten oder bei zählenden Messungen nicht zufällig verhalten.

Es werden Gleichungen für die Berechnung der charakteristischen Grenzen für eine Kernstrahlungs-Messgröße über die Standardmessunsicherheit der Messgröße (im Folgenden „Standardunsicherheit“ genannt) angegeben. Dabei werden sowohl Standardunsicherheiten der Messung als auch solche der Probenbehandlung, der Kalibrierung der Messeinrichtung und anderer Einflüsse berücksichtigt. Letztere Standardunsicherheiten werden aber als aus Voruntersuchungen bekannt angenommen.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm legt im Bereich der Metrologie ionisierender Strahlung „Erkennungsgrenze“, „Nachweisgrenze“ und „Vertrauensgrenzen“ für eine nichtnegative Messgröße der ionisierenden Strahlung fest, wobei sich die Messgröße aus einer Bruttozählrate und einer Nulleffektzählrate sowie weiteren Größen aufgrund eines Modells der Auswertung ergibt. Speziell kann die Messgröße die Nettozählrate als Differenz der Bruttozählrate und der Nulleffektzählrate oder die Nettoaktivität einer Probe sein. Sie kann auch durch Kalibrierung der Messeinrichtung, Probenbehandlung und andere Faktoren beeinflusst sein.

Diese Norm gilt auf gleiche Weise auch bei

- zählenden Messungen an bewegten Objekten (siehe Anhang B, B.2),
- Messungen mit linearen, analog arbeitenden Zählratenmessgeräten (im Folgenden Ratemeter genannt, siehe Anhang B, B.3),
- wiederholten zählenden Messungen mit zufälligen Einflüssen (siehe Anhang B, B.4),
- zählenden Messungen an Filtern während der Anreicherung radioaktiver Stoffe (siehe Anhang B, B.5),

- zählenden spektrometrischen Vielkanal-Messungen, wenn einzelne Linien im Spektrum zu betrachten sind und keine Ausgleichsrechnung, z. B. Entfaltung, durchzuführen ist (siehe Anhang C, C.2 bis C.4),
- zählenden spektrometrischen Vielkanal-Messungen aus der Anwendung von Ausgleichsrechnungen (siehe Anhang C, C.5), insbesondere bei alpha- und gamma-spektrometrischen Messungen (siehe Anhang C; C.5.5 bzw. C.5.6).

Sinngemäß gilt diese Norm auch bei anderen Messungen gleich welcher Art, wenn dasselbe Modell der Auswertung anzuwenden ist. In diesem Sinne ist sie auch anwendbar für Messungen mit Albedodosimetern [18]. Weitere praktische Beispiele können in anderen ISO-Normen gefunden werden, z. B. ISO 18589 [21], ISO 9696 [22], ISO 9697 [23], ISO 9698 [24], ISO 9699 [25], ISO 10703 [26], ISO 7503 [27] und ISO 28218 [28].

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 31-0:1992, *Quantities and units – Part 0: General principles*

ISO 31-9:1992, *Quantities and units – Part 9: Atomic and nuclear physics*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO/IEC GUIDE 98-3:1995)^{N1)}*

ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*

ISO 3534-1 *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: General statistical terms and terms used in probability*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe und jene aus ISO 31-0, ISO 31-9, ISO/IEC GUIDE 98-3, ISO/IEC Guide 99 und ISO 3534-1.

3.1

Messverfahren

(en: measurement procedure)

Menge genau beschriebener Prozeduren, die zur Ausführung einer bestimmten Messung gemäß einer gegebenen Methode durchgeführt werden

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.6]

3.2

Messgröße

(en: measurand)

zu messende physikalische Größe

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.3]

ANMERKUNG In dieser Norm ist die Messgröße nichtnegativ und quantifiziert einen Kernstrahlungseffekt. Der Effekt liegt nicht vor, wenn der wahre Wert der Messgröße null ist. Ein Beispiel für eine Messgröße ist die Intensität einer Linie in einem Spektrum über dem Untergrund bei einer spektrometrischen Messung.

^{N1)} Nationale Fußnote: Siehe DIN V ENV 13005:1999-06, *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen; Deutsche Fassung ENV 13005:1999*.

Für Strahlungsmessungen siehe auch DIN VDE 0493 Bbl 2 (VDE 0493 Bbl 2):2007-06, *Strahlenschutz-Messgeräte – Bestimmung der Unsicherheit beim Messen (IEC/TR 62461:2006)*.