

DIN ISO 20785-1



ICS 17.240; 49.020

Einsprüche bis 2016-09-06

Entwurf

**Dosimetrie für die Belastung durch kosmische Strahlung in
Zivilluftfahrzeugen –
Teil 1: Konzeptionelle Grundlage für Messungen (ISO 20785-1:2012);
Text Deutsch und Englisch**

Dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircraft –
Part 1: Conceptual basis for measurements (ISO 20785-1:2012);
Text in German and English

Dosimétrie pour l'exposition au rayonnement cosmique à bord d'un avion civil –
Partie 1: Fondement théorique des mesurages (ISO 20785-1:2012);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2016-05-06 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nar@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR) (Hausanschrift: Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main).

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

Gesamtumfang 68 Seiten

DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR)

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich.....	6
2 Begriffe	6
2.1 Allgemeines	6
2.2 Größen und Einheiten.....	8
2.3 Atmosphärisches Strahlungsfeld.....	15
3 Allgemeine Betrachtungen.....	17
3.1 Allgemeine Beschreibung des kosmischen Strahlungsfelds in der Atmosphäre.....	17
3.2 Allgemeine Betrachtungen zur Kalibrierung für die Dosimetrie von kosmischen Strahlungsfeldern in Luftfahrzeugen	18
3.2.1 Vorgehensweise	18
3.2.2 Betrachtungen bezüglich der Messung.....	18
3.2.3 Betrachtungen bezüglich des Strahlungsfelds.....	19
3.2.4 Betrachtungen bezüglich der Kalibrierung	20
3.2.5 Simulierte Felder in Luftfahrzeugen	20
3.3 Umrechnungskoeffizienten.....	21
4 Dosimetrische Geräte.....	21
4.1 Einführung	21
4.2 Aktive Geräte.....	21
4.2.1 Geräte zur Bestimmung aller Feldkomponenten	21
4.2.2 Geräte für Niedrig-LET/nicht-neutronenartige Strahlung.....	23
4.2.3 Geräte für Hoch-LET/neutronenartige Komponente	24
4.3 Passive Geräte.....	25
4.3.1 Allgemeine Betrachtungen.....	25
4.3.2 Ätzspurdetektoren.....	26
4.3.3 Spaltfoliendetektoren	26
4.3.4 Neutronendetektoren mit überhitzter Emulsion (Blasen-Detektoren).....	27
4.3.5 Thermolumineszenzdetektoren	27
4.3.6 Photolumineszenzdetektoren	27
Anhang A (informativ) Repräsentative spektrale Teilchenflussdichten im Feld der kosmischen Strahlung in den Reise Flughöhen bei einem solaren Minimum und einem solaren Maximum und bei einer kleinsten und einer größten vertikalen Abschneidesteifigkeit [80].....	28
Literaturhinweise.....	32
 Bilder	
Bild 1 — Berechnete Umgebungs-Äquivalentdosisleistung als Funktion der barometrischen Standardhöhe in hohen geographischen Breiten im solaren Minimum für verschiedene Teilchenkomponenten der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre	18
Bild A.1 — Normierte spektrale Teilchenflussdichte von Neutronen.....	28
Bild A.2 — Normierte spektrale Teilchenflussdichte von Protonen	29

Bild A.3 — Normierte spektrale Teilchenflussdichte geladener Pionen	29
Bild A.4 — Normierte spektrale Teilchenflussdichte von Elektronen.....	30
Bild A.5 — Normierte spektrale Teilchenflussdichte von Photonen.....	30
Bild A.6 — Normierte spektrale Teilchenflussdichte von Myonen	31

Nationales Vorwort

Die Internationale Norm ISO 20785-1:2012 *Dosimetrie for exposures to cosmic radiation in civilian aircraft - Part 1: Conceptual basis for measurements*, ist unverändert in diesen Normentwurf übernommen worden.

Die Internationale Norm wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 85 „Kernenergie“, Unterkomitee SC 2 „Strahlenschutz“, der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet.

Diese zweite Ausgabe ersetzt die erste Ausgabe (ISO 20785-1:2006), die technisch überarbeitet wurde.

Das zuständige deutsche Gremium ist der Arbeitsausschuss NA 080-00-01 AA „Dosimetrie“ des DIN - Normenausschusses Radiologie (NAR) in Arbeitsgemeinschaft mit der Deutschen Röntgengesellschaft und in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin e. V. (DGN), der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik e. V. (DGMP) und der Deutschen Gesellschaft für Radioonkologie e. V. (DEGRO).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des ISO 20785 entsprechend der diesbezüglich durch ISO erteilten Erlaubnis beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen ISO-Text.

DIN ISO 20785 *Dosimetrie zu Expositionen durch kosmische Strahlung in Zivilluftfahrzeugen* besteht aus:

- Teil 1: Konzeptionelle Grundlage für Messungen
- Teil 2: Charakterisierung des Ansprechvermögens von Messinstrumenten

Dosimetrie für die Belastung durch kosmische Strahlung in Zivilluftfahrzeugen — Teil 1: Konzeptionelle Grundlage für Messungen

Einleitung

Flugzeugbesatzungen sind erhöhter kosmischer Strahlung von solaren oder galaktischen Ursprungs ausgesetzt, sowie der Sekundärstrahlung, die in der Atmosphäre, in der Struktur des Flugzeugs und seinen Inhalten erzeugt wird. Nach Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission in der Publikation 60 [1], die in der Publikation 103 [2] bestätigt wurden, hat die Europäischen Union (EU) eine überarbeitete Richtlinie ihrer grundlegenden Sicherheitsnormen [3] eingeführt, die eine Exposition durch natürliche Quellen ionisierender Strahlung, einschließlich der kosmischen Strahlung, als berufliche Strahlenexposition beinhaltet. Die Richtlinie fordert, dass die Strahlenexposition der Besatzungen von Flugzeugen zu berücksichtigen ist, falls diese zu mehr als 1 mSv pro Jahr führt. In diesem Fall werden folgende vier Schutzmaßnahmen festgelegt: (i) die Strahlenexposition der betreffenden Besatzung zu erfassen; (ii) die erfasste Exposition bei der Festlegung der Arbeitspläne zu berücksichtigen, mit dem Ziel, die Dosis von besonders hoch exponierten Besatzungen zu verringern; (iii) die betroffenen Beschäftigten hinsichtlich der berufsbedingten Gesundheitsrisiken zu informieren und (iv) denselben besonderen Schutz für weibliche Mitglieder der Besatzung während einer Schwangerschaft in Hinsicht auf das „ungeborene Kind“ zu anzuwenden, wie für weibliche Beschäftigte anderer Berufsgruppen. Die Richtlinie des Rates der EU ist bereits in Gesetze und Vorschriften der EU-Mitgliedsstaaten umgesetzt worden und wird derzeit in die Luftfahrt-Sicherheitsnormen und -abläufe der *Joint Aviation Authorities* und der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (*European Air Safety Agency*) übernommen. Andere Länder, z. B. Kanada und Japan, haben für ihre Luftfahrtindustrien Empfehlungen für den Umgang mit der Strahlenexposition von Flugzeugbesatzungen herausgegeben.

Für Rechts- und Verwaltungszwecke sind die wichtigsten Größen für den Strahlungsschutz die Organ-Äquivalentdosis für den Fötus und die effektive Dosis. Eine Exposition des Körpers durch kosmische Strahlung erfolgt im Wesentlichen homogen; der Bauch der Mutter bietet keine effiziente Abschirmung für den Fötus. Daher kann der Betrag der Organ-Äquivalentdosis für den Fötus mit dem Betrag der von der Mutter aufgenommenen effektiven Dosis gleichgesetzt werden. Die an Bord eines Flugzeugs zu erwartenden Dosen sind im Allgemeinen vorhersagbar, und Ereignisse, die mit einer unplanmäßigen Exposition an anderen radiologischen Arbeitsplätzen vergleichbar sind, können üblicherweise nicht auftreten (mit der seltenen Ausnahme von Ereignissen von sehr intensiven und energiereichen solaren Teilchenausbrüchen (*solar particle events*; SPE)). Die routinemäßige Anwendung von Personendosimetern wird nicht als notwendig erachtet. Ein bevorzugter Ansatz für die Erfassung der auf die Flugzeugbesatzung einwirkenden Dosen ist, falls notwendig, die direkte Berechnung der effektiven Dosis pro Zeiteinheit in Abhängigkeit von der geographischen Lage, der Flughöhe und der Phase des Sonnenzyklus mit den Daten der Flug- und Personalplanung so zu verbinden, dass für jedes einzelne Besatzungsmitglied ein Schätzwert der für ihn zutreffenden effektiven Dosis ermittelt werden kann. Dieser Ansatz wird von der Europäischen Kommission und der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) in der Publikation 75 [4] unterstützt.

Bei diesem Ansatz ist die Rolle der Berechnungen in der Strahlenschutzroutine einzigartig und es wird weitgehend akzeptiert, dass die berechneten Dosen durch Messungen validiert werden sollten. Die effektive Dosis ist nicht direkt messbar. Die interessierende operationelle Größe ist die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$. Die Validierung der erfassten Dosen, die in Form der effektiven Dosis ermittelt wurden, kann mittels Berechnungen der Umgebungs-Äquivalentdosisleistung oder der Flugrouten-Dosen als Umgebungs-Äquivalentdosis und Messungen dieser Größen, die auf nationale Normale rückführbar sind, erfolgen. Die Validierung der nach einem bestimmten Verfahren berechneten Umgebungs-Äquivalentdosis, kann als Validierung der mit demselben Computerprogramm berechneten effektiven Dosis angesehen werden. Jedoch muss dieser Schritt innerhalb des Verfahrens möglicherweise bestätigt werden. Alternativ

kann a priori festgelegt werden, dass die operationelle Größe Umgebungs-Äquivalentdosis ein guter Schätzwert für die effektive Dosis und die Organ-Äquivalentdosis für den Fötus für die betrachteten Strahlungsfelder ist, ähnlich dem Verfahren für strahlenexponierte Beschäftigte, in dem die Verwendung der operationellen Größe Personendosis zur Abschätzung der effektiven Dosis gleichermaßen gerechtfertigt ist. Die Umgebungs-Äquivalentdosisleistung in Abhängigkeit von geografischer Position, Höhe und Phase im Sonnenzyklus wird dann berechnet und mit den Flug- und Personalinformationen verknüpft.

Das Strahlungsfeld in einem Flugzeug in Flughöhen ist komplex, mit vielen Arten ionisierender Strahlung mit Energien bis zu vielen GeV. In einem solch komplexen Strahlungsfeld ist es schwierig, die Umgebungs-Äquivalentdosis zu bestimmen. In vielen Fällen sind die Methoden zur Ermittlung der Umgebungs-Äquivalentdosis in Flugzeugen mit den Verfahren vergleichbar, die an Hochenergiebeschleunigern von Forschungslaboratorien angewendet werden. Daher ist es möglich, dosimetrische Verfahren und Verfahren für die Kalibrierung von Dosismessgeräten sowie Techniken zur Beibehaltung der Rückführbarkeit der dosimetrischen Messungen auf nationale Normale zu empfehlen. Dosimetrische Messungen zur Bewertung der Umgebungs-Äquivalentdosis müssen unter Anwendung genauer und zuverlässiger Methoden durchgeführt werden, um die Qualität der Messwerte, die den Mitarbeitern und den Überwachungsstellen vorgelegt werden, sicherzustellen. Dieser Teil von ISO 20785 dient als konzeptionelle Grundlage für die Charakterisierung des Ansprechvermögens von Instrumenten zur Bestimmung der Umgebungs-Äquivalentdosis in Luftfahrzeugen.

Anforderungen an die Bestimmung und die Aufzeichnung der Exposition von Flugzeugbesatzungen durch kosmische Strahlung wurden in die nationale Gesetzgebung der EU-Mitgliedsstaaten und anderer Länder aufgenommen. Eine Harmonisierung der Methoden zur Bestimmung der Umgebungs-Äquivalentdosis und zur Kalibrierung der Geräte ist wünschenswert, um die Kompatibilität der mit diesen Geräten durchgeführten Messungen sicherzustellen.

Dieser Teil von ISO 20785 ist für die Anwendung durch staatlich angestellte Strahlenschutz-Mitarbeiter in Primär- und Sekundärkalibrierlaboratorien und für die Anwendung durch Industrieunternehmen vorgesehen, die mit der Bestimmung der Umgebungs-Äquivalentdosis für das fliegende Personal befasst sind.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von ISO 20785 dient als konzeptionelle Grundlage für die Bestimmung der Umgebungs-Äquivalentdosis zur Bestimmung der Exposition durch kosmische Strahlung in zivilen Luftfahrzeugen sowie für die Kalibrierung von für diesen Zweck verwendeten Instrumenten.

2 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe und Benennungen.

2.1 Allgemeines

2.1.1

Kalibrierung

(en: calibration)

Messprozess, bei dem unter festgelegten Bedingungen eine Beziehung zwischen dem richtigen Größenwert H_0 und dem angezeigten Wert G hergestellt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Kalibrierung kann in Form einer Feststellung, einer Kalibrierfunktion, eines Kalibrierdiagramms, einer Kalibrierkurve oder einer Kalibriertabelle ausgedrückt werden. In einigen Fällen kann eine Kalibrierung aus einer additiven oder multiplikativen Korrektur des angezeigten Werts unter Angabe der beigeordneten Messunsicherheit bestehen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Eine Kalibrierung sollte nicht mit der Justierung eines Messsystems, oft missverständlich als „Eigenkalibrierung“ bezeichnet, oder mit der Verifikation der Kalibrierung verwechselt werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Oft wird bereits allein der erste Schritt in der obigen Definition als Kalibrierung wahrgenommen.

2.1.2

Kalibrierkoeffizient

N_{coeff}

(en: calibration coefficient)

Quotient aus dem richtigen Wert der zu messenden Größe und der korrigierten Anzeige des Messgeräts

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Kalibrierkoeffizient ist gleichbedeutend dem Kalibrierfaktor, der mit der Gerätekonstanten multipliziert ist.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Kehrwert des Kalibrierkoeffizienten N_{coeff} ist das Ansprechvermögen.¹

Anmerkung 3 zum Begriff: Für die Kalibrierung einiger Geräte, z. B. Ionisationskammern, sind die Gerätekonstante und der Kalibrierfaktor nicht getrennt festgelegt, sondern werden zusammen als Kalibrierkoeffizient angewendet.

Anmerkung 4 zum Begriff: Um Verwechslungen zu vermeiden ist es erforderlich, die zu messende Größe zu benennen, z. B. der Kalibrierkoeffizient bezüglich der Fluenz N_{Φ} , der Kalibrierkoeffizient bezüglich der Kerma N_K , Kalibrierkoeffizient bezüglich der absorbierten Dosis N_D .

2.1.3

Anzeige

G

(en: indication)

Größenwert, der an einem Messgerät oder einem Messsystem angegeben wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Anzeige kann in visueller oder akustischer Form dargestellt oder zu einem anderen Gerät übertragen werden. Die Anzeige erfolgt häufig für analoge Ergebnisse durch die Stellung eines Zeigers an einem Display, für digitale Ergebnisse durch eine an einem Display angezeigte oder ausgedruckte Zahl, für kodierte Ergebnisse durch ein Codemuster oder für Maßverkörperungen durch die Zuordnung eines Größenwerts.

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein angezeigter Wert und der entsprechende gemessene Wert einer Größe sind nicht unbedingt Werte der Größe der gleichen Art.

2.1.4

Bezugsbedingungen

(en: reference conditions)

Betriebsbedingungen, die für die Prüfung der Leistungsfähigkeit einer Detektoranordnung oder für den Vergleich von Messungen vorgeschrieben sind

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Bezugsbedingungen stellen die Werte für die Einflussgrößen dar, für die das Ergebnis einer Kalibrierung ohne Korrektur gültig ist.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Wert der Messgröße kann in Abhängigkeit von den Eigenschaften der zu kalibrierenden Detektoranordnung frei ausgewählt werden. Die zu messende Größe ist keine Einflussgröße, kann jedoch das Kalibrierergebnis und das Ansprechvermögen beeinflussen.

1 Nationale Fußnote: Gilt nur unter Bezugsbedingungen.

2.1.5

Ansprechvermögen

R

(en: response)

Quotient aus der Anzeige G oder der korrigierten Anzeige G_{corr} und dem richtigen Wert der zu messenden Größe

Anmerkung 1 zum Begriff: Um Verwechslungen auszuschließen ist festzulegen, welcher der in der Definition für das Ansprechvermögen angegebenen Quotienten (für G oder für G_{corr}) verwendet wurde. Außerdem ist es zur Vermeidung von Verwechslungen notwendig, die zu messende Größe genauer anzugeben, beispielsweise das Ansprechvermögen bezogen auf die Fluenz R_{Φ} , bezogen auf die Kerma R_K oder bezogen auf die absorbierte Dosis R_D .

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Kehrwert des Ansprechvermögens ist unter den festgelegten Bedingungen gleich dem Kalibrierkoeffizienten N_{coeff} .

Anmerkung 3 zum Begriff: Der Wert für das Ansprechvermögen kann in Abhängigkeit vom Betrag der zu messenden Größe schwanken. In diesen Fällen bedeutet das, dass das Ansprechvermögen der Detektoranordnung nicht konstant ist.

Anmerkung 4 zum Begriff: Üblicherweise ändert sich das Ansprechvermögen mit der Energie- und der Richtungsverteilung der einfallenden Strahlung. Daher ist es hilfreich, das Ansprechvermögen als eine Funktion $R(E, \Omega)$ der Strahlungsenergie E und der Richtung $\vec{\Omega}$ der einfallenden monodirektionalen Strahlung anzusehen. $R(E)$ beschreibt die „Energieabhängigkeit“ und $R(\Omega)$ die „Winkelabhängigkeit“ des Ansprechvermögens; für die letztgenannte Abhängigkeit darf $\vec{\Omega}$ durch den Winkel α zwischen der Bezugsrichtung der Detektoranordnung und der Richtung eines externen monodirektionalen Feldes angegeben werden.

2.2 Größen und Einheiten

2.2.1

Teilchenfluenz

Fluenz

Φ

(en: particle fluence, fluence)

Anzahl dN von Teilchen an einem bestimmten Punkt im Raum, die in einen sphärischen Bereich eintreten, dividiert durch die Querschnittsfläche da dieses Bereichs:

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit der Fluenz ist m^{-2} ; eine häufig verwendete Einheit ist cm^{-2} .

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Energieverteilung der Teilchenfluenz Φ_E ist der Quotient aus $d\Phi$ und dE , wobei $d\Phi$ die Fluenz der Teilchen mit Energien zwischen E und $E+dE$ ist. Es gibt eine analoge Definition für die Richtungsverteilung Φ_{Ω} der Teilchenfluenz. Die vollständige Darstellung der doppelt-differenziellen Teilchenfluenz kann (mit Argumenten) als $\Phi_{E,\Omega}(E, \Omega)$ geschrieben werden, wobei die Variablen (Größen) für die Differenzierung durch Tiefstellung gekennzeichnet sind und die Symbole in den Klammern die Werte der Variablen beschreiben. Die Werte in den Klammern werden für spezielle Funktionswerte benötigt. So wird z. B. die Energieverteilung der Teilchenfluenz bei Energie $E = E_0$ als $\Phi_E(E_0)$ geschrieben. Falls keine speziellen Werte angegeben sind, können die Klammern weggelassen werden.

2.2.2

Teilchenflussdichte²

Flussdichte

Φ

(en: particle fluence rate, fluence rate)

Rate der Teilchenfluenz, ausgedrückt als

$$\Phi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2N}{da \cdot dt'}$$

Dabei ist $d\Phi$ die Zunahme der Teilchenfluenz während eines unendlich kleinen Zeitintervalls der Dauer dt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit der Teilchenflussdichte ist $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$; eine häufig verwendete Einheit ist $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

2.2.3

übertragene Energie

ε

(en: energy imparted)

für ionisierende Strahlung in Material eines bestimmten dreidimensionalen Bereichs ist

$$\varepsilon = \sum \varepsilon_i$$

wobei gilt:

ε_i ist Energie, die bei einer einzigen Wechselwirkung i deponiert wird; sie wird durch die folgende Gleichung angegeben: $\varepsilon_i = \varepsilon_{in} - \varepsilon_{out} + Q$, wobei:

ε_{in} ist die Energie der eintretenden ionisierenden Teilchen ohne die Ruheenergie,

ε_{out} ist die Summe der Energien aller ionisierender Teilchen beim Austritt aus der Wechselwirkung ohne die Ruheenergie, und

Q ist die Änderung der Ruheenergien des Nuklids und aller an der Wechselwirkung beteiligten Teilchen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die übertragene Energie ist eine stochastische Größe.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit der übertragenen Energie ist J.

2.2.4

mittlere übertragene Energie

$\bar{\varepsilon}$

(en: mean energy imparted)

die mittlere an die Materie übertragene Energie in einem gegebenen Bereich, ausgedrückt als

$$\bar{\varepsilon} = R_{in} - R_{out} + \sum Q$$

Dabei ist

2 Nationale Fußnote: Die im Anhang A verwendete spektrale Teilchenflussdichte ist in DIN 6814-2, 2000-07 definiert.

R_{in} Strahlungsenergie aller geladenen und aller ungeladenen ionisierender Teilchen, die in einen bestimmten Bereich eintreten,

R_{out} die Strahlungsenergie aller geladenen und aller ungeladenen ionisierender Teilchen, die aus einem bestimmten Bereich austreten, und

$\sum Q$ die Summe aller Änderungen der Ruheenergien der Nuklide und der Elementarteilchen, die in diesem Bereich auftreten

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Größe entspricht dem für die übertragene Energie erwarteten Wert.

Anmerkung 2 zum Begriff: Einheit für die mittlere übertragene Energie ist J.

2.2.5

spezifische übertragene Energie **spezifische Energie**

z

(en: specific energy imparted, specific energy)
für eine beliebige ionisierende Strahlung ist

$$z = \frac{\varepsilon}{m}$$

Dabei ist

ε die auf das bestrahlte Material übertragene Energie,

m ist die Masse dieses Materials.

Anmerkung 1 zum Begriff: Die spezifische übertragene Energie ist eine stochastische Größe.

Anmerkung 2 zum Begriff: Innerhalb der Grenzen eines kleinen Bereichs ist die mittlere spezifische übertragene Energie gleich der absorbierten Dosis.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die spezifische übertragene Energie kann das Ergebnis von einem oder mehreren Energie-depositionsereignissen sein.

Anmerkung 4 zum Begriff: Einheit für die spezifische Energie ist $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, das als Gray (Gy) bezeichnet wird.

2.2.6

Energiedosis

D

(en: absorbed dose)
für eine beliebige ionisierende Strahlung ist

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$$

Dabei ist

$d\bar{\varepsilon}$ die mittlere Energie, die durch ionisierende Strahlung auf ein Volumenelement des bestrahlten Materials mit der Masse dm übertragen wird, mit

$$\bar{\varepsilon} = \int D dm$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Für den Grenzfall eines kleinen Bereichs entspricht die mittlere spezifische Energie der Energiedosis.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit für die Energiedosis ist $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, das als Gray (Gy) bezeichnet wird.

2.2.7

Kerma (en: kinetic energy released per unit mass)

K

(en: kerma)

für indirekt ionisierende (ungeladene) Teilchen der Quotient aus der Energie dE_{tr} und der Masse dm , wobei dE_{tr} die Summe der kinetischen Anfangsenergien aller geladenen ionisierenden Teilchen ist, die durch ungeladene ionisierende Teilchen in einem Volumenelement des Materials freigesetzt werden, und dm ist die bestrahlte Masse dieses Volumenelements:

$$K = \frac{dE_{\text{tr}}}{dm}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Größe dE_{tr} schließt die kinetische Energie der geladenen Teilchen ein, die beim Zerfall der angeregten Atome oder Moleküle oder Nuklide emittiert werden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit für die Kerma ist $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, das als Gray (Gy) bezeichnet wird.

2.2.8

beschränktes lineares Energieübertragungsvermögen³

lineares Energieübertragungsvermögen

LET

L_{Δ}

(en: restricted linear energy transfer, linera energy transfer)

Quotient aus dE_{Δ} und der Wegstrecke dl , wobei dE_{Δ} die mittlere Energie ist, die ein ionisierendes geladenes Teilchen innerhalb einer kurzen Wegstrecke an das durchdrungene Material abgibt, beschränkt auf die unmittelbare Umgebung der Teilchenspur, abzüglich der Summe der kinetischen Energien von Sekundärelektronen, deren kinetische Energie größer ist als ein bestimmter Wert Δ ist:

$$L_{\Delta} = \frac{dE_{\Delta}}{dl}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Größe ist nicht vollständig definiert, sofern die maximale kinetische Energie der Sekundärelektronen Δ nicht festgelegt ist, deren Energie als „lokal deponiert“ anzusehen ist. Δ kann in eV angegeben werden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Das lineare Energieübertragungsvermögen wird oftmals abgekürzt als LET bezeichnet, dabei sollte jedoch ergänzend das tief gestellte Δ oder ein entsprechender Zahlenwert angegeben werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Einheit für das lineare Energieübertragungsvermögen ist $\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$; eine häufig verwendete Einheit ist $\text{keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

Anmerkung 4 zum Begriff: Wenn keine Abschneideenergie angegeben ist, wird der unbeschränkte lineare Energieübertragungsvermögen L_{∞} identisch mit dem linearen elektronischen Stoßbremsvermögen S_{el} , das einfach als L angegeben werden darf.

³ Nationale Fußnote: Hier ist in der englischen Originalversion ein Fehler in der Bezeichnung "unrestricted linear energy transfer". Es wurde unter 2.2.8 der „restricted linear energy transfer“ definiert.

2.2.9

Mess-Äquivalentdosis

H

(en: dose equivalent)

am betroffenen Punkt im Gewebe ist an der interessierenden Stelle des Gewebes ist

$$H = DQ,$$

Dabei ist

D die Energiedosis,

Q der Qualitätsfaktor an dieser Stelle, und

$$H = \int_{L=0}^{\infty} Q(L) D_L dL$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Q wird durch den unbeschränkten linearen Energieübertragungsvermögen L_{∞} (oft als L oder LET bezeichnet) der geladenen Teilchen bestimmt, die durch ein kleines Volumenelement (ein Bereich) an dieser Stelle hindurchgehen (der Wert von L_{∞} wird für geladene Teilchen in Wasser angegeben, nicht in Gewebe; der Unterschied ist jedoch gering). Die Äquivalentdosis an einem Punkt in Gewebe wird dann anhand der obigen Formel angegeben, wobei $D_L = dD/dL$ die Verteilung, bezogen auf L , für die Energiedosis am interessierenden Punkt ist.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Beziehung zwischen Q und L wird in der ICRP-Publikation 103 [2] angegeben.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Einheit für die Äquivalentdosis ist $J \cdot kg^{-1}$, das als Sievert (Sv) bezeichnet wird.

2.2.10

Dosisgemittelte spezifische Energie pro Ereignis

$\bar{z}_D$

(en: single-event dose-mean specific energy)

Erwartungswert

$$\bar{z}_D = \int_0^{\infty} z d_1(z) dz$$

wobei $d_1(z)$ die dosisbezogene Wahrscheinlichkeitsdichte von z ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Die dosisbezogene Wahrscheinlichkeitsdichte von z wird durch $d_1(z)$ angegeben, wobei $d_1(z) dz$ der Anteil der Energiedosis ist, die bei Einzelereignissen mit spezifischen Energien im Intervall von z bis $z+dz$ abgegeben wird.

2.2.11

lineale Energie

y

(en: lineal energy)

Quotient aus ε_S und $\bar{l}$, dabei ist ε_S die Energie, die an das Material in einem bestimmten Volumen durch ein einziges Ereignis einer Energiedeposition übertragen wird und $\bar{l}$ die mittlere Weglänge in diesem Volumen:

$$y = \frac{\varepsilon_S}{\bar{l}}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit für die lineale Energie ist $J \cdot m^{-1}$; eine häufig verwendete Einheit ist $keV \cdot \mu m^{-1}$.

2.2.12

dosisgemittelte lineale Energie

$\bar{y}_D$

(en: dose-mean lineal energy)

Erwartungswert

$$\bar{y}_D = \int_0^{\infty} y d(y) dy$$

wobei $d(y)$ die dosisbezogene Wahrscheinlichkeitsdichte von y ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Dosis für y wird mittels $d(y)$ angegeben, wobei $d(y) dy$ der Bruchteil der absorbierten Dosis ist, der bei Einzelereignissen mit einer linealen Energie im Bereich von y bis $y + dy$ übertragen wird.

Anmerkung 2 zum Begriff: Sowohl die dosisgemittelte lineale Energie als auch die Verteilung $d(y)$ sind von der Energiedosis und der Energiedosisleistung unabhängig.

2.2.13

Umgebungs-Äquivalentdosis

$H^*(10)$

(en: ambient dose equivalent)

Äquivalentdosis an einem Punkt in einem Strahlungsfeld, die in einem entsprechend aufgeweiteten und ausgerichteten Strahlungsfeld in der ICRU-Kugel in einer Tiefe von 10 mm auf einem dem ausgerichteten Strahlungsfeld entgegen gerichteten Radius erzeugt würde

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit für die Umgebungs-Äquivalentdosis ist $J \cdot kg^{-1}$, das als Sievert (Sv) bezeichnet wird.

2.2.14

Neutronenfluenz-zu-Umgebungs-Äquivalentdosis Konversionsfaktor

h^*_{ϕ}

(en: particle-fluence-to-ambient-dose-equivalent conversion coefficient)

Quotient aus Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ und der Teilchenfluenz ϕ

$$h^*_{\phi} = \frac{H^*(10)}{\phi}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit für den Koeffizienten zur Umrechnung der Teilchenfluenz in die Umgebungs-Äquivalentdosis ist $J \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$, das als $Sv \cdot m^2$ bezeichnet wird; eine häufig verwendete Einheit ist $pSv \cdot cm^2$.

2.2.15

Atmosphärentiefe

X_v

(en: atmosphere depth)

Masse einer Luftsäule über einer Einheitsfläche oberhalb eines Punkts in der Atmosphäre

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit der Atmosphärentiefe ist $kg \cdot m^{-2}$; eine häufig verwendete Einheit ist $g \cdot cm^{-2}$.

2.2.16

barometrische Standardhöhe

Druckhöhe

(en: standard barometric altitude)

mit einem nach der Internationalen Standardatmosphäre (ISA) (ISO 2533, *Standard Atmosphere*) kalibrierten barometrischen Höhenmesser, dessen Bezugshöhe auf 1 013,25 hPa gestellt ist, bestimmten Höhe

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Flugfläche wird manchmal als FL 350 angegeben, wobei die Zahl für ein Vielfaches von 100 ft der Druckhöhe auf Grundlage der ISA und einer Bezugshöheneinstellung von 1 013,25 hPa steht. In manchen Ländern werden Flugflächen jedoch in Metern angegeben. In diesem Fall sollten angemessene Umrechnungen vorgenommen werden, ehe die in dieser internationalen Norm angegebenen Daten angewandt werden.

2.2.17⁴

magnetische Steifigkeit

r

(en: magnetic rigidity)

Impuls pro Ladung (eines Teilchens in einem magnetischen Feld), angegeben durch:

$$r = \frac{p}{Ze}$$

Dabei ist:

p ist der Teilchenimpuls,

Z ist die Ladungszahl des Teilchens, und

e ist die Ladung des Protons

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Grundeinheit der magnetischen Steifigkeit ist Tesla · Meter (T·m) (= V·m⁻¹·s). Eine häufig verwendete Einheit ist V (oder GV) in einem Einheitensystem, in dem sowohl der Wert für die Lichtgeschwindigkeit c als auch der Wert für die Ladung des Protons e gleich 1 ist und die magnetische Steifigkeit durch pc/Ze gegeben ist.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die magnetische Steifigkeit kennzeichnet die Bahnen geladener Teilchen in Magnetfeldern. Alle Teilchen mit derselben magnetischen Steifigkeit haben in einem Magnetfeld gleiche Bahnen, unabhängig von Masse oder Ladung der Teilchen.

2.2.18

geomagnetische Abschneidesteifigkeit

Abschneidesteifigkeit

r_c

(en: geomagnetic cut-off rigidity, cut-off rigidity)

kleinste magnetische Steifigkeit, die ein einfallendes Teilchen haben kann, mit der es in ein geomagnetisches Feld noch eindringen, und eine bestimmte Position über der Erde erreichen kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Die geomagnetische Abschneidesteifigkeit hängt vom Einfallswinkel ab. Oftmals wird von einem vertikalen Strahlungseinfall auf die Erdoberfläche ausgegangen. In diesem Fall ist die vertikale geomagnetische Abschneidesteifigkeit die minimale magnetische Steifigkeit, die ein vertikal einfallendes Teilchen haben kann, um noch eine vorgegebene Position oberhalb der Erde zu erreichen.

2.2.19

vertikale geomagnetische Abschneidesteifigkeit

vertikale Abschneidesteifigkeit

Abschneidesteifigkeit

(en: vertical geomagnetic cut-off rigidity)

kleinste magnetische Steifigkeit, die ein vertikal einfallendes Teilchen haben kann, das noch eine bestimmte Position über der Erde erreicht

⁴ Nationale Anmerkung: Die Bezeichnung „ P “ für magnetische Steifigkeit wurde für die deutsche Übersetzung des Teil 1 geändert und der Definition 2.2.18 und dem Teil 2 dieser Norm angepasst.

2.3 Atmosphärisches Strahlungsfeld

2.3.1

kosmische Strahlung

(en: cosmic radiation, cosmic rays)

ionisierende Strahlung, die aus hochenergetischen Teilchen besteht, hauptsächlich aus vollständig ionisierten Atomen mit außerirdischem Ursprung, und aus durch diese Teilchen durch Wechselwirkung mit der Atmosphäre und anderer Materie erzeugten Teilchen

2.3.2

primäre kosmische Strahlung

(en: primary cosmic radiation, primary cosmic rays)

aus dem Weltall in die Erdumlaufbahn einfallende kosmische Strahlung

2.3.3

sekundäre kosmische Strahlung

(en: secondary cosmic radiation, secondary cosmic rays, cosmogenic particles)

Teilchen, die direkt oder in einer Kaskade von Reaktionen durch kosmische Primärstrahlung, die mit der Atmosphäre oder anderen Materialien in Wechselwirkung tritt, erzeugt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Zusammenhang mit dem Strahlenschutz und Strahlungsmessungen in Flugzeugen sind folgende Teilchen relevant: Neutronen, Protonen, Photonen, Elektronen, Positronen, Myonen und im geringeren Umfang Pionen und Atomkerne, die schwerer als Protonen sind.

2.3.4

galaktische kosmische Strahlung

GCR

(en: galactic cosmic radiation, galactic cosmic rays)

kosmische Strahlung, die ihren Ursprung außerhalb des Sonnensystems hat

2.3.5

solare kosmische Strahlung

solare Teilchen

(en: solar cosmic radiation, solar cosmic rays, solar particles)

kosmische Strahlung, die ihren Ursprung auf der Sonne hat

2.3.6

solares Teilchenereignis

SPE

(en: solar particle event)

energetische solare Teilchen mit einer hohen Teilchenflussdichte, die bei einer Sonneneruption in das Weltall ausgestoßen werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Solare Teilchenereignisse sind gerichtet.

2.3.7

Ground-Level Enhancement

GLE

(en: ground level enhancement)

plötzliche Zunahme kosmischer Strahlung, verbunden mit energiereichen solaren Teilchen, die am Boden von mindestens zwei Neutronenmonitorstationen, durch die gleichzeitige Zunahme von mehr als 1 % der über 5 Minuten gemittelten Zählrate beobachtet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein GLE tritt in Verbindung mit einem solaren Teilchenereignis auf, das durch die hohe Flussdichte von Teilchen mit einer hohen Energie (größer als 500 MeV) gekennzeichnet ist.

Anmerkung 2 zum Begriff: GLEs treten relativ selten auf, im Durchschnitt nur einmal jährlich. GLEs werden nummeriert; die erste Nummer wurde dem GLE im Februar 1942 vergeben.

2.3.8

solare Modulation

(en: solar modulation)

Veränderung des GCR-Strahlungsfelds (außerhalb der Magnetosphäre der Erde), die durch Veränderung der solaren Aktivität und daraus resultierender Veränderung des Magnetfelds in der Heliosphäre verursacht wird

2.3.9

Sonnenzyklus

(en: solar cycle)

Periode, während der die Sonnenaktivität schwankt und nacheinander Maxima in zeitlichen Abständen von durchschnittlich etwa 11 Jahren auftreten

Anmerkung 1 zum Begriff: Wenn die Umkehr der Polarität des Magnetfelds der Sonne in aufeinander folgenden Perioden von 11 Jahren berücksichtigt wird, kann für den vollständigen Sonnenzyklus, den Hale-Zyklus, eine Dauer von im Mittel etwa 22 Jahren angenommen werden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Sonnenfleckenzyklus, gemessen durch die Sonnenfleckenrelativzahl oder Wolf-Zahl, hat eine ungefähre Dauer von 11 Jahren; allerdings treten Schwankungen zwischen etwa 7 und 17 Jahren auf. Im Zusammenhang mit Geomagnetismus, Häufigkeit von Polarlichtern und anderen ionosphärischen Kennwerten wurde ein Zyklus von etwa 11 Jahren gefunden oder angedeutet. Der u-index der geomagnetischen Intensitätsvariationen zeigt eine der stärksten bekannten Korrelationen zur Sonnenaktivität.

2.3.10

relative Sonnenfleckenzahl

Wolf'sche Zahl

(en: relative sunspot number, Wolf number)

Maß für die Sonnenfleckenaktivität, berechnet aus dem Ausdruck $k(10g + f)$, wobei f die Anzahl der einzelnen Flecken, g die Anzahl der Gruppen von Flecken und k ein veränderlicher Faktor ist, der von der persönlichen Erfahrung des Beobachters bzgl. der Erkennung und je nach Observatorium (Lage und Geräteausrüstung) variiert

2.3.11

solares Maximum

(en: solar maximum)

Periode maximaler Sonnenaktivität während eines Sonnenzyklus, im Allgemeinen durch die Sonnenfleckenrelativzahl bestimmt

2.3.12

solares Minimum

(en: solar minimum)

Periode der minimalen Sonnenaktivität während eines Sonnenzyklus, im Allgemeinen durch die Sonnenfleckenrelativzahl bestimmt

2.3.13

Neutronenmonitor für kosmische Strahlung

Neutronenmonitor am Boden

GLNM (en: ground level neutron monitor)

(en: cosmic ray neutron monitor, ground level neutron monitor, cosmic radiation neutron monitor)

großer Detektor zur Messung der zeitabhängigen relativen Flussdichte hochenergetischer kosmischer Strahlung, besonders von Sekundärneutronen, die in der Atmosphäre erzeugt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Neutronenmonitore zum Nachweis kosmischer Strahlung, die weltweit an unterschiedlichen Standorten und in unterschiedlichen Höhenlagen auf dem Boden (und gelegentlich auf Schiffen oder Flugzeugen) installiert sind, werden für verschiedene Untersuchungen kosmischer Strahlung und zur Bestimmung der solaren Modulation verwendet.

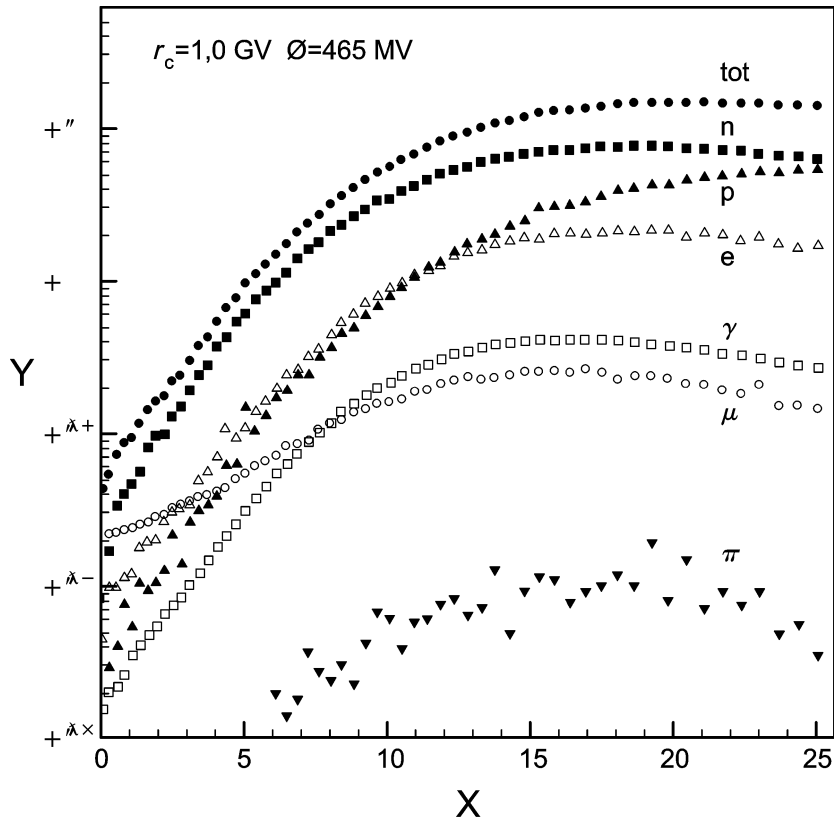
3 Allgemeine Betrachtungen

3.1 Allgemeine Beschreibung des kosmischen Strahlungsfelds in der Atmosphäre

Durch Wechselwirkungen primärer galaktischer kosmischer Strahlung (einschließlich energetischer solarer Teilchen) mit den Atomkernen der in der Atmosphäre vorhandenen Komponenten, wird eine Kaskade von Wechselwirkungen und sekundären Reaktionsprodukten erzeugt, die zur kosmischen Strahlungsexposition beitragen und sich mit der Eindringtiefe in die Atmosphäre von der Flughöhe bis auf Meereshöhe verringert [5][6]. Galaktische kosmische Strahlung (GCR) kann Energien bis zu 10^{20} eV haben, die meisten Teilchen haben jedoch eine geringere Energie. Nach dem Eindringen der GCR in das Magnetfeld des Sonnensystems hat die Energieverteilung einen Maximalwert in Abhängigkeit von der solaren magnetischen Aktivität von einigen Hundert MeV bis zu 1 GeV je Atomkern und folgt einer Potenzfunktion der Form $E^{-2,7}$ eV bis zu 10^{15} eV; oberhalb dieser Energie wird das Spektrum steiler bis zu E^{-3} . Die Flussdichte der in das Sonnensystem eintretenden GCR ist zeitlich nahezu konstant, und die Annäherung dieser energiereichen Ionen an die Erde erfolgt isotrop. Die Magnetfelder der Erde und der Sonne verändern die relative Anzahl der GCR-Protonen und der schweren Ionen, die in die Atmosphäre eintreten. Bei niedrigen geomagnetischen Abschneidesteifigkeiten und geringer Sonnenaktivität haben die GCR-Ionen ungefähr folgende Zusammensetzung: etwa 90 % Protonen, 9 % He-Ionen und 1 % schwerere Ionen; bei einer vertikalen Abschneidesteifigkeit von 15 GV verändert sich die Zusammensetzung so, dass etwa 83 % Protonen, 15 % He-Ionen und etwa 2 % schwerere Ionen vorliegen [7][8].

Die veränderlichen Beiträge zur Umgebungs-Äquivalentdosis, die durch die verschiedenen Bestandteile der sekundären kosmischen Strahlung in der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Höhe verursacht werden, sind in Bild 1 dargestellt. Auf Meereshöhe liefern Myonen den wichtigsten Beitrag zur Umgebungs-Äquivalentdosis und zur effektiven Dosis. In den Flughöhen sind Neutronen, Elektronen, Positronen, Protonen, Photonen und Myonen die wichtigsten Bestandteile. In größeren Höhen beginnt der Beitrag von Atomkernen, die schwerer als Protonen sind. Für alle wichtigen Teilchen wird in den Bildern im Anhang A die repräsentative normierte Energieverteilung der Flussdichte bei niedrigen und hohen Werten für Abschneidesteifigkeiten und Höhen und bei solaren Minima und Maxima dargestellt.

Die Erde ist auch Auswürfen energiereicher Protonen und schwererer Teilchen ausgesetzt, die bei magnetischen Störungen nahe der Sonnenoberfläche entstehen sowie dem Ausstoß großer Materiemengen (koronale Massenauswürfe; CME), in einigen Fällen gibt es eine Beschleunigung der Teilchen durch CMEs und Stoßwellen durch Sonnenwinde. Die Teilchen dieser solaren Teilchenereignissen oder solaren Protonenereignissen (beide heißen abgekürzt SPE, en: solar particle event bzw. solar proton event) haben eine viel geringere Energie als die GCR, im Allgemeinen unter 100 MeV und nur selten über 10 GeV. SPEs haben eine kurze Dauer von einigen Stunden bis zu einigen Tagen und sie zeigen große Intensitätsschwankungen. Nur ein kleiner Bruchteil der SPEs, im Mittel ein SPE pro Jahr, erzeugt eine große Anzahl von hochenergetischen Teilchen, die in großen Höhen und bei niedrigen geomagnetischen Abschneidesteifigkeiten signifikante Dosisleistungen verursachen und durch Neutronenmonitore am Boden beobachtet werden können. Ereignisse dieser Art werden als Ground Level Enhancements und abgekürzt als GLEs bezeichnet. Für das fliegende Personal ist die kumulative Dosis aus der GCR weit größer als die Dosis aus den SPEs. Intensive SPEs können die Dosisleistungen der GCR durch Störungen des Magnetfelds der Erde so beeinflussen, dass sich die Intensität galaktischer Teilchen bei Erreichen der Atmosphäre verändert.



Legende

X Höhe (km)

Y Umgebungs-Äquivalentdosisleistung (μSv/h)

Bedingungen: Abschneidesteifigkeit 1 GV und solares Minimum (Bremspotenzial ϕ von 465 MV) [9]

Bild 1 — Berechnete Umgebungs-Äquivalentdosisleistung als Funktion der barometrischen Standardhöhe in hohen geographischen Breiten im solaren Minimum für verschiedene Teilchenkomponenten der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre

3.2 Allgemeine Betrachtungen zur Kalibrierung für die Dosimetrie von kosmischen Strahlungsfeldern in Luftfahrzeugen

3.2.1 Vorgehensweise

In diesem Abschnitt wird die allgemeine Vorgehensweise für die Messung und Kalibrierung geschildert. Genaue Angaben zu Kalibrierfeldern und -verfahren sind in ISO 20785-2 enthalten.

3.2.2 Betrachtungen bezüglich der Messung

Die Umgebungs-Äquivalentdosis kann nicht mit herkömmlichen dosimetrischen Methoden gemessen werden [10]. Zudem ist bei dem hier betrachteten komplexen Strahlungsfeld (siehe Bild 1) die experimentelle Bestimmung der Umgebungs-Äquivalentdosis besonders schwierig. Ein näherungsweiser Ansatz besteht darin, einen gewebeäquivalenten Proportionalzähler (TEPC) zu verwenden, um die Äquivalentdosis auf eine kleine Gewebemasse zu messen. Dabei wird die Energiedosisverteilung der linealen Energie (als Näherung für LET) unter Anwendung von Korrekturfaktoren gemessen, und der LET-abhängige Qualitätsfaktor wird direkt angewandt. Allerdings wird auch bei dieser Messung nicht die richtige Messgröße dargestellt.

Für die Dosimetrie des Strahlungsfelds in Luftfahrzeugen sind spezielle Mess- und Berechnungsverfahren erforderlich. Die bevorzugte Vorgehensweise bestünde in der Verwendung von Geräten deren

Ansprechvermögen bzgl. der Umgebungs-Äquivalentdosis unabhängig von Energie und Richtung des gesamten Felds oder von den zu bestimmenden Feldkomponenten sind. Auf Grundlage von Daten zu den Energie- und Richtungseigenschaften des Felds sowie zum energie- und winkelabhängigen Ansprechverhalten des Geräts in Bezug auf die Umgebungs-Äquivalentdosis ist es allgemein erforderlich Korrekturen vorzunehmen.

3.2.3 Betrachtungen bezüglich des Strahlungsfelds

Das Strahlungsfeld besteht vorwiegend aus Photonen, Elektronen, Positronen, Myonen, Protonen und Neutronen. Energiereiche, schwere, geladene Primärteilchen oder Fragmente liefern keinen signifikanten Beitrag zur Äquivalentdosis. Die Elektronen, Positronen und Myonen sind direkt ionisierende Strahlung; zusammen mit indirekt ionisierenden Photonen und Sekundärelektronen wechselwirken sie über die elektromagnetische Wechselwirkung mit Materie. Neutronen (zusammen mit einem kleinen Beitrag durch Pionen) wechselwirken über die starke Wechselwirkung und erzeugen direkt ionisierende Sekundärteilchen. Protonen sind sowohl direkt ionisierend, über die elektromagnetische Wechselwirkung, und indirekt ionisierende über die starke Wechselwirkung.

Die direkt ionisierende Komponente und die Sekundärelektronen aus indirekt ionisierenden Photonen bilden zusammen die nicht-neutronenartige Komponente. Die Neutronen sowie die neutronenartigen Wechselwirkungen von Protonen stellen die Neutronenkomponente dar. Alternativ lässt sich für dosimetrische Zwecke das Feld in eine Niedrig-LET Komponente ($<10 \text{ keV}/\mu\text{m}$) und eine Hoch-LET Komponente ($\geq 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$) unterteilen. Diese Definition beruht auf der Abhängigkeit des Qualitätsfaktors vom LET. Unterhalb von $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ beträgt der Qualitätsfaktor Eins. Diese Trennung zwischen Niedrig- und Hoch-LET Teilchen kann für gewebeäquivalente Proportionalzähler und für andere Materialien und Detektoren beibehalten werden, wobei der Schwellenwert zwischen niedrigem und hohem LET zwischen $5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ und $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ schwanken kann.

Zu den Niedrig-LET Komponenten gehören die direkt ionisierenden Elektronen, Positronen, Myonen, Sekundärelektronen aus Wechselwirkungen mit Photonen, der größte Anteil der durch direkt ionisierende Wechselwirkungen von Protonen erhaltenen Energiedepositionen und ein Teil der Energiedeposition durch Sekundärteilchen aus der starken Wechselwirkung von Protonen und Neutronen. Die Hoch-LET Komponente stammt von relativ kurzreichweitigen Sekundärteilchen aus der starken Wechselwirkung der Protonen und Neutronen. Die relativen Beiträge zur Umgebungs-Äquivalentdosis von Niedrig-LET und Hoch-LET Teilchen sind nicht unbedingt gleich, aber im Allgemeinen liegen die Beiträge in einer ähnlichen Größenordnung.

Die Umgebungs-Äquivalentdosis als operationelle Dosisgröße bei diesen Bestimmungen wird durch das Ansprechvermögen eines gewebeäquivalenten Proportionalzählers (en: tissue-equivalent proportional counter, EPC), einer Rekombinations-Ionisationskammer oder eines Halbleiter-Spektrometers näherungsweise abgeschätzt. Eine ordnungsgemäße Kalibrierung und Normalisierung wird dabei vorausgesetzt.

Die Niedrig-LET Komponente oder die nicht-neutronenartige Energiedeposition kann mit Ionisationskammern, mit Siliziumdetektoren oder Szintillationsdetektoren oder aber mit passiven Lumineszenz- oder Ionen-Speicherdetektoren gemessen werden. Die Hoch-LET oder Neutronenkomponente kann mit Neutronendetektorsystemen mit erweitertem Messbereich oder Vielkugel-Spektrometern oder mit passiven Kernspurdetektoren, Blasendetektoren oder Spaltfolien mit einem Teilchenspurdetektor gemessen werden. Aus der Summe der Komponenten, Niedrig-LET Komponente plus Hoch-LET Komponente oder nicht-Neutronen- plus Neutronen- und neutronenartige Komponente, ergibt sich bei geeigneter Kalibrierung und Normierung die gesamte Umgebungs-Äquivalentdosis. Daher müssen die zur Messung komplexer Strahlungsfelder verwendeten Messgeräte durch das jeweilige nationale Metrologieinstitut nach Möglichkeit so charakterisiert sein, dass die Rückführbarkeit vollständig sichergestellt ist.

Die Definitionen von Begriffen und detaillierte Angaben, die für herkömmliche Verfahren für die Kalibrierung und der Verwendung der Messgeräte angewandt werden, sind in diversen ISO- und ICRU-Veröffentlichungen angegeben (z. B. ISO 4037-3 [87], ISO 8529-3 [88], ISO 20785-2 und ICRU-

Bericht 66:2001 [10]). Die Bestimmung der Messunsicherheiten bei einer Messreihe ist ein wichtiger Bestandteil der Dosimetrie. Unsicherheiten im Zusammenhang mit bestimmten dosimetrischen Verfahren sind oft nicht statistisch unabhängig. Selbst wenn sie unabhängig sind, ist die gesamte Unsicherheit oft nicht einfach das quadratische Mittel der einzelnen Unsicherheiten, sondern hängt vom Mess- und Analyseverfahren ab. Genauere Angaben hierzu sind dem ISO/IEC-Leitfaden 98-3 [83] zu entnehmen.

3.2.4 Betrachtungen bezüglich der Kalibrierung

Im Hinblick auf die Umgebungs-Äquivalentdosis tragen in erster Linie Neutronen mit Energien von einigen Hundert keV bis hin zu einigen GeV, Protonen mit Energien von einigen Zehn MeV bis hin zu einigen GeV, Elektronen, Positronen und Photonen mit Energien von einigen MeV bis hin zu einigen GeV zum Strahlungsfeld in Flughöhen bei. Die Bestimmung der Charakteristik der Ansprechvermögen von Geräten, die zur Bestimmung der Umgebungs-Äquivalentdosis in kosmischen Strahlungsfeldern in Luftfahrzeugen verwendet werden, sowie deren Energie- und Winkelabhängigkeiten, sollte nach Möglichkeit in ISO-Referenzstrahlungsfeldern durchgeführt werden. Allerdings decken die ISO-Referenzstrahlungsfelder nicht den gesamten Energiebereich von Photonen, Neutronen und Elektronen ab, die hauptsächlich zur gesamten Umgebungs-Äquivalentdosis beitragen. Somit sind zusätzliche Kalibrierfelder erforderlich, darunter für manche Geräte auch Protonenstrahlungsfelder.

Zur Bestimmung der Charakteristik des Ansprechvermögens bezüglich der hoch-energetischen Niedrig-LET Komponenten des Strahlungsfelds, für die keine Referenzfelder verfügbar sind, kann bei bestimmten Geräten – beispielweise bei gewebeäquivalenten Proportionalzählern (TEPC) – durch Messung und Berechnung nachgewiesen werden, dass die Details der Verteilung der Energieadepositionen im empfindlichen Volumen des Geräts denen eines ISO-Referenzfelds R-F für hoch-energetische Photonen ähneln. Damit wird auf die besondere Problematik im Zusammenhang mit Festlegung einer Niedrig-LET Schwelle bei TEPCs und anderen Geräten eingegangen [11][12][13]. Quasi-monoenergetische Neutronenfelder sind für Energien bis zu ca. 200 MeV verfügbar [14][15][16][17][18]. Zur Bestimmung der Charakteristik des Ansprechvermögens von Geräten bezüglich Neutronen bei höheren Energien können manchmal Messungen, jeweils in Verbindung mit Berechnungen, in monoenergetischen Protonenstrahlen oder in Neutronenfeldern mit breiter Energieverteilung durchgeführt werden.

Bei icht-ISO-Feldern können rückführbare Methode zur Messung der Teilchenfluenz, unter Anwendung von Fluenz-zu-Dosis Konversionsfaktoren, verwendet werden um auf die Umgebungs-Äquivalentdosis umzurechnen.

3.2.5 Simulierte Felder in Luftfahrzeugen

3.2.5.1 Felder mit Beschleunigern

Messungen des Ansprechvermögens von Messgeräten und Ringvergleiche können in einem simulierten kosmischen Neutronenstrahlungsfeld durchgeführt werden, das am CERN entwickelt wurde und dort bereitgestellt wird. Die Einrichtung wurde in Zusammenarbeit mit der Europäischen Kommission entwickelt und charakterisiert und ist unter dem Namen CERF (CERN-EU *high-energy Reference Field facility*) bekannt [19][20][21]. Die Felder werden durch hochenergetische Protonen- und Pionen-Strahlen mit Impulsen von entweder 120 GeV/c (positiv oder negativ) oder 205 GeV/c (positiv) erzeugt, die auf ein Kupfer-Target treffen. Es gibt eine massive Abschirmung aus Beton seitlich des Strahls an der Target-Position und, in Abhängigkeit von der Target-Position, Abschirmungen nach oben, die aus Eisen oder Beton bestehen. Die flächenbezogene Masse von 80 cm Betonabschirmungen ist nahezu die gleiche wie die der Luftschicht oberhalb der Flughöhen von 10 km bis 15 km. Gut charakterisierte Neutronenfelder gibt es sowohl an der Seite des Target-Bereichs, als auch an den Deckenabschirmungen. Die Neutronen-Komponente (zuzüglich andere Hadronen) des Strahlungsfelds wurde für alle Kalibrierpositionen mit dem Monte-Carlo-Simulationsprogramm FLUKA berechnet [22]. Eine Reihe von Messungen mit Vielkugel-Spektrometern wurde ebenfalls durchgeführt. Zurzeit ist die Metrologie des Felds nicht auf nationale Normale rückführbar.

3.2.5.2 Kosmische Strahlungsfelder auf Bergen

Die Felder der kosmischen Strahlung auf der Erdoberfläche, aber in großen Höhen über Normal Null, entsprechen am ehesten den Feldern in einem Flugzeug [23] [26], aber, wie bei den mit einem Beschleuniger erzeugten simulierten Feldern, kann in Flughöhen der Unterschied zwischen diesen und den Feldern in Flughöhen einen Einfluss auf Ringvergleiche und/oder die Auswertungen einiger Messgeräte haben und sollte berücksichtigt werden. Die Zusammensetzung und spektrale Fluenz des kosmischen Strahlungsfeldes auf der Erdoberfläche, sogar in Höhen bis zu 4 km, entsprechen nicht exakt der Zusammensetzung und der Fluenz der kosmischen Strahlung in Flughöhen. Der Anteil der Dosis von Myonen ist höher bei niedrigeren Flughöhen. Das Neutronenspektrum der kosmischen Strahlung auf der Erdoberfläche hat relativ mehr Neutronen mit Energien über 10 MeV, weniger mit Energien von 1 eV bis etwa 2 MeV und mehr bei thermischen Energien [27]. Unterschiedliche Materialien der „Erdoberfläche“ — Erde, Wasser oder Schnee, Beton oder sonstige Baustoffe — streuen die Neutronen unterschiedlich und beeinflussen die Form des Neutronenspektrums.

3.3 Umrechnungskoeffizienten

Die Fluenz-zu-Umgebungs-Äquivalentdosis Konversionskoeffizienten hängen von Art und Energie des Teilchens ab. Die Daten bis zu 20 MeV sind gut etabliert und Teil internationaler Empfehlungen (ISO, IEC, ICRU [28]). Eine Zusammenstellung von Fluenz-zu-Umgebungs-Äquivalentdosis Konversionskoeffizienten für alle relevanten Teilchen und Energien kann aus dem Literaturverweis [29] entnommen werden.

4 Dosimetrische Geräte

4.1 Einführung

Die Detektoren, die für Messungen zur Bestimmung der Umgebungs-Äquivalentdosis an Bord von Luftfahrzeugen verwendet werden können, ähneln in ihrer Art den Geräten, die in Beschleunigerlaboren verwendet werden. Sie lassen sich in aktive und passive Instrumente oder nach gemessener Feldkomponente kategorisieren (siehe z. B. Literaturverweis [30]). In dieser Norm wird die Grundlage für die Verwendung der Instrumente zur Bestimmung der Umgebungs-Äquivalentdosis bereitgestellt.

4.2 Aktive Geräte

4.2.1 Geräte zur Bestimmung aller Feldkomponenten

4.2.1.1 Energiedepositions-Spektrometer

Die zwei wichtigsten Arten von Energiedepositions-Spektrometern sind zum einen gasgefüllte Geräte – hier besonders die gewebeäquivalente Proportionalzähler (TEPCs) – und Festkörpergeräte (in der Regel Silizium).

4.2.1.1.1 Gewebeäquivalente Proportionalzähler

Ein gewebeäquivalenter Proportionalzähler (TEPC) ist sensitiv auf direkt ionisierende Teilchen und auch auf indirekt ionisierende Teilchen über die durch sie in den Wänden des Zählers erzeugten geladenen Sekundärteilchen. Das empfindliche Volumen ist mit einem Gas, das in seiner chemischen Zusammensetzung Gewebe ähnelt, mit geringem Druck gefüllt, um eine wenige Mikrometer große biologische Struktur zu simulieren. Obwohl eine Kugelform ideal wäre, sind TEPCs oft zylindrisch. Die einfallende Strahlung erzeugt im Gas Elektronen, die sich an der zentralen Anode sammeln, wenn ein elektrisches Feld zwischen der Anode und der Wand des Detektors angelegt wird. Jedes Ereignis (bzw. jede Teilchenspür durch das Gas) führt zu einem Ausgangssignal, dessen Größe proportional zur ursprünglich deponierten Energie ist. Jedes nachgewiesene Ereignis wird mit einer Pulshöhenanalyse ausgewertet und gespeichert, um die spektrale Verteilung der linealen Energie, $d(y)$, zu erhalten; dabei ist y der Quotient aus deponierter Energie und mittlere Sehnenlänge des Detektors. Für viele praktische Zwecke wird y als Näherung für den LET verwendet. Die Summe der bei jedem Ereignis deponierten Energie geteilt durch die Masse des Gases ergibt die Energiedosis. Die Äquivalentdosis kann durch Faltung der Energiedosisverteilung mit dem Qualitätsfaktor berechnet werden.