

DIN EN 16603-10-12

ICS 49.140

**Raumfahrttechnik –
Methoden zur Berechnung von Strahlungsdosis, -wirkung und Leitfaden
für Toleranzen im Entwurf;
Englische Fassung EN 16603-10-12:2014**

Space engineering –

Method for the calculation of radiation received and its effects, and a policy for design margins;

English version EN 16603-10-12:2014

Ingénierie spatiale –

Procédé pour le calcul de rayonnement reçue et ses effets, et une politique de marges de conception;

Version anglaise EN 16603-10-12:2014

Gesamtumfang 124 Seiten

DIN-Normenausschuss Luft- und Raumfahrt (NL)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 16603-10-12:2014) wurde vom Technischen Komitee CEN/CLC/TC 5 „Raumfahrt“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 131-10-01 AA „Interoperabilität von Informations-, Kommunikations- und Navigationssystemen“ im DIN-Normenausschuss Luft- und Raumfahrt (NL).

Dieses Dokument basiert auf ECSS-E-ST-10-12C.

Dieses Dokument wurde speziell für die Behandlung von Raumfahrtsystemen erarbeitet und hat daher Vorrang vor jeder anderen EN, die denselben Anwendungsbereich behandelt, allerdings mit erweitertem Bereich der Anwendbarkeit (z. B. Luft- und Raumfahrt).

Nationaler Anhang NA (informativ)

Begriffe

3 Begriffe und Abkürzungen

3.1 Begriffe aus anderen Normen

Für die Anwendung dieser Norm gelten die Begriffe nach ECSS-S-ST-00-01, insbesondere die folgenden Begriffe.

Derating

Untersystem

3.2 Für diese Norm spezifische Begriffe

3.2.1

Energiedosis

Energie, die durch Strahlenexposition infolge Ionisation, Versetzungsschaden und Anregung je Masseneinheit örtlich absorbiert wird und die Summe aus der ionisierenden und der nicht-ionisierenden Dosis ist

ANMERKUNG 1 Sie wird gewöhnlich mit D angegeben und kann definitionsgemäß als Quotient aus der durch Strahlung im Stoff eines Volumenelements übertragenen Energie und der Masse des Stoffs in jenem Volumenelement berechnet werden. Sie wird gemessen in der Einheit Gray, Gy [$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ ($= 100 \text{ rad}$)].

ANMERKUNG 2 Die Energiedosis ist die grundlegende physikalische Größe zur Messung der Strahlenexposition.

3.2.2

Luft-Kerma

Energie geladener Teilchen, abgegeben von Photonen je Masseneinheit trockener Luft

ANMERKUNG Sie wird gewöhnlich mit K angegeben.

3.2.3

Umgebungs-Äquivalentdosis

$H^*(d)$

Äquivalentdosis an einem Punkt in einem durch das entsprechend erweiterte und ausgerichtete Feld erzeugten Strahlenfeld in der ICRU-Kugel in einer festgelegten Tiefe auf dem der Richtung des ausgerichteten Feldes entgegengesetzten Radius

ANMERKUNG 1 Sie wird gewöhnlich mit $H^*(d)$ angegeben, wobei d die für diese Definition verwendete spezifische Tiefe, in mm, ist.

ANMERKUNG 2 $H^*(d)$ ist von Relevanz bei stark durchdringender Strahlung. Gewöhnlich wird ein Wert von 10 mm verwendet, aber die Äquivalentdosis für andere Tiefen kann verwendet werden, wenn die Äquivalentdosis bei 10 mm eine unzulässige Unterschätzung der effektiven Dosis darstellt.

3.2.4

Bremsstrahlung

hochenergetische elektromagnetische Strahlung im Energiebereich von Röntgenstrahlung, die durch Abbremsen geladener Teilchen infolge Streuung an Atomkernen emittiert wird

ANMERKUNG Das Primärteilchen wird schließlich absorbiert, während die Bremsstrahlung stark durchdringend ist. In der Raumfahrt ist die üblichste Quelle für Bremsstrahlung die Elektronenstreuung.

3.2.5

Bauteil

Gerät mit einer Funktion, das aus einem oder mehreren miteinander verbundenen Teilen besteht und gewöhnlich nicht ohne Zerstörung demontiert werden kann

3.2.6

Näherung einer kontinuierlichen Abbremsung (CSDA)

integrale Weglänge, zurückgelegt von geladenen Teilchen in einem Material, wobei keine stochastischen Schwankungen zwischen unterschiedlichen Teilchen gleicher Energie und kein Abwinkeln der Teilchen angenommen werden

3.2.7

handelsübliches Produkt

kommerzielles elektronisches Bauteil, das fertig am Markt erhältlich ist und dessen Herstellung, Inspektion und Prüfung nicht nach Militär- oder Raumfahrtnormen erfolgt

3.2.8

kritische Ladung

Mindestladung, aufgenommen an einem empfindlichen Knotenpunkt durch das Auftreffen geladener Teilchen, was zu einer SEE führt

3.2.9

Wirkungsquerschnitt

〈Einzelereignis-Phänomene〉 Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Auswirkung durch ein Einzelereignis je Einheit der einfallenden Teilchenfluenz

ANMERKUNG Er wird experimentell gemessen als die je Fluenzeinheit aufgezeichnete Anzahl von Ereignissen.

3.2.10

Wirkungsquerschnitt

〈Kernphysik oder Elektromagnetik〉 Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung zwischen Teilchen je Einheit der einfallenden Teilchenfluenz

ANMERKUNG Er wird mitunter als der *mikroskopische Wirkungsquerschnitt* bezeichnet. Eine andere verwandte Definition ist der makroskopische Wirkungsquerschnitt als die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung je Einheit der Weglänge eines Teilchens in einem Material.

3.2.11

Richtungs-Äquivalentdosis

Äquivalentdosis an einem Punkt in einem durch das entsprechend erweiterte Feld erzeugten Strahlenfeld in der ICRU-Kugel in einer festgelegten Tiefe d auf einem Radius in festgelegter Richtung

ANMERKUNG 1 Sie wird gewöhnlich mit $H'(d, \Omega)$ angegeben, wobei d die für diese Definition verwendete spezifische Tiefe, in mm, und Ω die Richtung ist.

ANMERKUNG 2 $H'(d, \Omega)$ ist von Relevanz bei schwach durchdringender Strahlung, wobei gewöhnlich eine Referenztiefe von 0,07 mm verwendet und die Größe mit $H'(0,07, \Omega)$ bezeichnet wird.

3.2.12

Versetzungsschaden

Schaden der Kristallstruktur, verursacht durch den Energieverlust von Teilchen aufgrund elastischer oder unelastischer Kollisionen in einem Material

3.2.13**Dosis**

an einer Stelle übertragene Strahlungsenergiemenge

ANMERKUNG 1 Im weitesten Sinne kann hierzu die Teilchenflussdichte gehören, diese bezieht sich jedoch im Zusammenhang mit den Wirkungen der energiereichen Teilchenstrahlung des Weltraums gewöhnlich auf die Energie, die je Masseneinheit infolge von Strahlenexposition absorbiert wird.

ANMERKUNG 2 Wenn „Dosis“ ohne nähere Bezeichnung verwendet wird, bezieht sie sich sowohl auf die ionisierende als auch die nicht-ionisierende Strahlungsdosis. Die nicht-ionisierende Strahlungsdosis kann entweder durch Energie-deposition über Versetzungsschaden oder Schadens-Äquivalentfluenz quantifiziert werden (siehe Abschnitt 8).

3.2.14**Äquivalentdosis**

Energiedosis an einem Punkt im Gewebe, die durch Qualitätsfaktoren gewichtet wird, welche in Zusammenhang mit der LET-Verteilung der Strahlung an diesem Punkt stehen

3.2.15**Dosisrate**

Rate, mit der die Strahlung je Zeiteinheit abgegeben wird

3.2.16**effektive Dosis**

Summe der Äquivalentdosen für alle bestrahlten Gewebe oder Organe, jeweils gewichtet mit dem eigenen Wert des Gewebe-Wichtungsfaktors

ANMERKUNG 1 Sie wird gewöhnlich mit E angegeben und definitionsgemäß berechnet mit nachstehender Gleichung; w_T ist festgelegt in der Norm ICRP-92 [RDH.22]:

$$E = \sum w_T \cdot H_T \quad (1)$$

Zur weiteren Erläuterung von E siehe ECSS-E-HB-10-12, 10.2.2.

ANMERKUNG 2 Die effektive Dosis wird wie die Organdosis in der Einheit Sievert, Sv, gemessen. Gelegentlich kann diese Verwendung derselben Einheit für unterschiedliche Größen zu Verwechslungen führen.

3.2.17**energiereiches Teilchen**

Teilchen, das hinsichtlich der Wirkung von Strahlung auf Raumfahrtssysteme die Außenflächen des Raumfahrzeugs durchdringen kann

3.2.18**Äquivalentdosis**

Siehe 3.2.41 (Organdosis)

3.2.19**Äquivalentfluenz**

Größe, welche die Schädigung bei verschiedenen Energien und von verschiedenen Spezies anhand der Fluenz monoenergetischer Teilchen einer einzelnen Spezies darstellt

ANMERKUNG 1 Sie wird gewöhnlich durch Prüfung bestimmt.

ANMERKUNG 2 Schadenskoeffizienten werden verwendet, um den Schaden einzuschätzen, der durch ein gegebenes Teilchen relativ zu einem Normteilchen und einer Normenergie verursacht wird.

3.2.20**extrapolierte Reichweite**

Reichweite, die bestimmt wird, indem die Gerade mit maximalem Gradienten in der Intensitätskurve bis zu einer Intensität von 0 extrapoliert wird

3.2.21

Firsov-Streuung

die Reflexion schneller Ionen in Einfallswinkeln von einem dichten Medium

ANMERKUNG Siehe Verweisung [2].

3.2.22

Fluenz

zeitliches Integral der Flussdichte

ANMERKUNG Sie wird gewöhnlich mit Φ angegeben.

3.2.23

Flussdichte

〈unidirektional einfallende Teilchen〉 Anzahl von Teilchen, die eine Fläche je Flächeneinheit je Zeiteinheit im rechten Winkel zur Teilchenrichtung durchsetzen

3.2.24

Flussdichte

〈beliebige Winkelverteilungen〉 Anzahl von Teilchen, die eine Kugel je Querschnittsflächeneinheit (d. h. Radius $1/\sqrt{\pi}$) je Zeiteinheit durchsetzen

ANMERKUNG 1 Bei beliebigen Winkelverteilungen ist sie gewöhnlich als omnidirektionale Flussdichte bekannt.

ANMERKUNG 2 Die Flussdichte wird oft in „integraler Form“ als Teilchen je Flächeneinheit je Zeiteinheit (z. B. Elektronen $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) über einer bestimmten Schwellenenergie angegeben.

ANMERKUNG 3 Die gerichtete Flussdichte ist das Differential, bezogen auf den Raumwinkel (z. B. Teilchen $\text{cm}^{-2} \cdot \text{Steradian}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), während die „differentielle“ Flussdichte das Differential, bezogen auf die Energie (z. B. Teilchen $\text{cm}^{-2} \cdot \text{MeV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) ist. In manchen Fällen werden Flussdichten auch als Differential, bezogen auf das lineare Energieübertragungsvermögen, behandelt.

3.2.25

ICRU-Kugel

Kugel von 30 cm Durchmesser, bestehend aus ICRU-Weichteilgewebe

ANMERKUNG Diese Definition ist Report 33 [12] der Internationalen Kommission für Strahlungseinheiten und Messungen (ICRU) entnommen.

3.2.26

ICRU-Weichteilgewebe

gewebeäquivalentes Material der Dichte 1 g/cm^3 mit der Zusammensetzung (Massenanteile) 76,2 % Sauerstoff, 11,1 % Kohlenstoff, 10,1 % Wasserstoff und 2,6 % Stickstoff

ANMERKUNG Diese Definition ist ICRU-Report 33 [12] entnommen.

3.2.27

Ionisationsdosis

Energiemenge je Masseneinheit, die durch Teilchen auf ein Zielmaterial in Form von Ionisation und Anregung übertragen wird

3.2.28

ionisierende Strahlung

Übertragung von Energie durch Teilchen, deren Energie ausreicht für das Entfernen von Elektronen oder elastische oder unelastische Wechselwirkungen mit Atomkernen (einschließlich Versetzung von Atomen); in Zusammenhang mit dieser Norm sind die Photonen im Röntgenstrahlungsband und darüber eingeschlossen

3.2.29**isotrop**

Eigenschaft einer Teilchenverteilung, bei der die Flussdichte über alle Richtungen konstant ist

3.2.30 **L oder L -Schale**

häufig zur Lagebeschreibung im erdnahen Weltraum verwendeter Parameter des Erdmagnetfeldes

ANMERKUNG Die Bestimmung von L oder L -Schale ist kompliziert und beruht auf einer Invarianz der Bewegung geladener Teilchen im Erdmagnetfeld. Allerdings unterstützt dies die Definition von Plasmaregimen innerhalb der Magnetosphäre, da es bei einem Dipolmagnetfeld gleich der geozentrischen Höhenlage in Erdradien der örtlichen Magnetfeldlinie bei Querung des Äquators ist.

3.2.31**lineares Energieübertragungsvermögen (LET)**

Energie, die dem Material durch Ionisation von einem abgebremsten energiereichen Teilchen beim Durchlaufen eines Wegs zugeführt wird

ANMERKUNG 1 Das LET wird gewöhnlich zur Beschreibung der Ionisierungsspur infolge eines durchlaufenden Ions verwendet. Das LET ist materialabhängig und weiterhin eine Funktion der Teilchenenergie und -ladung. Bei Ionen, die an Strahlenwirkungen bei der Raumfahrt beteiligt sind, erhöht es sich mit abnehmender Energie (es erhöht sich auch bei hohen Energien über die Mindestionisierungsenergie). Das LET ermöglicht es, unterschiedliche Ionen durch einfaches Darstellen der Ionenumgebung als Summe der Flussdichten aller Ionen als Funktionen ihrer LET gemeinsam zu betrachten. Dies vereinfacht die Berechnung der Störung durch ein Einzelereignis. Die Energieverlustrate eines Teilchens, die auch emittierte Sekundärstrahlungen umfasst, wird als Bremsvermögen bezeichnet.

ANMERKUNG 2 LET ist nicht gleich (aber häufig annähernd) dem elektronischen Bremsvermögen von Teilchen, das der Energieverlust aufgrund Ionisation und Anregung je Einheit der Weglänge ist.

3.2.32**LET-Schwellenwert**

Mindestwert des LET, den ein Teilchen aufweisen sollte, um beim Durchgang durch das sensitive Volumen eines Geräts eine SEE in einer Schaltung zu verursachen

3.2.33**Toleranz**

Faktor oder Differenz zwischen der Spezifikation der Auslegungsumgebung für ein Gerät oder Produkt und der Umgebung, in der unzulässiges Verhalten auftritt

3.2.34**mittlere Organ-Energiedosis**

Energie, die von einem Organ aufgrund von ionisierender Strahlung absorbiert wird, dividiert durch dessen Masse

ANMERKUNG Sie wird gewöhnlich mit DT angegeben und definitionsgemäß unter Verwendung von Gleichung (35) nach ECSS-E-HB-10-12, 10.2.2, berechnet. Die Einheit ist Gray (Gy), wobei gilt $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg}$.

3.2.35**mittlere Reichweite**

von Teilchen in einem Material zurückgelegte, integrale Weglänge, wonach die Intensität um einen Faktor von $e \approx 2,718\ 3$ verringert wird

ANMERKUNG Entsprechend vorstehender Definition ist dies nicht die Reichweite, bei der alle Teilchen vollständig abgebremst sind.

3.2.36

Multiple-Bit-Upset (MBU)

Reihe von fehlerhaften Bits in einem digitalen Element aufgrund von direkter Ionisation bei Durchgang eines einzelnen Teilchens oder abprallenden Atomkernen und/oder Sekundärprodukten einer nuklearen Wechselwirkung

ANMERKUNG MCU und SMU sind Sonderfälle von MBU.

3.2.37

Multiple-Cell-Upset (MCU)

Reihe von physikalisch aufeinander folgenden fehlerhaften Bits in einem digitalen Element aufgrund von direkter Ionisation bei Durchgang eines einzelnen Teilchens oder abprallenden Atomkernen einer nuklearen Wechselwirkung

3.2.38

nicht-ionisierende (Gesamt-)Dosis (T)NID oder nicht-ionisierende Energieverlustdosis (NIEL-Dosis)

Energieabsorption je Masseneinheit des Materials, die zur Schädigung der Gitterstruktur von Feststoffen aufgrund der Versetzung von Atomen führt

ANMERKUNG Obwohl die SI-Einheit der TNID oder NIEL-Dosis Gray ist (siehe Begriff 3.2.34), ist für die Strahlungswirkungen bei Raumfahrzeugen MeV/g(Material) gebräuchlicher, um Verwechslung mit der Übertragung von Ionisationsenergie zu vermeiden, z. B. MeV/g(Si) für TNID in Silicium.

3.2.39

NIEL oder NIEL-Rate oder NIEL-Koeffizient

Energieverlustrate eines Teilchens in einem Material aufgrund von Versetzungsschaden je Einheit der Weglänge

3.2.40

omnidirektionale Flussdichte

skalares Integral der Flussdichte über alle Richtungen

ANMERKUNG Dies beinhaltet, dass die gerichtete Verteilung der Teilchen, die nicht-isotrop sein kann, nicht berücksichtigt wird. Die Flussdichte an einem Punkt ist die Anzahl von Teilchen, die eine Kugel je Querschnittsflächeneinheit (d. h. Radius $1/\sqrt{\pi}$) je Zeiteinheit durchsetzen. Eine omnidirektionale Flussdichte darf nicht verwechselt werden mit einer isotropen Flussdichte.

3.2.41

Organdosis

Summe aller Beiträge der Energiedosis eines mehreren Strahlungsarten ausgesetzten Organs oder Gewebes, gewichtet mit dem jeweiligen Strahlungs-Wichtungsfaktor für die auf jeden Körper einwirkenden Strahlungen

ANMERKUNG 1 Die Organdosis, eine in ICRP-60 [11] definierte Größe, wird gewöhnlich mit H_T und verkürzt als Äquivalentdosis angegeben. Definitionsgemäß wird sie mit der nachstehenden Gleichung berechnet (weitere Erläuterungen sind ECSS-E-HB-10-12, 10.2.2, zu entnehmen):

$$H_T = \sum w_R \cdot D_{T,R} \quad (2)$$

ANMERKUNG 2 Die Organdosis wird in der Einheit Sievert, Sv, gemessen, wobei gilt $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$. Die Einheit Rem (roentgen equivalent man) wird weiterhin verwendet, wobei gilt $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$.

3.2.42**Personendosis (Individualdosis)**

Äquivalentdosis in ICRU-Weichteilgewebe bei einer gegebenen Tiefe im Körper

ANMERKUNG 1 Die Personendosis, eine ICRU-Größe, wird gewöhnlich mit $H_p(d)$ bei stark durchdringender Strahlung in einer für diese Strahlung geeigneten Tiefe d , in Millimeter, angegeben. Eine Referenztiefe von 10 mm ist gebräuchlich. Sie schwankt in Abhängigkeit von sowohl den Individuen als auch der Lage und ist für tief im Körper liegende Organe und Gewebe geeignet.

ANMERKUNG 2 Bei schwach durchdringender Strahlung (Oberflächenstrahlung) wird sie gewöhnlich mit $H_s(d)$ in einer für diese Strahlung geeigneten Tiefe d , in Millimeter, angegeben. Eine Referenztiefe von 0,07 mm ist gebräuchlich. Sie schwankt in Abhängigkeit von sowohl den Individuen als auch der Lage und ist geeignet für Organe und Gewebe an der Körperoberfläche, die sowohl von schwach als auch von stark durchdringender Strahlung bestrahlt werden.

3.2.43**Plasma**

teilweise oder vollständig ionisiertes Gas, dessen Teilchen eine gemeinsame Reaktion auf Magnet- oder elektrische Felder aufweisen

ANMERKUNG Die gemeinsame Bewegung erfolgt aufgrund der elektrostatischen Coulomb-Kraft zwischen geladenen Teilchen. Diese bewirkt eine Neuordnung der Teilchen, um elektrischen Feldern innerhalb einer Entfernung in der Größenordnung der Debye-Länge entgegenzuwirken. Bei räumlichen Abmessungen größer als die Debye-Länge ist ein Plasma elektrisch neutral.

3.2.44**erwartete Reichweite**

mittlere Eindringtiefe eines Teilchens, gemessen entlang dessen ursprünglicher Richtung

3.2.45**Qualitätsfaktor**

Faktor für die Berücksichtigung der unterschiedlichen biologischen Wirkungen ionisierender Strahlung mit unterschiedlichem LET, der für die Umrechnung der Energiedosis in Betriebsparameter verwendet wird (Umgebungs-Äquivalentdosis, Richtungs-Äquivalentdosis und Personendosis)

ANMERKUNG 1 Der Qualitätsfaktor, gewöhnlich angegeben mit Q , wird (vorzugsweise statt Strahlungs- oder Gewebe-Wichtungsfaktoren) für die Umrechnung der Energiedosis in Äquivalentdosiswerte (Umgebungs-Äquivalentdosis, Richtungs-Äquivalentdosis und Personendosis) verwendet. Die tatsächlichen Werte werden angegeben in ICRP-60 [11] (siehe 11.2.3.2).

ANMERKUNG 2 Vor ICRP-60 [11] wurden Qualitätsfaktoren als synonym mit Strahlungs-Wichtungsfaktoren angesehen.

3.2.46**Strahlung**

Energieübertragung durch Teilchen (einschließlich Photonen)

ANMERKUNG 1 In dieser Norm wird elektromagnetische Strahlung unterhalb des Röntgenstrahlungsbands nicht behandelt. Somit werden UV-, sichtbare, Wärme-, Mikrowellen- und Radiowellenstrahlung nicht behandelt.

3.2.47**Strahlungstoleranzen im Entwurf (RDM)**

⟨kumulativer Prozess⟩ Verhältnis zwischen der Strahlungstoleranz oder des Strahlungsvermögens eines Bauteils, Systems oder eines Schutzwertes für Astronauten und der für die Mission bzw. Missionsphase vorhergesagten Strahlungsumgebung

ANMERKUNG Die Toleranz oder das Vermögen des Bauteils, über der/dem sein Verhalten unzulässig wird, ist projektabhängig.

3.2.48

Strahlungstoleranzen im Entwurf (RDM)

〈zerstörungsfreies Einzelereignis〉 Verhältnis zwischen der SEE-Toleranz im Entwurf und der für die Umgebung vorhergesagten SEE-Rate

ANMERKUNG Die SEE-Toleranz im Entwurf ist die zulässige SEE-Rate, der das Gerät oder die Mission ausgesetzt werden kann, während die Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Geräts erfüllt sind.

3.2.49

Strahlungstoleranzen im Entwurf (RDM)

〈zerstörendes Einzelereignis〉 Verhältnis zwischen der zulässigen Wahrscheinlichkeit eines Bauteilausfalls durch den SEE-Mechanismus und der berechneten Ausfallwahrscheinlichkeit

ANMERKUNG Die zulässige Wahrscheinlichkeit eines Bauteilausfalls beruht auf den Spezifikationen für Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Geräts.

3.2.50

Strahlungstoleranzen im Entwurf (RDM)

〈biologische Wirkung〉 Verhältnis zwischen den vom Projekt für die Mission vorgegebenen Schutzz Grenzwerten und der vorhergesagten Exposition der Besatzung

3.2.51

Strahlungs-Wichtungsfaktor

Faktor zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Stärken von Strahlungswirkungen in biologischem Material für verschiedene Strahlungen bei gleicher Energiedosis

ANMERKUNG Er wird gewöhnlich mit w_R angegeben. Der Wert wird durch die ICRP festgelegt (siehe 11.2.2.2).

3.2.52

relative biologische Wirksamkeit (RBE)

invertiertes Verhältnis zwischen der Energiedosis einer Strahlungsart und der Energiedosis einer Referenzstrahlung mit gleicher Strahlungswirkung

ANMERKUNG 1 Die Strahlungsart ist gewöhnlich ^{60}Co oder Röntgenstrahlung mit 200 keV bis 250 keV.

ANMERKUNG 2 Im Gegensatz zu den Wichtungs- oder Qualitätsfaktoren ist RBE eine empirisch begründete messbare Größe. Zusätzliche Angaben zu RBE sind ECSS-E-HB-10-12, 10.2.2, zu entnehmen.

3.2.53

sensitives Volumen (SV)

Ladungssammelbereich eines Geräts

3.2.54

Einzelereignis-Burnout (SEB)

zerstörendes Auslösen eines vertikalen n-Kanal-Transistors oder eines NPN-Leistungstransistors, begleitet von Rückspeisung

3.2.55

Bruch des Dielektrikums durch ein Einzelereignis (SEDR)

Bildung einer Leiterbahn, ausgelöst durch ein einzelnes ionisierendes Teilchen in einem Starkfeldbereich eines Dielektrikums

ANMERKUNG Beispielsweise in linearen Geräten oder in FPGA.

3.2.56**Störung durch ein Einzelereignis (SED)**

vorübergehende Spannungsauslenkung (Spannungsspitze) an einem Knotenpunkt in einem integrierten Schaltkreis, ursprünglich verursacht durch die elektrische Feldtrennung der vom Durchgang eines Ions durch oder nahe eine(r) Verbindung erzeugten Ladung

ANMERKUNG Die SED ist ähnlich der SET, wird jedoch für die Bezugnahme auf derartige Ereignisse in der Mikroelektronik verwendet.

3.2.57**Auswirkung durch ein Einzelereignis (SEE)**

Auswirkung von entweder direkter Ionisation bei Durchgang eines einzelnen Teilchens oder abprallenden Atomkernen, emittiert bei einer nuklearen Wechselwirkung

3.2.58**Funktionsunterbrechung durch ein Einzelereignis (SEFI)**

Unterbrechung aufgrund des Aufpralls eines einzelnen Teilchens, was zu einer vorübergehenden Funktionsunfähigkeit (oder Unterbrechung des Normalbetriebs) des betroffenen Geräts führt

3.2.59**Gate-Bruch durch ein Einzelereignis (SEGR)**

Bildung einer Leiterbahn, ausgelöst durch ein einzelnes ionisierendes Teilchen in einem Starkfeldbereich eines Gate-Oxids

3.2.60**permanenter Schaden durch ein Einzelereignis (SEHE)**

dauerhafte Zustandsveränderung in Verbindung mit semi-permanentem Schaden an der Speicherzelle durch eine einzelne Ionenspur

3.2.61**Energiekonzentration durch ein Einzelereignis (SEL)**

potenziell zerstörende Auslösung einer parasitären PNP-Thyristorstruktur in einem Gerät

3.2.62**Einzelereignis-Snapback (SESB)**

Ereignis, das auftritt, wenn der parasitäre Bipolartransistor zwischen Ausgang und Eingang eines MOS-Transistors den Lawinenstrom aufgrund eines schweren Ions verstärkt

3.2.63**Einzelereignis-Transiente (SET)**

vorübergehende Spannungsauslenkung (Spannungsspitze) an einem Knotenpunkt in einem integrierten Schaltkreis, ursprünglich verursacht durch die elektrische Feldtrennung der vom Durchgang eines Ions durch oder nahe eine(r) Verbindung erzeugten Ladung

3.2.64**Einzelereignis-Upset (SEU)**

Kippen eines Bits in einem digitalen Element aufgrund entweder direkter Ionisation bei Durchgang eines Teilchens oder abprallender Atomkerne, emittiert bei einer nuklearen Wechselwirkung

3.2.65**Multiple-Bit-Upset in einem Datenwort (SMU)**

Reihe logisch aneinander grenzender Bits, die in einem digitalen Element aufgrund direkter Ionisation bei Durchgang eines einzelnen Teilchens oder abprallender Atomkerne bei einer nuklearen Wechselwirkung beschädigt wurden

ANMERKUNG SMU sind Multiple-Bit-Upsets innerhalb eines einzelnen Datenwortes.

3.2.66

Ereignis durch energiereiche Sonnenteilchen (SEPE)

Aussendung energiereicher Protonen oder schwererer Atomkerne von der Sonne innerhalb eines kurzen Zeitraums (Stunden bis Tage), die zu einer Erhöhung der Teilchenflussdichte führt

ANMERKUNG SEPE stehen gewöhnlich in Zusammenhang mit Sonneneruptionen (begleitet von Photonenaussendung in optischer, UV- und Röntgenstrahlung) oder koronalen Massenauswürfen.

3.2.67

Bremsvermögen

mittlere Energieverlustrate eines bestimmten Teilchens je Einheit der zurückgelegten Weglänge durch ein gegebenes Material

ANMERKUNG Die Folgenden sind von Bedeutung für die vorstehende Definition:

- **Kollisionsbremsvermögen:** (Elektronen und Positronen) mittlerer Energieverlust je Einheit der Weglänge aufgrund unelastischer Coulomb-Kollisionen mit gebundenen atomaren Elektronen, die zu Ionisation und Anregung führen.
- **Strahlungsbremsvermögen:** (Elektronen und Positronen) mittlerer Energieverlust je Einheit der Weglänge aufgrund der Aussendung von Bremsstrahlung im elektrischen Feld des Atomkerns und der atomaren Elektronen.
- **elektronisches Bremsvermögen:** (schwerere Teilchen als Elektronen) mittlerer Energieverlust je Einheit der Weglänge aufgrund unelastischer Coulomb-Kollisionen mit atomaren Elektronen, die zu Ionisation und Anregung führen.
- **nukleares Bremsvermögen:** (schwerere Teilchen als Elektronen) mittlerer Energieverlust je Einheit der Weglänge aufgrund unelastischer und elastischer Coulomb-Kollisionen mit Atomkernen im Material.

3.2.68

Gewebe-Wichtungsfaktor

Faktor zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Empfindlichkeit von Organen oder Gewebe durch Angabe der Strahlungswirkungen bei gleicher Äquivalentdosis

ANMERKUNG Er wird gewöhnlich mit w_T angegeben und seine tatsächlichen Werte werden von der ICRP festgelegt (siehe 11.2.2.3).

3.2.69

Gesamtionisationsdosis

Energiedeposition je Masseneinheit des Materials aufgrund von Ionisation

ANMERKUNG Die SI-Einheit ist Gray (siehe Definition 3.2.34). Allerdings ist die veraltete Einheit Rad (radiation absorbed dose) weiterhin gebräuchlich (1 rad = 1 cGy).

3.3 Abkürzungen

Für die Anwendung dieser Norm gelten die Abkürzungen nach ECSS-S-ST-00-01 und die folgenden Abkürzungen.

ADC	Analog-Digital-Umsetzer (en: analogue-to-digital converter)
ALARA	so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar (en: as low as reasonably achievable)
APS	aktiver Pixelsensor (en: active pixel sensor)
ASIC	anwendungsspezifischer integrierter Schaltkreis (en: application specific integrated circuit)
BFO	blutbildendes Organ (en: blood-forming organ)
BiCMOS	bipolarer komplementärer Metalloxid-Halbleiter (en: bipolar complementary metal oxide semiconductor)
BJT	Bipolartransistor (en: bipolar junction transistor)
BRYNTRN	Baryon-Transportmodell (en: Baryon transport model)
BTE	Boltzmannsche Transportgleichung (en: Boltzmann transport equation)
CAM/CAF	männliches Computer-Anatomiemodell/weibliches Computer-Anatomiemodell (en: computerized anatomical man/male/computerized anatomical female)
CCD	Charge Coupled Device (en: charge coupled device)
CCE	Wirksamkeit der Ladungssammlung (en: charge collection efficiency)
CDR	kritische Entwurfsüberprüfung (en: critical design review)
CEPXS/ONELD	Codesystem Diskreter Koordinaten für Eindimensionale Gekoppelte Elektron-Photon-Multigruppen (en: One-dimensional Coupled Electron-Photon Multigroup Discrete Coordinates Code System)
CERN	Europäische Organisation für Kernforschung (en: European Organisation for Nuclear Research)
CGRO	Compton-Gammastrahlen-Observatorium (en: Compton Gamma Ray Observatory)
CID	Charge Injection Device (en: charge injection device)
CMOS	komplementärer Metalloxid-Halbleiter (en: complementary metal oxide semiconductor)
COMPTEL	CGRO-Teleskop (en: CGRO Compton Telescope)
COTS	handelsübliches Produkt (en: commercial off-the-shelf)

CREAM	Kosmische Strahlungswirkungs- und Aktivierungsüberwachung (en: Cosmic Radiation Effects and Activation Monitor) (Spaceshuttle-Experiment)
CEASE	Umgebungsanomalie-Kompaktsensor (en: compact environmental anomaly sensor)
CREME	kosmische Strahlungswirkungen auf Mikroelektronik (en: cosmic ray effects on microelectronics)
CSA	Kanadische Raumfahrtagentur (en: Canadian Space Agency)
CSDA	Näherung einer kontinuierlichen Abbremsung (en: continuous slowing down approximation range)
CTE	Ladungsübertragungseffizienz (en: charge transfer efficiency)
CTI	Ladungsübertragungseffizienz (en: charge transfer inefficiency)
CTR	Gleichstrom-Übertragungsverhältnis (en: current transfer ratio)
CZT	Cadmiumzinktellurid (en: cadmium zinc telluride) (Halbleitermaterial)
DAC	Digital-Analog-Umsetzer (en: digital-to-analogue converter)
DD	Versetzungsschaden (en: displacement damage)
DDEF	Versetzungsschadens-Äquivalentfluenz (en: displacement damage equivalent fluence)
DDREF	Wirksamkeitsfaktor für Dosis und Dosisleistung (en: dose and dose rate effectiveness factor)
DNA	Desoxyribonukleinsäure (en: deoxyribonucleic acid)
DOSRAD	Software zur Vorhersage der kosmischen Strahlungsdosis auf System- und Geräteebe- ne (en: software to predict space radiation dose at system and equipment level)
DRAM	dynamischer Schreib-Lese-Speicher mit wahlfreiem Zugriff (en: dynamic random access memory)
DSP	digitale Signalverarbeitung (en: digital signal processing)
DUT	zu prüfendes Bauelement (en: device under test)
EEE	Elektrotechnik und Elektronik (en: electrical and electronic engineering)
EEPROM	elektrisch löschbarer, programmierbarer Festwertspeicher (en: electrically erasable programmable read only memory)
EGS	Monte-Carlo-Strahlungstransportcode für Electron Gamma Shower (en: Electron Gamma Shower Monte Carlo radiation transport code)
ELDRS	erhöhte Empfindlichkeit bei niedriger Dosisleistung (en: enhanced low dose-rate sensitivity)
EM	technisches Modell (en: engineering model)

EPIC	Europäische Photonen-Bildkamera für die Röntgen-Mehrfachspiegel-Mission (XMM) der ESA [en: European Photon Imaging Camera on the ESA X-ray Multi-Mirror (XMM) mission]
EPROM	löscher, programmierbarer Festwertspeicher (en: erasable programmable read only memory)
ESA	Europäische Raumfahrtagentur (en: European Space Agency)
ESABASE	Engineering-Tool zur Unterstützung der Auslegung der Raumfahrzeugmission und der Raumfahrzeugplattform (en: engineering tool to support spacecraft mission and spacecraft platform design)
ESD	elektrostatische Entladung (en: electrostatic discharge)
EVA	Außenbordeinsatz (en: extravehicular activity)
FASTRAD	Software für sektorbezogene Analyse kosmischer Strahlungswirkungen (en: sectoring analysis software for space radiation effects)
FLUKA	Monte-Carlo-Strahlungstransportcode für fluktuierende Kaskade [en: Fluktuierende Kaskade (Fluctuating Cascade) Monte Carlo radiation transport code]
FPGA	feldprogrammierbare Gate-Anordnung (en: field programmable gate array)
FM	Flugmodell (en: flight model)
GEANT	Monte-Carlo-Strahlungstransportcode für Geometrie und Tracking (en: Geometry and Tracking Monte Carlo radiation transport code)
GEO	geostationäre Erdumlaufbahn (en: geostationary Earth orbit)
GOES	Satellit mit Geostationärer Betriebsumgebung (en: Geostationary Operational Environment Satellite)
GRAS	Geant4-Weltraum-Strahlungsanalyse (en: Geant4 Radiation Analysis for Space)
HERMES	3D-Monte-Carlo-Strahlungstransport-Simulationscode (en: 3-D Monte Carlo radiation transport simulation code), entwickelt vom Institut für Kernphysik Forschungszentrum Jülich GmbH
HETC	Transportcode für Hochenergetische Strahlung (en: High Energy Transport Code)
hFE	Stromverstärkung eines Bipolartransistors in einer Emitterschaltung (en: current gain of a bipolar transistor in common-emitter configuration)
HPGe	hochreines Germanium (en: high-purity germanium)
HZE	Teilchen mit hoher Atommasse und hoher Energie (en: particle of high atomic mass and high energy)
IBIS	Bildgeber an Bord des INTEGRAL-Satelliten (en: Imager on Board the INTEGRAL Satellite)
IC	integrierter Schaltkreis (en: integrated circuit)
ICRP	Internationale Strahlenschutzkommission (en: International Commission on Radiobiological Protection)

ICRU	Internationale Kommission für Strahlungseinheiten und Messungen (en: International Commission on Radiation Units and Measurements)
IGBT	Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode (en: insulated gate bipolar transistor)
IML1	Internationales Mikrogravitationslabor 1 (en: International Microgravity Laboratory 1)
INTEGRAL	Internationales Gammastrahlen-Astrophysiklabor (en: International Gamma Ray Astrophysical Laboratory)
IR	Infrarot (en: infrared)
IRPP	integrierter rechteckiger Parallellflächenner (en: integrated rectangular parallelepiped)
IRTS	Integriertes Strahlungstransportpaket (en: Integrated Radiation Transport Suite)
ISO	Infrarot-Weltraumobservatorium (en: Infrared Space Observatory)
ISOCAM	ISO-Infrarotkamera (en: ISO infrared Camera)
ISS	Internationale Raumstation (en: International Space Station)
ISSP	Internationales Raumstationsprogramm (en: International Space Station Program)
ITS	gekoppelte Elektron-Photon-Strahlungstransportcodes der Integrated Tiger Series (en: Integrated Tiger Series coupled electron-photon radiation transport codes)
JAXA	Japanische Weltraumagentur (en: Japan Aerospace Exploration Agency)
JFET	Sperrschicht-Feldeffekttransistor (en: junction field effect transistor)
LDEF	Langzeit-Expositionseinrichtung (en: Long Duration Exposure Facility)
LEO	erdnahe Umlaufbahn (en: low Earth orbit)
LED	lichtemittierende Diode (en: light emitting diode)
LET	lineare Energieübertragung (en: linear energy transfer)
LHI	Transportcode für Light Heavy Ion (en: Light Heavy Ion Transport code)
LISA	Laserinterferometer-Weltraumantenne (en: Laser Interferometer Space Antenna)
LNT	linear schwellenwertfrei (en: linear no-threshold)
LOCOS	lokale Oxidation von Silicium (en: local oxidation of silicon)
LWIR	Langwellen-Infrarot (en: long-wavelength infrared)

MCP	Mikrokanalplatte (en: microchannel plate)
MCNP	Monte-Carlo-Transportcode für N-Teilchen (en: Monte Carlo N-Particle Transport Code)
MCNPX	erweiterter Monte-Carlo-Transportcode für N-Teilchen (en: Monte Carlo N-Particle Extended Transport Code)
MCT	Quecksilbercadmiumtellurid (en: mercury cadmium telluride)
MCU	Multiple-Cell-Upset (en: multiple-cell upset)
MEMS	mikro-elektromechanische Struktur (en: micro-electromechanical structure)
MEO	mittlere Erdumlaufbahn [en: medium (altitude) Earth orbit]
MICAP	Monte-Carlo-Ionisationskammer-Analysepaket (en: Monte Carlo Ionization Chamber Analysis Package)
MMOP	Multilaterales Gremium für Operationelle Medizin (en: Multilateral Medical Operations Panel)
MORSE	Stochastisches Experiment von Multigroup Oak Ridge – Monte-Carlo-Strahlungstransportcode für gekoppelte Neutronen-Gammastrahlung (en: Multigroup Oak Ridge Stochastic Experiment — coupled neutron- γ -ray Monte Carlo radiation transport code)
MOS	Metalloxid-Halbleiter (en: metal oxide semiconductor)
MOSFET	Feldeffekttransistor mit Metalloxid-Halbleiter (en: metal oxide semiconductor field effect transistor)
MRHWG	Multilaterale Arbeitsgruppe zum Strahlenschutz (en: Multilateral Radiation Health Working Group)
MULASSIS	Simulations-Software für Mehrschicht-Abschirmung (en: Multi-Layered Shielding Simulation Software)
MWIR	Mittelwellen-Infrarot (en: medium-wavelength infrared)
NASA	Nationale Luft- und Raumfahrtbehörde (en: National Aeronautics and Space Administration)
NCRP	Nationaler Rat für Strahlenschutz und Messungen (en: National Council on Radiation Protection and Measurements)
NID	nicht-ionisierende Dosis (en: non-ionising dose) (identisch mit TNID)
NIEL	nicht-ionisierender Energieverlust (en: non-ionising energy loss)
NMOS	N-Kanal-Metalloxid-Halbleiter (en: N-channel metal oxide semiconductor)
NOVICE	3-D-Strahlentransport-Simulationscode entwickelt von Experimental and Mathematical Physics Consultants, Gaithersburg, USA (en: 3-D Radiation transport simulation code developed by Experimental and Mathematical Physics Consultants, Gaithersburg, USA)
NPN	Bipolartransistor mit P-Typ-Basis (en: bipolar junction transistor with P-type base)

NUREG	Verordnung der Nuklearen Regulierungskommission (en: Nuclear Regulatory Commission Regulation)
OMERE	Strahlungsumgebungs- und -wirkungscode entwickelt durch TRAD mit Unterstützung von CNES (en: Radiation environment and effects code developed by TRAD with the support of CNES)
OSSE	CGRO-Experiment mit Gerichtetem Szintillationsspektrometer (en: CGRO Oriented Scintillator Spectrometer Experiment)
PCB	Leiterplatte (en: printed circuit board)
PCC	Kriterium zur Kategorisierung von Teilen (en: part categorization criterion)
PDR	vorläufige Entwurfsüberprüfung (en: preliminary design review)
PIXIE	teilcheninduzierte Röntgenstrahlung (en: particle-induce X-ray emission)
PLL	Phasenregelschleife (en: phase-locked loop)
PMOS	P-Kanal-Metalloxid-Halbleiter (en: P-channel metal oxide semiconductor)
PMT	Photovervielfacher (en: photomultiplier tube)
PNP	Bipolartransistor mit N-Typ-Basis (en: bipolar junction transistor with N-type base)
PNPN	vorgesehene oder parasitäre Thyristor-Halbleiterstruktur (en: deliberate or parasitic thyristor-like semiconductor structure) (mit vier Bereichen, die zwischen P-Typ und N-Typ wechseln)
PPAC	Parallelplattenzähler (en: parallel plate avalanche counter)
PSR	Pacific-Sierra Research Corporation (en: Pacific-Sierra Research Corporation)
PSTAR	Bremsvermögen- und Reichweitentabellen für Protonen (en: stopping power and range tables for protons)
PWM	Pulsweitenmodulator (en: pulse-width modulator)
RBE	relative biologische Wirksamkeit (en: relative biological effectiveness)
RC	Widerstand-Kondensator-Kreis (en: resistor-capacitor)
RDM	Toleranzen im Entwurf (en: radiation design margin)
RGS	Reflexionsgitter-Spektrometer (en: reflection grating spectrometer)
RHA	Sicherung der Strahlungshärte (en: radiation hardness assurance)
RPP	rechteckiger Parallelepiped (en: rectangular parallelepiped)

RSA	Russische Raumfahrtagentur (en: Russian Space Agency)
RTG	Radioisotopengeneratoren (en: radio-isotope thermoelectric generator)
RTS	Random Telegraph Signal (en: random telegraph signal)
SBD	Oberflächensperrschichtzähler (en: surface barrier detector)
SDRAM	synchroner dynamischer Schreib-Lese-Speicher mit wahlfreiem Zugriff (en: synchronous dynamic random access memory)
SHIELDOSE	Berechnungen der kosmischen Strahlungsdosis für die Abschirmung (en: space shielding radiation dose calculations)
SEB	Einzelereignis-Burnout (en: single event burnout)
SED	Störung durch ein Einzelereignis (en: single event disturb)
SEDR	Bruch des Dielektrikums durch ein Einzelereignis (en: single event dielectric rupture)
SEE	Auswirkung durch ein Einzelereignis (en: single event effect)
SEFI	Funktionsunterbrechung durch ein Einzelereignis (en: single event functional interrupt)
SEGR	Gate-Bruch durch ein Einzelereignis (en: single event gate rupture)
SEHE	permanenter Schaden durch ein Einzelereignis (en: single event hard error)
SEL	Energiekonzentration durch ein Einzelereignis (en: single event latch-up)
SEPE	Ereignis durch energiereiche Sonnenteilchen (en: solar energetic particle event)
SESB	Einzelereignis-Snapback (en: single event snapback)
SET	Einzelereignis-Transiente (en: single event transient)
SEU	Einzelereignis-Upset (en: single event upset)
SMART-1	Kleine Mission für Fortgeschrittene Technologiestudien (en: Small Mission for Advanced Research and Technology)
SMU	Multiple-Bit-Upset in einem Datenwort (en: single word multiple-bit upset)
SOHO	Sonnen- und Heliosphären-Observatorium (en: Solar and Heliospheric Observatory)
SOI	Silizium-auf-Isolator (en: silicon-on-insulator)
SOS	Silizium-auf-Saphir (en: silicon-on-sapphire)

SPE	Ereignis durch Sonnenteilchen (en: solar particle event)
SPENVIS	Weltraumumgebungs-Informationssystem (en: Space Environment Information System)
SPI	Spektrometer am INTEGRAL (en: Spectrometer on INTEGRAL)
SRAM	statischer Speicher mit wahlfreiem Zugriff (en: static random access memory)
SREM	Standard-Strahlungsumgebungs-Überwachungseinrichtung (en: Standard Radiation Environment Monitor)
SSAT	Sektorenabschirmungsanalysewerkzeug (en: Sector Shielding Analysis Tool)
STRV	Raumfahrttechnik-Forschungsfahrzeug (en: Space Technology Research Vehicle)
SV	sensitives Volumen (en: sensitive volume)
SWIR	Kurzwellen-Infrarot (en: short wavelength infrared)
TID	ionisierende Gesamt-Dosis (en: total ionising dose)
TNID	nicht-ionisierende Gesamt-Dosis (en: total non-ionising dose)
UNSCEAR	Wissenschaftliches Komitee der Vereinten Nationen über die Wirkungen atomarer Strahlung (en: United Nation's Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)
USAF	US-Luftwaffe (en: United States Air Force)
UV	Ultraviolett (en: ultraviolet)
VLSI	sehr hoher Integrationsgrad (en: very large scale integration)
WCA	Worst-Case-Analyse (en: worst-case analysis)
XMM	Röntgen-Mehrfachspiegel-Mission (en: X-ray Multi Mirror Mission) (auch bekannt als Newton)

English version

Space engineering - Method for the calculation of radiation received and its effects, and a policy for design margins

Ingénierie spatiale - Procédé pour le calcul de rayonnement reçue et ses effets, et une politique de marges de conception

Raumfahrttechnik - Methoden zur Berechnung von Strahlungsdosis, -wirkung und Leitfaden für Toleranzen im Entwurf

This European Standard was approved by CEN on 9 February 2014.

CEN and CENELEC members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the CEN-CENELEC Management Centre or to any CEN and CENELEC member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN and CENELEC member into its own language and notified to the CEN-CENELEC Management Centre has the same status as the official versions.

CEN and CENELEC members are the national standards bodies and national electrotechnical committees of Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, Former Yugoslav Republic of Macedonia, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey and United Kingdom.



CEN-CENELEC Management Centre:
Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels

Table of contents

Foreword	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	8
3 Terms, definitions and abbreviated terms.....	9
3.1 Terms from other standards.....	9
3.2 Terms specific to the present standard	9
3.3 Abbreviated terms.....	20
4 Principles	26
4.1 Radiation effects	26
4.2 Radiation effects evaluation activities	27
4.3 Relationship with other standards	32
5 Radiation design margin.....	33
5.1 Overview	33
5.1.1 Radiation environment specification	33
5.1.2 Radiation margin in a general case	33
5.1.3 Radiation margin in the case of single events	34
5.2 Margin approach.....	34
5.3 Space radiation environment	36
5.4 Deposited dose calculations	37
5.5 Radiation effect behaviour	37
5.5.1 Uncertainties associated with EEE component radiation susceptibility data.....	37
5.5.2 Component dose effects	38
5.5.3 Single event effects.....	39
5.5.4 Radiation-induced sensor background	40
5.5.5 Biological effects	40
5.6 Establishment of margins at project phases.....	41
5.6.1 Mission margin requirement	41
5.6.2 Up to and including PDR.....	41

5.6.3	Between PDR and CDR.....	42
5.6.4	Hardness assurance post-CDR.....	42
5.6.5	Test methods	43
6	Radiation shielding	44
6.1	Overview	44
6.2	Shielding calculation approach	44
6.2.1	General	44
6.2.2	Simplified approaches.....	48
6.2.3	Detailed sector shielding calculations.....	50
6.2.4	Detailed 1-D, 2-D or full 3-D radiation transport calculations	51
6.3	Geometry considerations for radiation shielding model.....	52
6.3.1	General	52
6.3.2	Geometry elements.....	53
6.4	Uncertainties.....	55
7	Total ionising dose.....	56
7.1	Overview	56
7.2	General.....	56
7.3	Relevant environments	56
7.4	Technologies sensitive to total ionising dose	57
7.5	Radiation damage assessment.....	59
7.5.1	Calculation of radiation damage parameters	59
7.5.2	Calculation of the ionizing dose.....	59
7.6	Experimental data used to predict component degradation.....	60
7.7	Experimental data used to predict material degradation	61
7.8	Uncertainties.....	61
8	Displacement damage.....	62
8.1	Overview	62
8.2	Displacement damage expression	62
8.3	Relevant environments	63
8.4	Technologies susceptible to displacement damage	63
8.5	Radiation damage assessment.....	64
8.5.1	Calculation of radiation damage parameters	64
8.5.2	Calculation of the DD dose.....	64
8.6	Prediction of component degradation.....	68
8.7	Uncertainties.....	68
9	Single event effects	69

9.1	Overview	69
9.2	Relevant environments	70
9.3	Technologies susceptible to single event effects	70
9.4	Radiation damage assessment.....	71
9.4.1	Prediction of radiation damage parameters	71
9.4.2	Experimental data and prediction of component degradation	76
9.5	Hardness assurance.....	78
9.5.1	Calculation procedure flowchart	78
9.5.2	Predictions of SEE rates for ions.....	78
9.5.3	Prediction of SEE rates of protons and neutrons.....	80
10	Radiation-induced sensor backgrounds	83
10.1	Overview	83
10.2	Relevant environments	83
10.3	Instrument technologies susceptible to radiation-induced backgrounds.....	87
10.4	Radiation background assessment.....	87
10.4.1	General	87
10.4.2	Prediction of effects from direct ionisation by charged particles	88
10.4.3	Prediction of effects from ionisation by nuclear interactions	88
10.4.4	Prediction of effects from induced radioactive decay.....	89
10.4.5	Prediction of fluorescent X-ray interactions	89
10.4.6	Prediction of effects from induced scintillation or Cerenkov radiation in PMTs and MCPs	90
10.4.7	Prediction of radiation-induced noise in gravity-wave detectors.....	90
10.4.8	Use of experimental data from irradiations	91
10.4.9	Radiation background calculations	91
11	Effects in biological material	94
11.1	Overview	94
11.2	Parameters used to measure radiation	94
11.2.1	Basic physical parameters	94
11.2.2	Protection quantities.....	95
11.2.3	Operational quantities	97
11.3	Relevant environments	97
11.4	Establishment of radiation protection limits	98
11.5	Radiobiological risk assessment.....	99
11.6	Uncertainties.....	100
	References	102

Bibliography.....	104
--------------------------	------------

Figures

Figure 9-1: Procedure flowchart for hardness assurance for single event effects.	79
---	----

Tables

Table 4-1: Stages of a project and radiation effects analyses performed.....	28
Table 4-2: Summary of radiation effects parameters, units and examples.....	29
Table 4-3: Summary of radiation effects and cross-references to other chapters.....	30
Table 6-1: Summary table of relevant primary and secondary radiations to be quantified by shielding model as a function of radiation effect and mission type	46
Table 6-2: Description of different dose-depth methods and their applications	48
Table 7-1: Technologies susceptible to total ionising dose effects.....	58
Table 8-1: Summary of displacement damage effects observed in components as a function of component technology	66
Table 8-2: Definition of displacement damage effects	67
Table 9-1: Possible single event effects as a function of component technology and family.	71
Table 10-1: Summary of possible radiation-induced background effects as a function of instrument technology	84
Table 11-1: Radiation weighting factors.....	96
Table 11-2: Tissue weighting factors for various organs and tissue (male and female).....	96
Table 11-3: Sources of uncertainties for risk estimation from atomic bomb data.....	101
Table 11-4: Uncertainties of risk estimation from the space radiation field.....	101

Foreword

This document (EN 16603-10-12:2014) has been prepared by Technical Committee CEN/CLC/TC 5 "Space", the secretariat of which is held by DIN.

This standard (EN 16603-10-12:2014) originates from ECSS-E-ST-10-12C.

This European Standard shall be given the status of a national standard, either by publication of an identical text or by endorsement, at the latest by January 2015, and conflicting national standards shall be withdrawn at the latest by January 2015.

Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this document may be the subject of patent rights. CEN [and/or CENELEC] shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This document has been developed to cover specifically space systems and has therefore precedence over any EN covering the same scope but with a wider domain of applicability (e.g. : aerospace).

According to the CEN-CENELEC Internal Regulations, the national standards organizations of the following countries are bound to implement this European Standard: Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, Former Yugoslav Republic of Macedonia, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey and the United Kingdom."

1

Scope

This standard is a part of the System Engineering branch of the ECSS engineering standards and covers the methods for the calculation of radiation received and its effects, and a policy for design margins. Both natural and man-made sources of radiation (*e.g.* radioisotope thermoelectric generators, or RTGs) are considered in the standard.

This standard applies to the evaluation of radiation effects on all space systems.

This standard applies to all product types which exist or operate in space, as well as to crews of manned space missions. The standard aims to implement a space system engineering process that ensures common understanding by participants in the development and operation process (including Agencies, customers, suppliers, and developers) and use of common methods in evaluation of radiation effects.

This standard is complemented by ECSS-E-HB-10-12 "Radiation received and its effects and margin policy handbook".

This standard may be tailored for the specific characteristic and constraints of a space project in conformance with ECSS-S-ST-00.

2

Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this ECSS Standard. For dated references, subsequent amendments to, or revision of any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this ECSS Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the more recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the publication referred to applies.

EN reference	Reference in text	Title
EN 16601-00-01	ECSS-S-ST-00-01	ECSS system – Glossary of terms
EN 16603-10-04	ECSS-E-ST-10-04	Space engineering – Space environment
EN 16603-10-09	ECSS-E-ST-10-09	Space engineering – Reference coordinate system
EN 16602-30	ECSS-Q-ST-30	Space product assurance – Dependability
EN 16602-60	ECSS-Q-ST-60	Space product assurance – Electrical, electronic and electromechanical (EEE) components

Terms, definitions and abbreviated terms

3.1 Terms from other standards

For the purpose of this Standard, the terms and definitions from ECSS-ST-00-01 apply, in particular for the following terms:

derating

subsystem

3.2 Terms specific to the present standard

3.2.1 absorbed dose

energy absorbed locally per unit mass as a result of radiation exposure which is transferred through ionisation, displacement damage and excitation and is the sum of the ionising dose and non-ionising dose

NOTE 1 It is normally represented by D , and in accordance with the definition, it can be calculated as the quotient of the energy imparted due to radiation in the matter in a volume element and the mass of the matter in that volume element. It is measured in units of gray, Gy ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1} (= 100 \text{ rad})$).

NOTE 2 The absorbed dose is the basic physical quantity that measures radiation exposure.

3.2.2 air kerma

energy of charged particles released by photons per unit mass of dry air

NOTE It is normally represented by K .

3.2.3 ambient dose equivalent, $H^*(d)$

dose at a point equivalent to the one produced by the corresponding expanded and aligned radiation field in the ICRU sphere at a specific depth on the radius opposing the direction of the aligned field

NOTE 1 It is normally represented by $H^*(d)$, where d is the specific depth used in its definition, in mm.

NOTE 2 $H^*(d)$ is relevant to strongly penetrating radiation. The value normally used is 10 mm,

but dose equivalent at other depths can be used when the dose equivalent at 10 mm provides an unacceptable underestimate of the effective dose.

3.2.4 bremsstrahlung

high energy electromagnetic radiation in the X-ray energy range emitted by charged particles slowing down by scattering off atomic nuclei

NOTE The primary particle is ultimately absorbed while the bremsstrahlung can be highly penetrating. In space the most common source of bremsstrahlung is electron scattering.

3.2.5 component

device that performs a function and consists of one or more elements joined together and which cannot be disassembled without destruction

3.2.6 continuous slowing down approximation range (CSDA)

integral pathlength travelled by charged particles in a material assuming no stochastic variations between different particles of the same energy, and no angular deflections of the particles

3.2.7 COTS

commercial electronic component readily available off-the-shelf, and not manufactured, inspected or tested in accordance with military or space standards

3.2.8 critical charge

minimum amount of charge collected at a sensitive node due to a charged particle strike that results in a SEE

3.2.9 cross-section

<single event phenomena> probability of a single event effect occurring per unit incident particle fluence

NOTE This is experimentally measured as the number of events recorded per unit fluence.

3.2.10 cross-section

<nuclear or electromagnetic physics> probability of a particle interaction per unit incident particle fluence

NOTE It is sometimes referred to as the *microscopic cross-section*. Other related definition is the macroscopic cross section, defines as the probability of an interaction per unit path-length of the particle in a material.

3.2.11 directional dose equivalent

dose at a point equivalent to the one produced by the corresponding expanded radiation field in the ICRU sphere at a specific depth d on a radius on a specified direction

NOTE 1 It is normally expressed as $H'(d, \Omega)$, where d is the specific depth used in its definition, in mm, and Ω is the direction.

NOTE 2 $H'(d, \Omega)$, is relevant to weakly-penetrating radiation where a reference depth of 0,07 mm is usually used and the quantity denoted $H'(0,07, \Omega)$.

3.2.12 displacement damage

crystal structure damage caused when particles lose energy by elastic or inelastic collisions in a material

3.2.13 dose

quantity of radiation delivered at a position

NOTE 1 In its broadest sense this can include the flux of particles, but in the context of space energetic particle radiation effects, it usually refers to the energy absorbed locally per unit mass as a result of radiation exposure.

NOTE 2 If "dose" is used unqualified, it refers to both ionising and non-ionising dose. Non-ionising dose can be quantified either through energy deposition via displacement damage or damage-equivalent fluence (see Clause 8).

3.2.14 dose equivalent

absorbed dose at a point in tissue which is weighted by quality factors which are related to the LET distribution of the radiation at that point

3.2.15 dose rate

rate at which radiation is delivered per unit time

3.2.16 effective dose

sum of the equivalent doses for all irradiated tissues or organs, each weighted by its own value of tissue weighting factor

NOTE 1 It is normally represented by E , and in accordance with the definition it is calculated with the equation below, and the w_T is specified in the ICRP-92 standard [RDH.22]:

$$E = \sum w_T \cdot H_T \quad (1)$$

For further discussion on E , see ECSS-E-HB-10-12 Section 10.2.2.

NOTE 2 Effective dose, like organ equivalent dose, is measured in units of sievert, Sv. Occasionally this use of the same unit for different quantities can give rise to confusion.

3.2.17 energetic particle

particle which, in the context of space systems radiation effects, can penetrate outer surfaces of spacecraft

3.2.18 equivalent dose

See 3.2.41 (organ equivalent dose)

3.2.19 equivalent fluence

quantity which represents the damage at different energies and from different species by a fluence of monoenergetic particles of a single species

NOTE 1 These are usually derived through testing.

NOTE 2 Damage coefficients are used to scale the effect caused by particles to the damage caused by a standard particle and energy.

3.2.20 extrapolated range

range determined by extrapolating the line of maximum gradient in the intensity curve until it reaches zero intensity

3.2.21 Firsov scattering

the reflection of fast ions from a dense medium at glancing angles

NOTE See references [2].

3.2.22 fluence

time-integration of flux

NOTE It is normally represented by Φ .

3.2.23 flux

<unidirectional incident particles> number of particles crossing a surface at right angles to the particle direction, per unit area per unit time

3.2.24 flux

<arbitrary angular distributions> number of particles crossing a sphere of unit cross-sectional area (i.e. of radius $1/\sqrt{\pi}$) per unit time

NOTE 1 For arbitrary angular distributions, it is normally known as omnidirectional flux.

NOTE 2 Flux is often expressed in “integral form” as particles per unit time (e.g. electrons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) above a certain energy threshold.

NOTE 3 The directional flux is the differential with respect to solid angle (e.g. particles- cm^{-2} steradian $^{-1}\text{s}^{-1}$) while the “differential” flux is

differential with respect to energy (e.g. particles-cm⁻²MeV⁻¹s⁻¹). In some cases fluxes are treated as a differential with respect to linear energy transfer rather than energy.

3.2.25 ICRU sphere

sphere of 30 cm diameter made of ICRU soft tissue

NOTE This definition is provided by the International Commission of Radiation Units and Measurements Report 33 [12].

3.2.26 ICRU Soft Tissue

tissue equivalent material with a density of 1 g/cm³ and a mass composition of 76,2 % oxygen, 11,1 % carbon, 10,1 % hydrogen and 2,6 % nitrogen.

NOTE This definition is provided in the ICRU Report 33 [12].

3.2.27 ionising dose

amount of energy per unit mass transferred by particles to a target material in the form of ionisation and excitation

3.2.28 ionising radiation

transfer of energy by means of particles where the particle has sufficient energy to remove electrons, or undergo elastic or inelastic interactions with nuclei (including displacement of atoms), and in the context of this standard includes photons in the X-ray energy band and above

3.2.29 isotropic

property of a distribution of particles where the flux is constant over all directions

3.2.30 L or L-shell

parameter of the geomagnetic field often used to describe positions in near-Earth space

NOTE L or L-shell has a complicated derivation based on an invariant of the motion of charged particles in the terrestrial magnetic field. However it is useful in defining plasma regimes within the magnetosphere because, for a dipole magnetic field, it is equal to the geocentric altitude in Earth-radii of the local magnetic field line where it crosses the equator.

3.2.31 linear energy transfer (LET)

rate of energy deposited through ionisation from a slowing energetic particle with distance travelled in matter, the energy being imparted to the material

NOTE 1 LET is normally used to describe the ionisation track caused due to the passage of an ion. LET

is material dependent and is also a function of particle energy and charge. For ions involved in space radiation effects, it increases with decreasing energy (it also increases at high energies, beyond the minimum ionising energy). LET allows different ions to be considered together by simply representing the ion environment as the summation of the fluxes of all ions as functions of their LETs. This simplifies single-event upset calculation. The rate of energy loss of a particle, which also includes emitted secondary radiations, is the stopping power.

NOTE 2 LET is not equal to (but is often approximated to) particle electronic stopping power, which is the energy loss due to ionisation and excitation per unit pathlength.

3.2.32 LET Threshold

minimum LET that a particle should have to cause a SEE in a circuit when going through a device sensitive volume

3.2.33 margin

factor or difference between the design environment specification for a device or product and the environment at which unacceptable behaviour occurs

3.2.34 mean organ absorbed dose

energy absorbed by an organ due to ionising radiation divided by its mass

NOTE It is normally represented by DT, and in accordance with the definition, it is calculated with the equation (35) in ECSS-E-HB-10-12 Section 10.2.2. The unit is the gray (Gy), being 1 Gy = 1 joule / kg.

3.2.35 mean range

integral pathlength travelled by particles in a material after which the intensity is reduced by a factor of $e \approx 2,7183$

NOTE In accordance with the above definition, it is not the range at which all particles are stopped.

3.2.36 multiple bit upset (MBU)

set of bits corrupted in a digital element that have been caused by direct ionisation from a single traversing particle or by recoiling nuclei and/or secondary products from a nuclear interaction

NOTE MCU and SMU are special cases of MBU.

3.2.37 multiple cell upset (MCU)

set of physically adjacent bits corrupted in a digital element that have been caused by direct ionisation from a single traversing particle or by recoiling nuclei from a nuclear interaction

3.2.38 (total) non-ionising dose, (T)NID, or non-ionising energy loss (NIEL) dose

energy absorption per unit mass of material which results in damage to the lattice structure of solids through displacement of atoms

NOTE Although the SI unit of TNID or NIEL dose is the gray (see definition 3.2.34), for spacecraft radiation effects, MeV/g(material) is more commonly used in order to avoid confusion with ionising energy deposition, *e.g.* MeV/g(Si) for TNID in silicon.

3.2.39 NIEL or NIEL rate or NIEL coefficient

rate of energy loss in a material by a particle due to displacement damage per unit pathlength

3.2.40 omnidirectional flux

scalar integral of the flux over all directions

NOTE This implies that no consideration is taken of the directional distribution of the particles which can be non-isotropic. The flux at a point is the number of particles crossing a sphere of unit cross-sectional surface area (i.e. of radius $1/\sqrt{\pi}$) per unit time. An omnidirectional flux is not to be confused with an isotropic flux.

3.2.41 organ equivalent dose

sum of each contribution of the absorbed dose by a tissue or an organ exposed to several radiation types, weighted by the each radiation weighting factor for the radiations impinging on the body

NOTE 1 The organ equivalent dose, an ICRP-60 [11] defined quantity, is normally represented by H_T , and usually shortened to **equivalent dose**. In accordance with the definition, it is calculated with the equation below (for further discussion, see ECSS-E-HB-10-12 Section 10.2.2):

$$H_T = \sum w_R \cdot D_{T,R} \quad (2)$$

NOTE 2 The organ equivalent dose is measured in units of sievert, Sv, where $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$. The unit rem (roentgen equivalent man) is still used, where $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$.

3.2.42 personal dose equivalent (individual dose equivalent)

dose equivalent in ICRU soft tissue at a depth in the body

NOTE 1 The personal dose equivalent, and ICRU quantity, is normally represented by $H_p(d)$ for strongly penetrating radiation at a depth d in millimetres that is appropriate for strongly penetrating radiation. A reference depth of 10 mm is usually used. It varies both as a function of individuals and location and is appropriate for organs and tissues deeply situated in the body.

NOTE 2 It is normally represented by $H_s(d)$ for weakly penetrating radiation (superficial) at a depth d in millimetres that is appropriate for weakly penetrating radiation. A reference depth of 0,07 mm is usually used. It varies both as a function of individuals and location and is appropriate for superficial organs and tissues which are going to be irradiated by both weakly and strongly penetrating radiation.

3.2.43 plasma

partly or wholly ionised gas whose particles exhibit collective response to magnetic or electric fields

NOTE The collective motion is brought about by the electrostatic Coulomb force between charged particles. This causes the particles to rearrange themselves to counteract electric fields within a distance of the order of the Debye length. On spatial scales larger than the Debye length plasmas are electrically neutral.

3.2.44 projected range

average depth of penetration of a particle measured along the initial direction of the particle

3.2.45 quality factor

factor accounting for the different biological efficiencies of ionising radiation with different LET, and used to convert the absorbed dose to operational parameters (ambient dose equivalent, directional dose equivalent and personal dose equivalent)

NOTE 1 Quality factor, normally represented by Q , are used (rather than radiation or tissue weighting factors) to convert the absorbed dose to dose equivalent quantities described above (ambient dose equivalent, directional dose equivalent and personal dose equivalent). Its actual values are given by ICRP-60 [11] (see 11.2.3.2).

NOTE 2 Prior to ICRP-60 [11], quality factors were synonymous to radiation weighting factors.

3.2.46 radiation

transfer of energy by means of a particle (including photons)

NOTE In the context of this Standard, electromagnetic radiation below the X-ray band is excluded. This therefore excludes UV, visible, thermal, microwave and radiowave radiation.

3.2.47 radiation design margin (RDM)

<cumulative process> ratio of the radiation tolerance or capability of the component, system or protection limit for astronaut, to the predicted radiation environment for the mission or phase of the mission

NOTE The component tolerance or capability, above which its performance becomes non-compliant, is project-defined.

3.2.48 radiation design margin (RDM)

<non-destructive single event> ratio of the design SEE tolerance to the predicted SEE rate for the environment

NOTE The design SSE tolerance is the acceptable SEE rate which the equipment or mission can experience while still meeting the equipment reliability and availability requirements.

3.2.49 radiation design margin (RDM)

<destructive single event> ratio of the acceptable probability of component failure by the SEE mechanism to the calculated probability of failure

NOTE the acceptable probability of component failure is based on the equipment reliability and availability specifications.

3.2.50 radiation design margin (RDM)

<biological effect> ratio of the protection limits defined by the project for the mission to the predicted exposure for the crew

3.2.51 radiation weighting factor

factor accounting for the different levels of radiation effects in biological material for different radiations at the same absorbed dose

NOTE It is normally represented by w_R . Its value is defined by ICRP (see clause 11.2.2.2).

3.2.52 relative biological effectiveness (RBE)

inverse ratio of the absorbed dose from one radiation type to that of a reference radiation that produces the same radiation effect

NOTE 1 The radiation type is usually ^{60}Co or 200-250 keV X-rays.

NOTE 2 In contrast to the weighting or quality factors, RBE is an empirically founded measurable quantity. For additional information on RBE, see ECSS-E-HB-10-12 Section 10.2.2.

3.2.53 sensitive volume (SV)

charge collection region of a device

3.2.54 single event burnout (SEB)

destructive triggering of a vertical n-channel transistor or power NPN transistor accompanied by regenerative feedback

3.2.55 single event dielectric rupture (SEDR)

formation of a conducting path triggered by a single ionising particle in a high-field region of a dielectric

NOTE For example, in linear devices, or in FPGAs.

3.2.56 single event disturb (SED)

momentary voltage excursion (voltage spike) at a node in an integrated circuit, originally formed by the electric field separation of the charge generated by an ion passing through or near a junction

NOTE SED is similar to SET, but used to refer to such events in digital microelectronics.

3.2.57 single event effect (SEE)

effect caused either by direct ionisation from a single traversing particle or by recoiling nuclei emitted from a nuclear interaction

3.2.58 single event functional interrupt (SEFI)

interrupt caused by a single particle strike which leads to a temporary non-functionality (or interruption of normal operation) of the affected device

3.2.59 single event gate rupture (SEGR)

formation of a conducting path triggered by a single ionising particle in a high-field region of a gate oxide

3.2.60 single event hard error (SEHE)

unalterable change of state associated with semi-permanent damage to a memory cell from a single ion track

3.2.61 single event latch-up (SEL)

potentially destructive triggering of a parasitic PNP thyristor structure in a device