

DIN EN 62396-1

ICS 49.090

Einsprüche bis 2011-01-15

Entwurf**Luftfahrtelektronik-Prozessmanagement –
Atmosphärische Strahlungseffekte –****Teil 1: Akkommodation von atmosphärischen Strahlungseffekten über
Einzelereignis-Effekte innerhalb elektronischer Luftfahrtausrüstungen
(IEC 107/129/DTS:2010)**

Process management for avionics –

Atmospheric radiation effects –

Part 1: Accommodation of atmospheric radiation effects via single event effects within
avionics electronic equipment (IEC 107/129/DTS:2010)**Anwendungswarnvermerk**

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2010-11-15 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 als Datei per E-Mail an dke@din.de 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 online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im
DIN und VDE (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 161 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Abkürzungen in diesem Dokument	14
5 Strahlungsumgebung der Atmosphäre.....	16
5.1 Erzeugung von Strahlung	16
5.2 Auswirkungen der Sekundärteilchen auf Luftfahrtausrüstungen.....	16
5.3 Atmosphärische Neutronen	17
5.4 Sekundärprotonen	22
5.5 Weitere Teilchen.....	23
5.6 Verstärkte Sonnenaktivitäten.....	23
5.7 Große Höhen von 60 000 ft bis zu Höhen größer als 60 000 ft (18 290 m).....	24
6 Auswirkungen der atmosphärischen Strahlung auf Luftfahrtausrüstungen	24
6.1 Arten der Strahlungsauswirkung	24
6.2 Einzelereignis-Effekte.....	25
6.3 Gesamtionisationsdosis (TID)	30
6.4 Verschiebungsschaden	31
7 Leitfaden für Systementwicklungen.....	32
7.1 Übersicht.....	32
7.2 Systementwicklung	34
7.3 Betrachtungen zur Gerätetechnik.....	35
7.4 Kenndatenermittlung und Kontrolle der Teile	36
8 Bestimmung der Raten von Einzelereignis-Effekten bei Luftfahrtausrüstungen.....	38
8.1 Haupt-Einzelereignis-Effekte	38
8.2 Einzelereignis-Effekte mit niedrigen Ereignisraten.....	38
8.3 Einzelereignis-Effekte mit höheren Ereignisraten – Daten von Störungen durch Einzelereignis	40
8.4 Berechnung von SEE-Raten in Luftfahrtausrüstungen	48
8.5 Berechnung der Verfügbarkeit der vollen Redundanz	48
9 Betrachtungen zur SEE-Einhaltung.....	50
9.1 Einhaltung.....	50
9.2 Bestätigung der Strahlungsumgebung für die Luftfahrtausrüstung.....	50
9.3 Festlegung der Entwicklungssicherungsebene des Systems	50
9.4 Vorläufige Bewertung der Konstruktion elektronischer Ausrüstungen hinsichtlich SEE.....	50
9.5 Überprüfen, dass die Anforderungen an die Entwicklungssicherungsebene des Systems für SEE eingehalten werden	50
9.6 Abhilfemaßnahmen	51

	Seite
Anhang A (informativ) Bewertung thermischer Neutronen.....	52
Anhang B (informativ) Berechnungsverfahren für SEE-Raten in der Elektronik von Luftfahrtausrüstungen	53
Anhang C (informativ) Übersicht über die Verfügbarkeit von Prüfeinrichtungen	59
Anhang D (informativ) Tabellarische Beschreibung der Schwankung des atmosphärischen Neutronenflusses in Abhängigkeit von der Höhe und der geografischen Breite	69
Anhang E (informativ) Betrachtungen zu den Auswirkungen in größeren Höhen	70
Literaturhinweise	77

Bilder

Bild 1 – Energiespektrum der atmosphärischen Neutronen bei 40 000 ft (12 160 m), 45° Breite	18
Bild 2 – Schwankung des atmosphärischen Neutronenflusses mit der Höhe (siehe Anhang D)	19
Bild 3 – Verteilung der vertikalen Stabilitätsgrenzen um die Erde	20
Bild 4 – Schwankung des atmosphärischen Neutronenflusses 1 MeV bis 10 MeV als Funktion der geografischen Breite	21
Bild 5 – Energiespektrum von Protonen in der Atmosphäre	22
Bild 6 – Bewertungsverfahren für die Systemsicherheit.....	32
Bild 7 – SEE im Verhältnis zu System und LRU	34
Bild 8 – Schwankungen des SEU-Querschnittes von RAMs in Abhängigkeit von der Neutronen-/Protonenenergie.....	43
Bild 9 – Daten von SEU-Bit-Querschnitten für Neutronen und Protonen.....	44
Bild 10 – SEU-Querschnitt in SRAMs in Abhängigkeit vom Fertigungsdatum.....	46
Bild 11 – SEU-Querschnitt in DRAMs in Abhängigkeit vom Herstellungsdatum	47
Bild E.1 – Integrale LET-Spektren in Silizium bei 100 000 ft für Stabilitätsgrenzen (R) von 0 GV bis 17 GV	70
Bild E.2 – Integrale LET-Spektren in Silizium bei 75 000 ft für Stabilitätsgrenzen (R) von 0 GV bis 17 GV	71
Bild E.3 – Integrale LET-Spektren in Silizium bei 55 000 ft für Stabilitätsgrenzen (R) von 0 GV bis 17 GV	71
Bild E.4 – Einfluss der solaren Modulation auf integrale LET-Spektren in Silizium bei 55 000 ft für die Stabilitätsgrenzen (R) 0 GV und 8 GV	72
Bild E.5 – Einfluss der solaren Modulation auf integrale LET-Spektren in Silizium bei 55 000 ft für die Stabilitätsgrenzen (R) 0 GV und 8 GV	72
Bild E.6 – Berechnete Beiträge von Neutronen, Protonen und Schwerionen zu den SEU-Raten beim Hitachi-A-4-Mbit-SRAM in Abhängigkeit von der Höhe bei einer Stabilitätsgrenze (R) von 0 GV	73
Bild E.7 – Berechnete Beiträge von Neutronen, Protonen und Schwerionen zu den SEU-Raten beim Hitachi-A-4-Mbit-SRAM in Abhängigkeit von der Höhe bei einer Stabilitätsgrenze (R) von 8 GV	73
Bild E.8 – Beispiel eines differenziellen LET-Spektrums	75
Bild E.9 – Beispiel einer integralen Sehnenlängenverteilung bei einer Umgebung aus isotropen Teilchen.....	75

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 107/129/DTS:2010 „Process management for avionics – Atmospheric radiation effects – Part 1: Accommodation of atmospheric radiation effects via single event effects within avionics electronic equipment“ (DTS, en: Draft Technical Specification) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

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

Das internationale Dokument wurde vom TC 107 „Process Management for Avionics“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der DTS als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 684 „Process Management for Avionics“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

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

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

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Luftfahrtelektronik-Prozessmanagement – Atmosphärische Strahlungseffekte – Teil 1: Akkommodation von atmosphärischen Strahlungseffekten über Einzelereignis-Effekte innerhalb elektronischer Luftfahrtausrüstungen

Einleitung

Diese industrieweite Technische Spezifikation enthält Angaben für Entwickler von Luftfahrtausrüstungssystemen, Hersteller von elektronischen Ausrüstungen, Geräten und von Bauelementen sowie deren Kunden über die Art der ionisierenden Strahlungsumgebung, denen ihre Geräte/Bauelemente in einem Luftfahrzeug ausgesetzt sind, und über die möglichen Auswirkungen dieser Strahlungsumgebung auf die Geräte/Bauelemente sowie einige allgemeine Herangehensweisen bei der Behandlung dieser Auswirkungen.

Dieselbe atmosphärische Strahlung (Neutronen und Protonen), die für die Strahlenbelastung verantwortlich ist, der Besatzung und Passagiere während des Fluges ausgesetzt sind, ist auch verantwortlich für die Entstehung von Einzelereignis-Effekten (SEE) in Ausrüstungen der Luftfahrtelektronik. Hinsichtlich der Strahlenbelastung von Passagieren und Besatzung von Luftfahrzeugen wurden in den letzten Jahren umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Eine standardisierte Herangehensweise der Industrie an die Auswirkungen der atmosphärischen Neutronen auf die Elektronik sollte den fortlaufenden Arbeiten hinsichtlich der Strahlungsbelastung von Passagieren und Besatzung von Luftfahrzeugen entsprechen und dieselben erweitern.

Atmosphärische Strahlungseffekte sind ein Faktor, der zu schweren und leichten Fehlzustandsraten der Ausrüstungen/Geräte beitragen kann. Aus der Sicht der Systemsicherheit unter Verwendung abgeleiteter Werte der Fehlzustandsraten passt die in ARP4754 beschriebene Methodik (Akkommodation von schweren und leichten Fehlzustandsraten im Allgemeinen) auch Auswirkungsraten der atmosphärischen Strahlung an.

Außerdem bezieht sich diese Technische Spezifikation auf die JEDEC-Norm JESD89A, die leichte Fehler in der Elektronik durch atmosphärische Strahlung auf Bodenniveau beschreibt (für Höhen unter 10 000 ft (3 040 m)).

1 Anwendungsbereich

Diese Technische Spezifikation liefert Hinweise zu Auswirkungen der atmosphärischen Strahlung auf die in Luftfahrzeugen eingesetzten Luftfahrtausrüstungen, welche in Höhen bis 60 000 ft (18,3 km) arbeiten. Sie definiert die Strahlungsumgebung, die Auswirkungen dieser Umgebung auf die Elektronik und enthält Konstruktionsbetrachtungen für die Akkommodation dieser Auswirkungen in Luftfahrtausrüstungssystemen. In dieser Ausgabe sind weitere Hinweise zur Umgebung in Höhen bis 80 000 ft (24,38 km) enthalten und die Auswirkungen auf die Elektronik sind in Anhang E beschrieben.

Diese Technische Spezifikation ist als Hilfestellung für Hersteller und Konstrukteure von Luftfahrtausrüstungen vorgesehen, um ihre Herangehensweise an Einzelereignis-Effekte in der Luftfahrtelektronik durch Bereitstellung eines Leitfadens zu vereinheitlichen, der zu einer Standardmethodik führt.

Einzelheiten der Strahlungsumgebung werden gemeinsam mit der Identifizierung möglicher Probleme angegeben, die durch die empfangene atmosphärische Strahlung verursacht werden. Für die Quantifizierung der Häufigkeiten von Einzelereignis-Effekten (SEE) in elektronischen Bauelementen werden entsprechende Verfahren angegeben. Die Methodik hinsichtlich der Gesamtsicherheit des Systems sollte erweitert werden, um Häufigkeiten von Einzelereignis-Effekten zu erfassen und die Eignung der Elektronik für die Anwendung auf Bauteil- und Systemebene nachzuweisen.

2 Normative Verweisungen

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

IEC/TS 62239, *Process management for avionics – Preparation of an electronic components management plan*

IEC/TS 62396-2, *Guidelines for single event effects testing for avionics systems*

IEC/TS 62396-3, *Guidelines to optimize avionics system design to reduce single event effects rates*

IEC/TS 62396-4, *Guidelines for designing with high voltage aircraft electronics and potential single event effects*

IEC/TS 62396-5, *Guidelines for assessing thermal neutron fluxes and effects in avionics systems*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ANMERKUNG Die Anwender dieser Technischen Spezifikation dürfen andere Begriffe verwenden, die mit den Vereinbarungen innerhalb ihrer Firma im Einklang stehen.

3.1

empfohlene Luftfahrtpraxis

diese Schriftstücke, die sich auf Luftfahrtausrüstungen beziehen, werden von der Society of Automotive Engineers Inc. herausgegeben

3.2

analoge Transiente durch Einzelereignis

ASET

ist ein unerwünschtes Signal oder eine unerwünschte Spannung, das bzw. die durch Anlagerung von Ladung durch ein einzelnes Teilchen am Ausgang eines analogen Bauelements hervorgerufen wird

3.3

Verfügbarkeit

ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein System zu einem Zeitpunkt t arbeitet, ungeachtet der Anzahl früherer Ausfälle oder Reparaturen. Bei Ausrüstungen der Zeitabschnitt, in dem die Ausrüstung funktionsfähig ist, dividiert durch die Gesamtzeit seiner voraussichtlichen Betriebsfähigkeit, d. h. die Zeit, in der die Ausrüstung funktionsfähig ist, zuzüglich aller Reparaturzeiten

3.4

Umgebung für Luftfahrtausrüstungen

anwendbare Umgebungsbedingungen (die in der Spezifikation der Ausrüstungen/Geräte festgelegt sind), die die Ausrüstungen/Geräte ohne Verlust oder Beeinträchtigung ihres Leistungsverhaltens während ihres Herstellungszyklus und der Instandhaltungsdauer (Dauer, die vom Hersteller der Ausrüstungen/Geräte in Verbindung mit dem Kunden festgelegt ist) aushalten müssen

3.5

geeignet

Begriff, um anzugeben, dass ein Bauelement in der vorgesehenen Anwendung erfolgreich verwendet werden kann

3.6

zertifiziert

gibt die Bewertung und Übereinstimmung mit einer zutreffenden Norm eines Dritten und die Aufrechterhaltung eines Zertifikats und einer Registrierung an (d. h. JAN, IECQ-CECC)

3.7

Kennwertbestimmung

Prozess der Prüfung einer Stichprobe von Bauelementen zur Bestimmung der wesentlichen Werte elektrischer Parameter, die von allen hergestellten Bauelementen des geprüften Typs erwartet werden können

3.8

Bauelementeanwendung

Prozess, mit dem sichergestellt wird, dass das Bauelement die Konstruktionsanforderungen der Ausrüstung/ des Gerätes erfüllt, in der /dem es eingesetzt ist

3.9

Bauelementehersteller

Organisation, die für die Spezifikation und die Herstellung des Bauelementes verantwortlich ist

3.10

kritische Ladung

kleinste Ladung, die einen SEE verursacht, wenn sie in das empfindliche Volumen injiziert oder darin angelagert wird

ANMERKUNG Einheiten: Pikocoloumb (pC). Die kritische Ladung wird für viele Geräte gegenwärtig bereits in Femtocoloumb (fC) und nicht in pC gemessen.

3.11

Querschnitt

σ

in strahlungstechnischer Hinsicht für die Protonen- und Neutronen-Wechselwirkungen ist dies eine Kombination aus empfindlicher Fläche und der Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung mit der Anlagerung der kritischen Ladung für einen SEE.

Der Querschnitt kann mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\sigma = \text{Anzahl der Fehler/Teilchenfluenz}$$

ANMERKUNG Die Einheiten für den Querschnitt sind cm^2 je Bauelement oder cm^2 je Bit.

3.12**digitale Transiente durch Einzelereignis
DSET**

ist ein unerwünschtes digitales Signal oder eine unerwünschte digitale Spannung, das bzw. die durch Anlagerung von Ladung durch ein einzelnes Teilchen hervorgerufen wird und sich durch den Stromkreislauf während eines Taktzyklus ausbreiten kann (siehe 6.2.4)

3.13**Elektron**

Elementarteilchen mit etwa der 1/1 840 der Atommasse und einer negativen Ladung von $1,602 \times 10^{-19}$ C

3.14**Managementplan für elektronische Bauelemente
ECMP**

Dokument des Herstellers von Ausrüstungen/Geräten, das die Prozesse und Vorgehensweisen für die Anwendung von Bauelementen für eine Ausrüstung/ein Gerät oder eine Reihe von Ausrüstungen/Geräten festlegt. Im Allgemeinen befasst es sich mit allen betreffenden Aspekten der Lenkung/Überwachung von Bauelementen bei Systemdesign, Entwicklung, Herstellung und Unterstützung nach der Herstellung

3.15**elektronische Bauelemente**

elektrische oder elektronische Bauelemente, die nicht ohne Zerstörung oder Verschlechterung ihres vorgesehenen Einsatzzweckes auseinandergenommen werden können. Sie werden mitunter als elektronische Teile oder Bauteile bezeichnet.

ANMERKUNG Beispiele sind Widerstände, Kondensatoren, Dioden, integrierte Schaltungen, Hybridbauelemente, anwendungsspezifische integrierte Schaltungen, Wickelbauelemente und Relais.

3.16**elektronische Ausrüstung
elektronisches Gerät**

Einheit, die von einem Ausrüstungs-/Gerätehersteller hergestellt wird und die eingebaute elektronische Bauelemente hat.

ANMERKUNG Beispiele sind Endgeräte, Baugruppen, Schnelltauschbaugruppen und werkstattaustauschbare Einheiten.

3.17**elektronisches Flugüberwachungsinstrumentensystem
EFIS**

Beispiel eines Luftfahrtelektroniksystems, bei dem für die Systementwicklung die Sicherungsstufe A Typ II erforderlich ist und bei dem der Pilot durch den Pilot-System-Informationsaustausch in den Regelkreis eingebunden wird

3.18**Experte**

besitzt die nachgewiesene Kompetenz, Kenntnisse und Fertigkeiten auf einen spezifischen Gegenstand anwenden zu können

3.19**fester Fehlzustand**

Begriff, der auf der Funktionsebene des Luftfahrzeugs angewendet wird. Es ist ein Fehlzustand, der außer durch Neubooten des Systems oder durch Aus- und Einschalten des betreffenden Funktionselementes nicht zurückgesetzt werden kann. Ein derartiger Fehlzustand könnte den Wert für die MTBF des LRU beeinflussen und keinen Fehlzustandsnachweis während der anschließenden Prüfung liefern

3.20

Fly-by-Wire FBW

Beispiel für ein Luftfahrtelektroniksystem, bei dem die Sicherungsstufe A Typ I für die Systementwicklung erforderlich ist und bei dem sich der Pilot nicht innerhalb des Regelkreises der Flugzeugstabilität befindet

3.21

Funktionsgefährdungsanalyse

FHA

Bewertung aller Gefährdungen hinsichtlich einer Gruppe definierter Gefährdungsklassen

3.22

GeV

Teilchen-Strahlungsenergie Gigaelektronenvolt (eintausend Millionen Elektronenvolt).

ANMERKUNG Die äquivalente Energie in SI-Einheiten ist 160,2 pJ (Pikojoule).

3.23

Gray

Gy

SI-Einheit der ionisierenden Strahlungsdosis und ist die Energie, welche sich als Ionisation und Anregung (J) je Masseneinheit (kg) anlagert.

ANMERKUNG Entsprechende Einheiten sind Zentigray (cGy) und rad. 1 cGy entspricht 1 rad.

3.24

schwerer Fehler

bleibende oder teilpermanente Beschädigung einer Zelle durch atmosphärische Strahlung, die selbst durch Aus- und Einschalten der Stromversorgung nicht zu beheben ist

3.25

schwerer Fehlzustand

Begriff, der auf der Funktionsebene des Luftfahrzeugs angewendet wird. Er bezieht sich auf den bleibenden Fehlzustand eines Bauteils in einer LRU. Ein schwerer Fehlzustand führt zur Entnahme der betroffenen LRU und dem Austausch des bleibend beschädigten Bauteils bevor ein System/eine Systemarchitektur bis zur vollständigen Funktionalität wiederhergestellt werden kann. Ein derartiger Fehlzustand kann sich möglicherweise auf den Wert der MTBF der reparierten LRU auswirken

3.26

Schwerionen

positiv geladene Kerne der Elemente, die schwerer als Wasserstoff und Helium sind

3.27

in-the-loop

Prüfmethodik, bei der eine LRU einem Strahlenbündel ausgesetzt wird, das der atmosphärischen Neutronenumgebung nachgebildet ist, und bei der die Eingangsgrößen für die LRU von einem elektronischen Prüfstand außerhalb des Bündels bereitgestellt werden, um ein geschlossenes Schleifensystem zu ermöglichen

ANMERKUNG Zum elektronischen Prüfstand könnte ein Host-Computer für das Luftfahrzeug-Simulationsmodell gehören. Für die Kompatibilität zur LRU könnte zum elektronischen Prüfstand auch eine entsprechende Signalaufbereitung gehören. Im Falle einer automatischen Steuerfunktion könnten die Ausgangssignale der LRU der Reihe nach an Stellglieder oder an den Host-Computer übermittelt werden. Der Host-Computer würde automatisch eine Stabilitätsregelschleife schließen (wie bei einem Fly-by-Wire-Steuersystem). Im Falle einer Navigationsfunktion könnten die Ausgangssignale der LRU an ein Anzeigesystem übermittelt werden, wo dann der Pilot die Navigationsregelschleife schließen könnte.

3.28**integrierte modulare Luftfahrtausrüstung****IMA**

Umsetzung von Luftfahrzeugfunktionen in einer Multitask-Rechnerumgebung, bei der die Berechnungen für jedes spezifische System, welches eine besondere Funktion umsetzt, auf eine Partition auf einer gemeinsamen Rechnerressource begrenzt sind (ein einzelner digitaler elektronischer Schaltkreis)

3.29**latch-up****einrasten**

Auslösen eines parasitären pnpn-Kreises im CMOS-Substrat, das zu einem Zustand führt, bei dem der parasitäre Einraststrom den Haltestrom überschreitet; dieser Zustand bleibt bei anliegender Spannung erhalten

3.30**lineares Energieübertragungsvermögen****LET**

in einem Halbleiter je Einheitsweglänge angelagerte Energie entlang eines Strahlungspfades

ANMERKUNG Einheiten: MeV cm²/mg.

3.31**Schwellenwert des linearen Energieübertragungsvermögens****LET_{th}**

bei einem bestimmten Bauelement derjenige kleinste LET, um bei einer Teilchenfluenz von 1×10^7 Ionen/cm² einen Effekt zu erzeugen

3.32**Schnelltauschbaugruppe****LRU**

Teil eines Luftfahrtelektronik-Betriebsmittels, das während des Wartungszyklus des Systems ausgetauscht werden kann

3.33**darf**

gibt einen Ablauf von Tätigkeiten an, der innerhalb der Grenzen dieses Dokuments zulässig ist

3.34**MeV**

Teilchen-Strahlungsenergie Megaelektronenvolt (eine Million Elektronenvolt)

ANMERKUNG Die äquivalente Energie in SI-Einheiten ist 160,2 fJ (Femtojoule).

3.35**mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen****MTBF**

ist ein Maß der Zuverlässigkeitsanforderungen und ist die mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen von Ausrüstungen oder Systemen, die in Betrieb sind

3.36**mittlere Betriebsdauer zwischen außerplanmäßigen Austauschvorgängen****MTBUR**

ist ein Maß der Zuverlässigkeitsanforderungen und ist die mittlere Betriebsdauer zwischen außerplanmäßigen Austauschvorgängen von Ausrüstungen oder Systemen während des Betriebs

3.37**Störung mehrerer Bit****MBU**

tritt auf, wenn die im Silizium eines elektronischen Bauelementes durch ein einzelnes Ionisierungsteilchen angelagerte Energie die Störung (das „Umkippen“) von mehr als einem Bit in demselben Wort verursacht

ANMERKUNG Die Definition von MBU wurde aufgrund der Aufnahme des Begriffes MCU geändert.

3.38

Störung mehrerer Zellen

MCU

tritt auf, wenn die im Silizium eines elektronischen Bauelementes durch ein einzelnes Ionisierungsteilchen angelagerte Energie zur gleichzeitigen Störung mehrerer Bits in einer IC führt

3.39

Neutron

Elementarteilchen mit der atomaren Massenzahl von Eins, das keine Ladung trägt. Mit Ausnahme von Wasserstoff ist es ein Bestandteil jedes Atomkerns

3.40

Teilchenfluenz

bei einem einseitig gerichteten Teilchenstrahl die Anzahl der Teilchen, die eine Einheitsoberfläche rechtwinklig zum Strahl überstreichen. Bei einem isotropen Fluss ist es die Anzahl der in eine Kugel mit Einheitsquerschnitt eintretenden Teilchen

ANMERKUNG Einheiten: Teilchen/cm²

3.41

Teilchenfluss

Fluenzrate je Zeiteinheit

ANMERKUNG Einheiten: Teilchen/cm²·s.

3.42

Pion oder Pi-Meson

subatomares Teilchen. Die Ladungsmöglichkeiten sind (+1, -1, 0), welche durch energetische Kernwechselwirkungen erzeugt werden

3.43

vorläufige Analyse der Systemsicherheit

PSSA

Beurteilung der geplanten Architektur, um die Annehmbarkeit der Architektur hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen an die Systemsicherheit zu bestimmen

3.44

Proton

Elementarteilchen mit der atomaren Massenzahl von Eins und mit positiver elektrischer Ladung. Es ist ein Bestandteil aller Atomkerne

3.45

Zuverlässigkeit

R(t)

bei einem System mit konstanter Ausfallrate die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass das System betriebsfähig bleibt über das Zeitintervall 0 bis t, das gegeben ist durch:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{und} \quad \lambda = 1/\text{MTBF}$$

MTBF = mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen

3.46

Risiko

Maß für die mögliche Unfähigkeit, die Gesamtziele eines Programms innerhalb der festgelegten Kosten, Zeitplanung und technischen Randbedingungen zu erreichen

3.47

Durchbrennen durch Einzelereignis

SEB

tritt auf, wenn ein unter Spannung stehendes elektronisches Bauelement oder ein Teil davon im Ergebnis der Energieaufnahme, welche durch ein einzelnes Strahlungsereignis ausgelöst wurde, durchgebrannt ist

3.48**Einzelereignis-Effekt****SEE**

Empfindlichkeit eines Bauelements, die durch den Einfluss eines einzelnen Teilchens (z. B. galaktische kosmische Strahlen, energiereiche Solarteilchen, energiereiche Neutronen und Protonen) verursacht wird

ANMERKUNG Der Empfindlichkeitsbereich kann nichtzerstörende (z. B. Störung) und zerstörende (z. B. „Latch-up“ oder Gate-Durchbruch) Erscheinungen umfassen.

3.49**Funktionsunterbrechung durch Einzelereignis****SEFI**

Störung, üblicherweise in einem komplexen Bauelement, z. B. Mikroprozessor, derart, dass ein Steuerpfad stark verändert wurde und dazu führt, dass das Bauelement die richtige Funktion nicht mehr ausführt

ANMERKUNG Diese Auswirkung wurde manchmal als „Lockup“ bezeichnet und weist darauf hin, dass das Bauelement manchmal in einen „eingefrorenen“ Zustand versetzt werden kann (siehe 6.2.6).

3.50**Gate-Durchbruch durch Einzelereignis****SEGR**

tritt im Gate eines unter Spannung stehenden Bauelements mit isoliertem Gate auf, wenn die vom Bauelement aufgenommene Strahlungsladung ausreichend ist, um einen zerstörenden Gate-Durchbruch zu verursachen

3.51**„Latch-up“ durch Einzelereignis****SEL**

tritt in einem Halbleiterbauelement mit vier Schichten auf, wenn die vom Bauelement aufgenommene Strahlung ausreichend ist, um in dem unter Spannung stehenden Halbleiterbauelement einen Knotenpunkt aufzubauen, der das Bauelement unabhängig von der anliegenden Eingangsgröße in einem festen Zustand hält, bis das Bauelement abgeschaltet wird; ein derartiges Latch-up kann zerstörend oder nichtzerstörend sein

3.52**Transiente durch Einzelereignis****SET**

unerwünschtes Signal oder unerwünschte Spannung, das bzw. die durch Anlagerung von Ladung durch ein einzelnes Teilchen induziert wird und sich durch den Stromkreispfad während eines Taktzyklus ausbreiten kann (siehe 6.2.4)

3.53**Störung durch Einzelereignis****SEU**

tritt in einem Halbleiterbauelement auf, wenn die vom Bauelement absorbierte Strahlung ausreichend ist, um den logischen Zustand einer Zelle zu verändern

ANMERKUNG Nach einem neuen Schreibzyklus kann der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt werden.

3.54**schwerer Fehler durch Einzelereignis****SHE**

tritt auf, wenn die bei einem Einzelereignis vom Bauelement absorbierte Strahlung ausreichend ist, um ein bleibendes Fest-Bit im Bauelement zu verursachen sowie einen schweren Fehler in der Ausrüstung/im Gerät

3.55**leichter Fehler**

auch bekannt als Einzelereignis-Störung und ist die Zustandsveränderung eines gesetzten logischen Zustandes von Eins auf Null oder umgekehrt; er ist nichtzerstörend und kann überschrieben oder zurückgesetzt werden

3.56

leichter Fehlzustand

ein Begriff, der auf der Funktionsebene des Luftfahrzeugs angewendet wird und der sich auf die Eigenschaft der ungültigen Veränderung von logischen Zuständen in digitalen Zellen in den Digitalschaltungen bezieht

ANMERKUNG Es ist ein Fehlzustand, der keinen Austausch eines bleibend beschädigten Bauteils in einer LRU nach sich zieht, sondern die Zurückspeicherung der gültigen Zustände in den logischen Zellen, bevor ein System/eine Systemarchitektur bis zur vollen Funktionalität wiederhergestellt werden kann. Ein derartiger Fehlzustand wurde im „kein-Fehlzustand-festgestellt“-Syndrom für Funktionen vermutet, die mit Digitaltechnik realisiert worden sind, und es würde möglicherweise den Wert des MTBUR der betreffenden LRU beeinflussen. Wenn ein leichter Fehlzustand zu einem irrtümlichen Austausch eines Bauelements in der LRU führt, könnte der Austausch den Wert der MTBF der reparierten LRU beeinflussen.

3.57

Ereignisse durch energiereiche Solarteilchen

SEP

während dieser Perioden gibt es ein vermehrtes Auftreten von Solarteilchen (Protonen, Ionen und einige Neutronen), welche durch Strahlungsausbrüche auf der Sonne oder koronale Massenejektionen verursacht werden

ANMERKUNG Das vermehrte Auftreten kann von einigen Stunden bis zu mehreren Tagen reichen. Ein kleiner Anteil besitzt ausreichende energetische Spektren, um deutlich erhöhte sekundäre Neutronenflüsse in der Atmosphäre zu erzeugen.

3.58

Ersatzbauelement

Bauelement, das als Ersatz in einer Ausrüstung/einem Gerät verwendet wird, nachdem die Ausrüstungs-/Gerätekonstruktion zugelassen wurde

ANMERKUNG In einigen Zusammenhängen wird die Benennung „Austauschbauelement“ zur Beschreibung eines Ersatzbauelements verwendet, das „gleichwertig oder besser ist“ als das Originalbauelement.

3.59

Bewertung der Systemsicherheit

SSA

wird zum Nachweis der Einhaltung der Sicherheitsanforderungen durchgeführt

3.60

System

Zusammenfassung von Hardware- und Softwareelementen, die eine spezifische Funktion oder Gruppe von Funktionen für das Luftfahrzeug praktisch umsetzen

3.61

Gesamtionsationsdosis

TID

kumulative Strahlungsdosis, die in Ionisierung übergeht, welche von einem Bauelement während einer festgelegten Dauer empfangen wird

3.62

Validierung

Bestätigungsverfahren des Herstellers der Ausrüstung/des Gerätes hinsichtlich der verträglichen Strahlung für ein Bauelement, wenn keine Betriebsdaten vor seiner Anwendung oder keine Strahlungsangaben von einem Prüflaboratorium zur Verfügung stehen

3.63

wird

stellt die Erklärung einer Absicht dar, die im Zusammenhang mit dem vorliegenden Schriftstück erfüllt wird

4 Abkürzungen in diesem Dokument

- AC
- AIR
- ARP
- ASET
- ASIC
- BIT
- BPSG
- CECC
- CMOS
- COTS
- D-D
- DOE
- DRAM
- DSET
- DSP
- D-T
- DTS
- E
- ECMP
- EDAC
- EFIS
- ESA
- eV
- FBW
- FHA
- FPGA
- GCR
- GeV
- GLE
- GV
- HW
- IBM
- ICE
- IECQ
- IEEE Trans.
- Informations-Rundschreiben (*Advisory circular*)
- atmosphärische ionisierende Strahlung
- empfohlene Luftfahrtpraxis
- analoge Transiente durch Einzelereignis
- anwendungsspezifische integrierte Schaltung
- Built-in-Prüfung
- Borphosphorsilikatglas
- CENELEC-Komitee für elektronische Bauelemente
- komplementärer Metalloxid-Halbleiter
- handelsübliches Bauelement
- Deuterium-Deuterium
- Energieministerium (USA)
- dynamischer Speicher mit wahlfreiem Zugriff
- digitale Transiente durch Einzelereignis
- digitaler Signalprozessor
- Deuterium-Tritium
- Entwurf einer Technischen Spezifikation
- Energie
- Managementplan für elektronische Bauelemente
- Fehlererkennung und -korrektur
- elektronisches Flugüberwachungsinstrumentensystem
- Europäische Weltraumbehörde
- Elektronenvolt
- Fly-by-Wire
- Funktionsgefährdungsanalyse
- frei programmierbare Verknüpfungsfelder
- galaktische kosmische Strahlen
- Gigaelektronenvolt
- Bodenerereignis
- Gigavolt (Einheit für die Stabilität)
- Hardware
- International Business Machines
- Irradiation of Chips and Electronics
- IEC-Qualitätsbewertungssystem für Bauelemente der Elektronik (*IEC Quality Assessment System for Electronic Components*)
- IEEE Transactions on Nuclear Science

Nucl. Sci.

- IGBT
- IMA
- IUCF
- JAN
- JEDEC
- JESD
- JPL
- LET
- LETth
- LRU
- MBU
- MeV
- MOSFET
- MTBF
- MTBUR
- NASA
- PCN
- PSI
- PSSA
- PWM
- RADECS
- RAM
- RVC
- SAFETI
- SBU
- SC
- SDRAM
- SEB
- SECDDED
- SEDR
- SEE
- SEFI
- SEGR
- SEL
- Isolierschicht-Bipolartransistor
- integrierte modulare Luftfahrtausrüstung
- Indiana University Cyclotron Facility (USA)
- Joint Army Navy (US-Verteidigungsministerium)
- JEDEC Solid State Technology Association
- JEDEC-Norm
- Jet Propulsion Laboratory
- lineares Energieübertragungsvermögen
- Schwellenwert des linearen Energieübertragungsvermögens
- Schnelltauschbaugruppe
- Störung mehrerer Bit
- Megaelektronenvolt
- Feldeffekttransistor mit Metalloxid-Halbleiter
- mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen
- mittlere Betriebsdauer zwischen außerplanmäßigen Austauschvorgängen
- Nationale Luft- und Raumfahrtbehörde
- Produktänderungsmitteilung
- Paul Scherrer Institut (Schweiz)
- vorläufige Analyse der Systemsicherheit
- Pulsbreitenmodulator
- Strahlung und ihre Auswirkungen auf Bauelemente und Systeme (*RADIations, Effets sur les Composants et Systèmes*)
- Speicher mit wahlfreiem Zugriff
- Abstimmergebnis (IEC)
- Systems and Airframe Failure Emulation Testing and Integration
- Einzelbitstörung
- Stapelkondensator
- synchroner dynamischer Speicher mit wahlfreiem Zugriff
- Durchbrennen durch Einzelereignis
- Einbitfehlerkorrektur, Zweibitfehlererkennung (*Single Event Correction Double Event Detection*)
- Dielektrikum-Durchbruch durch Einzelereignis
- Einzelereignis-Effekt
- Funktionsunterbrechung durch Einzelereignis
- Gate-Durchbruch durch Einzelereignis
- „Latch-up“ durch Einzelereignis

- SEP
- SER
- SET
- SEU
- SHE
- SRAM
- SSA
- SSEEM
- SW
- TIC
- TID
- TRIUMF
- TSL
- WNR
- energiereiche Solarteilchen
- Rate leichter Fehler
- Transiente durch Einzelereignis
- Störung durch Einzelereignis
- schwerer Fehler durch Einzelereignis
- statischer Speicher mit wahlfreiem Zugriff
- Bewertung der Systemsicherheit
- segmentierter Sekundärelektronen-Emissionsmonitor
- Software
- interner Grabenkondensator
- Gesamtionisationsdosis
- Tri-University Meson Facility (Kanada)
- The Svedberg Laboratoriet (Schweden)
- Weapons Nuclear Research (Los Alamos USA)

5 Strahlungsumgebung der Atmosphäre

5.1 Erzeugung von Strahlung

Die Atmosphäre ist von einem Fluss verschieden geladener und neutraler Teilchen durchsetzt, die in ihrer Kombination eine komplexe ionisierende Strahlungsumgebung erzeugen. Diese Teilchen werden durch die Wechselwirkung des kontinuierlichen Stromes von Teilchen der kosmischen Primärstrahlung mit den Atomen in der Atmosphäre (hauptsächlich Stickstoff und Sauerstoff) erzeugt und werden dann als kosmische Sekundärstrahlung bezeichnet. Die kosmischen Primärstrahlen werden üblicherweise den galaktischen kosmischen Strahlen (GCR) zugeordnet, was darauf hinweist, dass ihre Ursprünge außerhalb des Sonnensystems liegen.

Die galaktische kosmische Strahlung setzt sich aus Atomkernen zusammen, die vollständig ionisiert (deren Elektronen vollständig entfernt wurden) und auf sehr hohe Energien beschleunigt wurden. Die galaktische kosmische Strahlung besteht aus etwa 83 % Protonen, 16 % Alphateilchen und <2 % Schwerionen (Teilchen mit einer Kernladungszahl $Z > 2$). Wenn die kosmischen Primärstrahlen, hauptsächlich die sehr energiereichen Protonen, die Atmosphäre bombardieren, erzeugen sie durch die Wechselwirkung mit den Atomen in der Atmosphäre eine Kaskade von Sekundär-, Tertiär- und weiteren Teilchen. Das heißt, dass bei jedem eintretenden kosmischen Primärstrahl sehr viel mehr Sekundärteilchen erzeugt werden. Bei einem genau angenäherten Wert beträgt der Fluss der einfallenden kosmischen Primärstrahlen in der oberen Atmosphäre 3 Teilchen/cm²s und in den Höhen von Luftfahrzeugen liegt der Fluss aller Sekundärteilchen bei etwa 10 Teilchen/cm²s. Die Dichte des niedrigsten Teiles der Atmosphäre ist so hoch, dass der größte Teil des Teilchenflusses absorbiert wird, sodass der Nennwert des Flusses sekundärer Teilchen auf Meeresspiegelhöhe kleiner als 0,1 Teilchen/cm²s ist.

Aufgrund der Wirkung des Erdmagnetfeldes, welches am Äquator rechtwinklig zur Teilchenrichtung verläuft, ist der Fluss der Sekundärteilchen um die Erde nicht gleichmäßig. Teilchen, die die äquatornahen Feldlinien unter rechten Winkeln schneiden, werden abgelenkt, während sich die Teilchen an den Polen parallel zum Feld bewegen und nicht abgelenkt werden. Daraus folgt, dass die kosmischen Primärstrahlen leichter in der Nähe der Magnetpole in die Atmosphäre eindringen können und mit den Atomen in der Atmosphäre eine größere Anzahl von Teilchenkaskaden erzeugen.

5.2 Auswirkungen der Sekundärteilchen auf Luftfahrtausrüstungen

Einige der Sekundärteilchen können auf die mikroelektronischen Bauelemente in Luftfahrtsystemen in Luftfahrzeugen wirken und Einzelereignis-Effekte (SEE) in den Bauelementen verursachen. Diese Sekundär-

teilchen lagern durch die Rückstöße, die sie in einem empfindlichen Teil des Bauelementes erzeugen, genügend Ladung an, um eine Fehlfunktion des Bauelementes zu verursachen. Ermittelt wurde, dass Neutronen, Protonen und Pionen die Hauptteilchen sind, die derartige Auswirkungen verursachen.

5.3 Atmosphärische Neutronen

5.3.1 Allgemeines

Neutronen sind die kosmischen Sekundärstrahlenteilchen, die seit den frühen 1990er Jahren nachweislich für das Verursachen von Störungen durch Einzelereignis (SEUs) in Speichern und anderen Bauelementen in Luftfahrzeugen hauptsächlich verantwortlich sind. Die Identifikation der Neutronen als Hauptursache der SEUs beruht auf einigen unterschiedlichen Arten von Wechselbeziehungen:

- 1) die Schwankungen der Störraten in Abhängigkeit von der Höhe und der geografischen Breite folgt der Schwankung des Neutronenflusses in Abhängigkeit von der Höhe und der geografischen Breite,
- 2) die durch Neutronen induzierten SEU-Raten, die aus im Laboratorium gemessenen SEU-Querschnitten und mit dem Neutronenfluss in der Atmosphäre berechnet wurden, stimmen mit den während des Fluges gemessenen SEU-Raten überein, und
- 3) die Störraten am Boden aufgrund von Sekundärneutronen sind proportional zu den Raten in Flughöhen. Für Neutronen sowie für alle anderen Sekundärteilchen in der Atmosphäre ist die Schwankung des Teilchenflusses in Abhängigkeit von den drei Parametern (Energie, Höhe und geografische Breite) am wichtigsten für das Verständnis der Schwankung der SEU-Rate.

5.3.2 Energiespektrum der atmosphärischen Neutronen

Die Energieschwankung der atmosphärischen Neutronen wird üblicherweise durch Auftragen des Differentialflusses (Fluss je Einheit des Energieintervalls) als Funktion der Energie dargestellt, welche häufig als das Spektrum bezeichnet wird; siehe Bild 1. Nach dem Monte-Carlo-Verfahren generierte Spektren haben die folgenden Anteile geliefert: <1 MeV: 0,53, 1 MeV bis 10 MeV: 0,2 und >10 MeV: 0,27. Die nachfolgend angegebenen Anpassungen können leicht abweichende Werte ergeben. Seit den 1950er Jahren wurden mit einer Vielzahl von Techniken Messungen des Energiespektrums der kosmischen Neutronenstrahlen durchgeführt. In Bild 1 sind vier Neutronenspektren bei einer Höhe von etwa 40 000 ft (12,2 km) aufgetragen. Sie umfassen die Originalmessungen von Hess aus dem Jahre 1959 [1]¹, eine Berechnung von Armstrong aus dem Jahre 1973 [2], eine Anpassung an die Messungen von Hewitt u. a. bei der NASA im Jahre 1977 [3] und die jüngsten DOE-Messungen durch eine Anpassung an die Messung von Goldhagen in einem ER-2-Flugzeug aus dem Jahre 1997 [4].

¹ Dieser Verweis bezieht sich auf die Literaturhinweise.

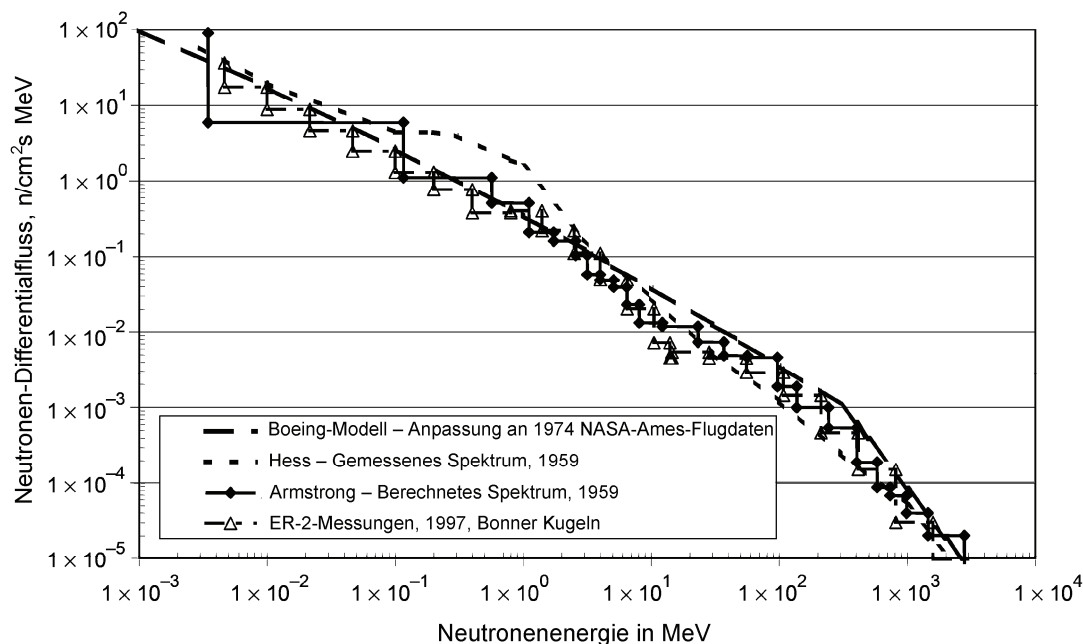


Bild 1 – Energiespektrum der atmosphärischen Neutronen bei 40 000 ft (12 160 m), 45° Breite

Eine Anpassung an die NASA-Ames-Daten (Energie (E) bis zu 300 MeV), welches in der Vergangenheit benutzt wurde, wurde durch Verwendung neuerer Messungen für eine Energie > 300 MeV modifiziert. Mit der Energie in MeV wird das modifizierte Spektrum angegeben mit:

$$dN/dE = \begin{cases} 0,346 E^{-0,922} \times \exp [-0,0152(\ln E)^2] & E < 300 \text{ MeV} \\ 340 E^{-2,2} & E > 300 \text{ MeV} \end{cases} \quad \text{n/cm}^2\text{s MeV} \quad (1)$$

Bei der Integration des Differentialflusses für eine Energie > 10 MeV sollte beachtet werden, dass der integrierte Neutronenfluss etwa $5\,600 \text{ n/cm}^2$ je Stunde beträgt, was auf $6\,000 \text{ n/cm}^2$ je Stunde gerundet werden kann. Dieser Nennwert des energiereichen Neutronenflusses von $6\,000 \text{ n/cm}^2$ je Stunde bei $40\,000 \text{ ft}$ ($12,2 \text{ km}$) und einer geografischen Breite von 45° kann als typisch im Flugleistungsbereich angesehen und für andere Anwendungen der Luftfahrt ausgerüstungen maßstäblich angewendet werden (z. B. bei einer Höhenveränderung nach 5.3.3 und Veränderung der geografischen Breite nach 5.3.4). Bei niedrigeren Energien gibt das Modell einen Fluss von $3\,200 \text{ n/cm}^2$ je Stunde für $1 < E < 10 \text{ MeV}$ an, wobei der Fluss für den Bereich von $1 < E < 3 \text{ MeV}$ $1\,600 \text{ n/cm}^2$ je Stunde und für den Bereich von $3 < E < 10 \text{ MeV}$ $1\,600 \text{ n/cm}^2$ je Stunde beträgt. Der Fluss von $6\,000 \text{ n/cm}^2$ je Stunde für $E > 10 \text{ MeV}$ ist im Vergleich zu den ER-2-Messungen etwa um den Faktor 2 niedriger. Am Boden ist der Fluss etwa um den Faktor 300 niedriger als in $40\,000 \text{ ft}$ ($12,2 \text{ km}$) Höhe und hat somit am Boden für eine Energie $> 10 \text{ MeV}$ einen Wert von 20 n/cm^2 je Stunde [5] und dies stimmt mit einer unabhängig abgeleiteten Berechnung für New York City [6] überein.

Neutronen mit einer Energie $> 10 \text{ MeV}$ sind die dominierende Ursache für SEEs in empfindlichen Bauelementen mit einer geometrischen Kenngröße $> 150 \text{ nm}$; bei Bauelementen mit einer Kenngröße $\leq 150 \text{ nm}$ aber kann der Beitrag von Neutronen mit einer Energie zwischen 1 MeV und 10 MeV bedeutend sein. Deshalb muss bei der Berechnung des SEE-Beitrags für Teile mit einer geometrischen Kenngröße $\leq 150 \text{ nm}$ ein Nennwert des Neutronenflusses ($> 1 \text{ MeV}$) von $7\,200 \text{ n/cm}^2$ je Stunde bei $40\,000 \text{ ft}$ ($12,2 \text{ km}$) und einer geografischen Breite von 45° verwendet werden. Dieser Wert kann für andere Höhen und geografische Breiten maßstabsgerecht angepasst werden.

5.3.3 Schwankung der atmosphärischen Neutronen mit der Höhe

Die Schwankung der atmosphärischen Neutronen mit der Höhe stammt aus dem Wettbewerb zwischen den verschiedenen Entstehungs- und Beseitigungsprozessen, die einen Einfluss darauf haben, wie die Neutronen und die auslösende kosmische Strahlung mit der Atmosphäre in Wechselwirkung treten. Das Ergebnis ist ein Höchstwert des Flusses bei etwa $60\,000 \text{ ft}$ ($18,3 \text{ km}$), das als Pfotzer-Maximum bezeichnet wird und in Bild 2 dargestellt ist. In dem Bild werden die Höhenschwankungen des $1\text{-MeV-bis-}10\text{-MeV}$ -Neutronenflusses

verglichen, wie sie durch zwei Modelle als eine Funktion der Höhe angegeben werden. Aus diesen beiden Modellen wurde das vereinfachte Boeing-Modell entwickelt, bei dem zwei Gruppen von 1-MeV- bis 10-MeV-Neutronenflussmessungen von Ballons verwendet wurden und welches auf einer geografischen Breite von 45° beruht. [7], [8] Ein strengerer Ansatz wurde von NASA-Langley bei der Entwicklung eines Modells verfolgt, das gegenwärtig als AIR bezeichnet wird. [9] Es verwendet Messungen, die in den 1960er und 1970er Jahren an Bord von Flugzeugen durchgeführt wurden und das daraus entwickelte Modell gibt den 1-MeV- bis 10-MeV-Neutronenfluss als Funktion der folgenden drei Parameter an, Atmosphärentiefe (g/cm^2), vertikale Stabilitätsgrenze (en: vertical rigidity cut off) (GV) und solare Wetterbedingungen.

Ein noch strengeres Modell wurde auf der Grundlage von Berechnungen entwickelt, die drei wesentliche Schritte umfassen: Berechnung des anfänglichen Spektrums kosmischer Strahlung, Berechnung der Stabilitätsgrenzen und ein Monte-Carlo-Programm für die Erzeugung von Sekundärstrahlen und deren Transport durch die Atmosphäre. Dieses Programmpaket heißt QinetiQ Atmospheric Radiation Model, QARM [10], und kann übers Internet abgerufen und verwendet werden [11]. Es kann Schätzungen zum Teilchenfluss und zu den Spektren kosmischer Sekundärstrahlen an allen Orten für alle Teilchen einschließlich Neutronen und Protonen liefern. Ein ähnliches Programmpaket, das ebenfalls übers Internet abrufbar ist, heißt EXPACS, EXcel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum [12], und beruht auf analytisch-funktionalen Anpassungen an nach dem Monte-Carlo-Verfahren generierte Spektren [13]. QARM und EXPACS erzielen für das atmosphärische Neutronenspektrum ähnliche Ergebnisse [14]. SEU-Raten in der Atmosphäre, die auf Berechnungen mit QARM für sechs verschiedene SRAMs beruhen, sind um etwa einen Faktor 2 niedriger als die mit dem Neutronenspektrum (5.3.2) nach dieser Norm berechneten Raten [14].

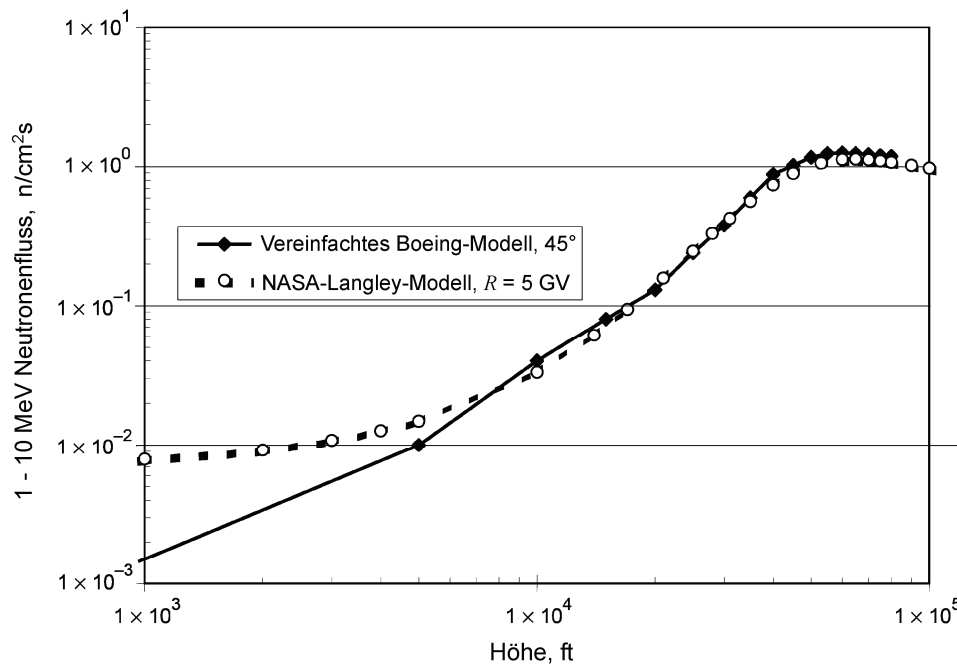


Bild 2 – Schwankung des atmosphärischen Neutronenflusses mit der Höhe (siehe Anhang D)

In Anhang D wird eine tabellarische Beschreibung der Schwankung des atmosphärischen Neutronenflusses mit der Höhe und auch der geografischen Breite entsprechend dem Boeing-Modell angegeben, um die Berechnung des Neutronenflusses an verschiedenen Flugorten zu ermöglichen.

5.3.4 Schwankung der atmosphärischen Neutronen mit der geografischen Breite

Die Schwankung mit der geografischen Breite wird in Bezug auf die vertikale Stabilitätsgrenze R in der Einheit GV angegeben. Die Stabilitätsgrenzen geben die erforderliche Stabilität (im Wesentlichen das Teilchenmoment dividiert durch dessen Ladung) der Teilchen der kosmischen Primärstrahlen an, um einen bestimmten Ort oberhalb der Atmosphäre zu durchdringen. Am Äquator, wo das Magnetfeld rechtwinklig zur Teilchenrichtung verläuft, sind Teilchen mit der höchsten Stabilität, $R \sim 15$ GV, erforderlich, um diese Region zu durchdringen, und wo es nahe den Polen parallel zur Teilchenrichtung verläuft, können Teilchen mit $R \sim 1$ GV ausreichen. Die geografische Verteilung der vertikalen Stabilitätsgrenzen für die Erde in einer Höhe von 20 km [15] ist in Bild 3 dargestellt.

Bild 3 zeigt die auf der Epoche 1980 beruhende Verteilung der Kurven für die Stabilitätsgrenzen um die Erde, die nach [15] unter Verwendung kombinierter Messungen und Berechnungen erarbeitet wurde, wobei die Stabilitätsgrenzen über die geografische Länge für jeweils 5° geografischer Breite gemittelt sind. Die Autoren von [15] haben ihr Modell der Stabilitätsgrenzen durch einen neuen Satz von auf der Epoche 1995 beruhenden Daten aktualisiert; dieses Modell ist in JESD-89A aufgeführt. Der neuere Satz von Berechnungen und Messungen führte zu einem Modell mit Stabilitätswerten, die eine Genauigkeit von $1^\circ \times 1^\circ$ aufweisen. Diese Stabilitätswerte wurden über breitere Winkelbereiche (5° für die geografische Breite $\times 15^\circ$ für die geografische Länge) gemittelt und diese gemittelten Werte sind in JESD-89A, Anhang A, angegeben. Ein Vergleich der aktualisierten Stabilitätswerte nach JESD-89A (Epoche 1995) mit den älteren Werten nach Bild 3 (Epoche 1980) hat ergeben, dass die Stabilitätswerte leicht gesunken sind. Vergleiche wurden für den Breitengradbereich von 30° bis 60° bei einer geografischen Länge von 0° durchgeführt. In den meisten Fällen erwies sich die Änderung als eine Abnahme der vertikalen Gesamtstabilität um etwa 0,15 – 0,2 über alle Breitengrade. Da die Stabilitätsänderung nahezu konstant war, ergab sich für größere geografische Breiten, bei denen die absoluten Stabilitätswerte kleiner sind, eine erheblich größere prozentuale Änderung der Stabilität. Damit betrug die prozentuale Abnahme $<5\%$ für geografische Breiten $<50^\circ$, 5% bis 7% für 50° bis 55° und ungefähr 15% für 60° . Diese Schwankungen der vertikalen Stabilitätsgrenzen aufgrund von Änderungen des geomagnetischen Feldes über einen Zeitraum von 15 Jahren erscheinen hinreichend gering, um anzugeben, dass die entsprechende Änderung des atmosphärischen Neutronenflusses relativ gering sein wird und Bild 3 weiterhin verwendet werden kann. Höchst aktuelle Stabilitätsgrenzen liefert das QARM-Programm [11], das mit Flugbahnintegrationen im Erdmagnetfeld (dem neuesten IGRF) und, indem es das Tsyganenko2001-Modell verwendet, mit externen, vom geomagnetischen Aktivitätsindex (K_p) abhängigen Quelltermen arbeitet. Diese Stabilitätsgrenzen können für jeden gewählten Ort online berechnet werden. Für Flugbahnberechnungen wird ein Satz von 49 vorberechneten Karten verwendet. Geomagnetische Aktivitäten können die Stabilitätsgrenze erheblich verringern (um etwa einen Faktor von 2 bei $K_p = 6$ für eine 1-Gv-Grenze bei einer Aktivität gleich null). Der Einfluss auf den Teilchenfluss kann etwa 10% bei galaktischen kosmischen Strahlen betragen, jedoch einen Faktor von 5 und mehr während Ereignissen durch energiereiche Solarteilchen erreichen.

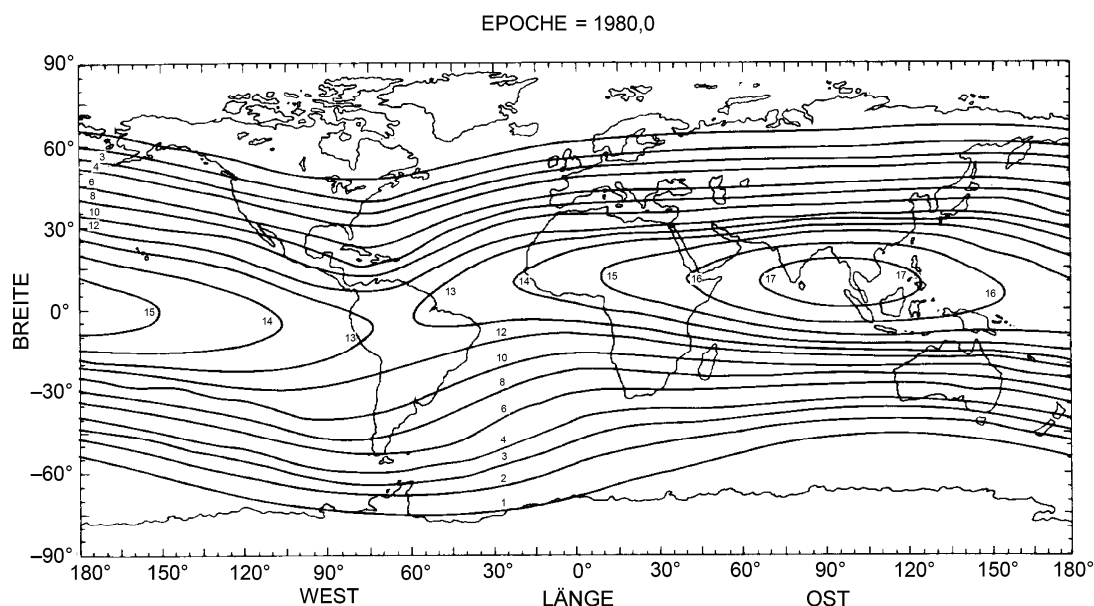


Bild 3 – Verteilung der vertikalen Stabilitätsgrenzen um die Erde

Für die Schwankung des 1-MeV- bis 10-MeV-Neutronenflusses in Abhängigkeit von der geografischen Breite stehen auch zwei Modelle zur Verfügung, ein vereinfachtes Boeing-Modell und das NASA-Langley-AIR-Modell. Das vereinfachte Boeing-Modell beruht auf Messungen in einem Flugzeug während der 1960er Jahre, besonders von Pol-zu-Pol-Breitenuntersuchungen an Bord eines Boeing-707-Flugzeuges [16]. Die Anfangsdaten wurden als der Neutronenfluss als Funktion der vertikalen Stabilitätsgrenze angegeben. Beruhend auf den Beobachtungen nach Bild 3, dass die Stabilitätsgrenzen ihre Hauptschwankungen in Abhängigkeit von der geografischen Breite zeigen, wurden die vertikalen Stabilitätsgrenzen über die geografische Länge für jeweils 5° geografischer Breite gemittelt. Aufgrund der Veränderung des geomagnetischen Feldes der Erde verändern sich die Umrisse mit der Zeit. Damit ist es möglich, den gemessenen 1-MeV-bis-10-MeV-Neutronenfluss, der ursprünglich als Funktion der Stabilitätsgrenze ange-

geben war, in einen Kurvenzug des 1-MeV-bis-10-MeV-Neutronenflusses als Funktion der geografischen Breite umzurechnen. Das Ergebnis ist in Bild 4 dargestellt, zusammen mit einem Kurvenzug aus dem strengeren NASA-Langley-Modell, was auch in die Schwankung nach der geografischen Breite durch Anwendung der Kurve der gemittelten vertikalen Stabilitätsgrenze als Funktion der geografischen Breite umgerechnet worden ist.

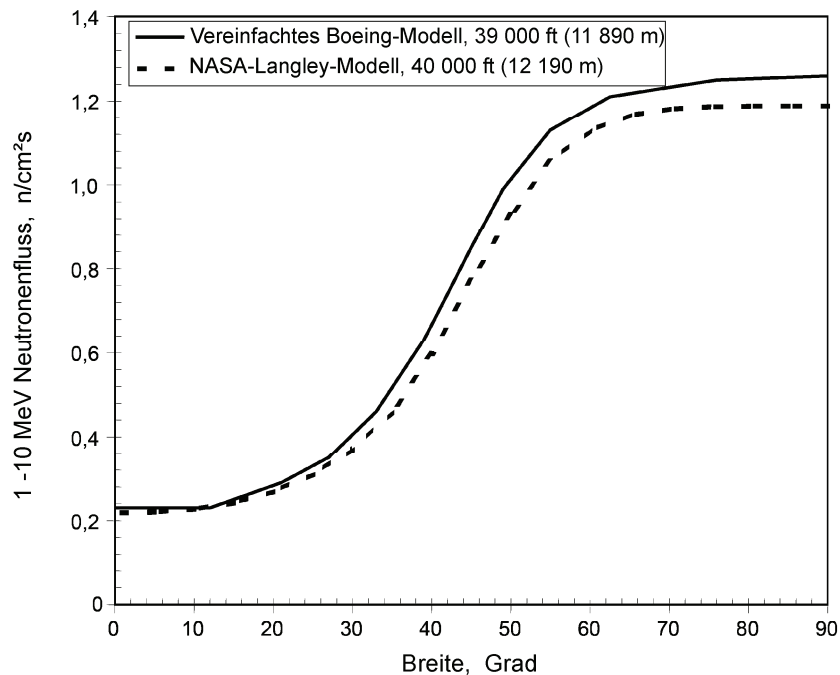


Bild 4 – Schwankung des atmosphärischen Neutronenflusses 1 MeV bis 10 MeV als Funktion der geografischen Breite

Die in Bild 2 gezeigte Schwankung des höhenabhängigen Neutronenflusses für Energien von 1 MeV bis 10 MeV haben auch gezeigt, dass sie für Neutronen mit höheren Energien gelten [8]. Deshalb können die Bilder 2 und 4 dazu verwendet werden, den Neutronenfluss größer als 10 MeV von $6\,000\text{ n/cm}^2$ je Stunde, der bei einer Höhe von 40 000 ft (12,2 km) und einer geografischen Breite von 45° gilt, auf andere Höhen und geografische Breiten maßstäblich umzurechnen. Es sollte beachtet werden, dass eine starke Abhängigkeit der Stabilitätsgrenze und damit des Teilchenflusses von der geografischen Länge gegeben ist, die im QARM-Modell berücksichtigt wird. Bei einer geografischen Breite von 45° z. B. beläuft sich die Schwankung der Stabilitätsgrenze mit der geografischen Länge auf den Faktor 5, der zum Faktor 3 für die Schwankung des Neutronenflusses der galaktischen kosmischen Strahlung wird.

Neutronen von 1 MeV bis 10 MeV tragen bei Bauelementen mit geometrischen Größen $\leq 150\text{ nm}$ erheblich zu Einzelereignis-Effekten bei; siehe 5.3.2.

5.3.5 Thermische Neutronen in Flugzeugen

Thermische Neutronen sind energiearme Neutronen, die ausreichend verstreut sind, dass sie sich im thermischen Gleichgewicht mit ihren Umgebungen befinden. Bei Raumtemperaturen führt dies zu einer mittleren Energie von 0,025 eV. Innerhalb eines Luftfahrzeuges werden die meisten thermischen Neutronen durch die Wechselwirkung der Flugzeugzellen und aller ihrer Inhalte mit energiereicheren Neutronen in der Atmosphäre erzeugt. Thermische Neutronen können Bedeutung erlangen, weil sie eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung mit bestimmten Isotopen wie Bor 10 (^{10}B) besitzen und Bor wird in der Mikroelektronik in zwei Hauptgebieten eingesetzt, und zwar als p-Dotierungsmittel und in einigen Formen der Glaspasivierungsschicht. z. B. Borphosphorsilikatglas. Ein 0,025-eV-Neutron, das auf ein ^{10}B -Atom einwirkt, erzeugt zwei geladene Teilchen in einem Bauelement mit einer kombinierten Energie von 2,3 MeV; wenn sich diese Energie innerhalb eines empfindlichen Volumens eines mikroelektronischen Bauelementes anlagert, kann dies zu einer Störung durch Einzelereignis (SEU) führen.

Bisher wurde nur eine Untersuchung durchgeführt, den Fluss thermischer Neutronen innerhalb eines Luftfahrzeuges zu berechnen [17]. Die wasserstoffhaltigen Materialien innerhalb eines Luftfahrzeuges, der Kraftstoff, die Passagiere, die Besatzung und das Gepäck dienen insgesamt zur Thermalisierung der energiereicheren Neutronen. Ein gesamtes großes handelsübliches Verkehrsflugzeug wurde mit 20 Teilvolumina modelliert, von denen einige extrem groß waren. Die Berechnungen waren selbst mit diesem groben Modell sehr hilfreich, weil sie zeigten, dass an mehreren Stellen innerhalb des Flugzeuges, über die berichtet wurde, der Fluss thermischer Neutronen um den Faktor 10 höher ist als gerade direkt außerhalb des Flugzeugs. Die Anzahl der Messungen von SEU-Querschnitten in Bauelementen, die durch thermische Neutronen verursacht wurden, ist sehr begrenzt, siehe 8.3.3; Literaturhinweise aus jüngerer Zeit aber erweitern diese Daten erheblich [18], [19], [20], [21].

Eine eingehendere Behandlung der Auswirkungen thermischer Neutronen erfolgt in IEC/TS 62396-5, Process management for avionics – Atmospheric radiation effects – Part 5: Guidelines for assessing thermal neutron fluxes and effects in avionics systems.

5.4 Sekundärprotonen

In der Atmosphäre wurden auch geladene Teilchen gemessen, von denen die meisten, wie bei den Neutronen, kosmische Sekundärstrahlen aus der Wechselwirkung der kosmischen Primärstrahlen mit den Sauerstoff- und Stickstoffkernen in der Luft sind. Die Sekundärprotonen können in der Elektronik Einzelereignis-Effekte in einer Weise verursachen, die der der Neutronen ähnlich ist. Die Verteilung der Sekundärprotonen ist ähnlich wie die der Neutronen, besonders hinsichtlich der Energie und der Höhe. Das Energiespektrum der atmosphärischen Protonen ist auch mit dem der Neutronen vergleichbar, wie in Bild 5 zu sehen, in dem die Ergebnisse von Protonenmessungen auf zwei Bergkuppen (USA und Russland [22] und [23]) sowie aus einem Ballonexperiment [23] grafisch dargestellt sind. Die Daten von den Bergkuppen zeigen eine Spitzenwertbildung des differentiellen Protonenflusses bei etwa 200 MeV bis 300 MeV. In Bild 5 ist zu sehen, dass für Energien bis etwa 500 MeV die Sekundärprotonen in der Atmosphäre etwa 20 % bis 30 % des Flusses der Neutronen bilden, jedoch sind die Protonen- und Neutronenflüsse bei höheren Energien vergleichbar. Die Messungen haben gezeigt, dass bei Sekundärprotonen im Energiebereich $100 \text{ MeV} < \text{Energie} < 750 \text{ MeV}$ die höhenabhängige Schwankung derjenigen der Neutronen sehr ähnlich ist [24], d. h. es gibt ein Maximum bei $\sim 80 \text{ g/cm}^2$ (55 000 ft (16,8 km)), das Pfotzer-Maximum. Hinsichtlich der breitengradabhängigen Schwankung gibt es eine leichte Verringerung des atmosphärischen Gesamtprotonenflusses um einen Faktor von etwa 2 bei der Bewegung von den Polarregionen zum Äquatorialbereich, der weniger erklärt ist als die breitengradabhängige Schwankung bei den Neutronen. Für die Berechnung der SEE-Raten in der Atmosphäre kann der Beitrag der Protonen zur SEE-Rate als bereits in der neutroneninduzierten SEE-Rate enthalten betrachtet werden, weil der Neutronenfluss dominiert und der vorgeschlagene Fluss von $6\,000 \text{ n/cm}^2 \text{ je Stunde}$ (Energie $> 10 \text{ MeV}$) niedrig angesetzt ist.

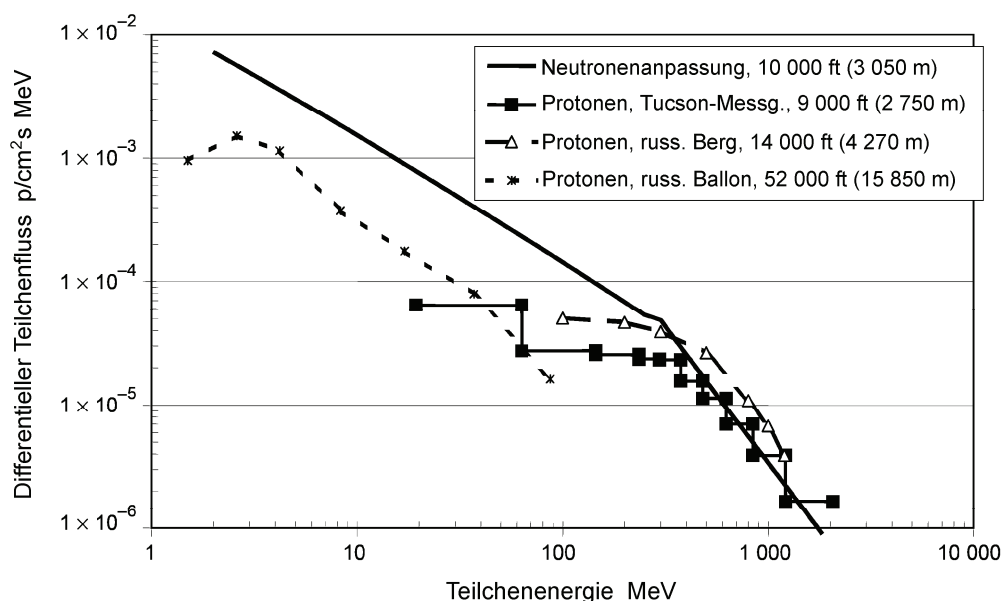


Bild 5 – Energiespektrum von Protonen in der Atmosphäre

5.5 Weitere Teilchen

Ein anderes geladenes Teilchen der kosmischen Sekundärstrahlung in der Atmosphäre, das einen Einzelereignis-Effekt in elektronischen Ausrüstungen erzeugen kann, ist das Pion (es gibt positiv und negativ geladene Pionen). Jedoch macht der Pionenfluss in den Höhen der Luftfahrzeuge in der Atmosphäre nur einen kleinen Anteil des Neutronen- und Protonenflusses aus. Bei Energien ≤ 1 GeV wird das Pion/Proton-Verhältnis (π/p) auf etwa 0,1 geschätzt und gilt sowohl in Luftfahrzeughöhen, 500 g/cm² (20 000 ft (6,1 km)) als auch am Boden [25]. Bei 40 000 ft (12,2 km) und bei einer Energie von 1 GeV wurde der differentielle Pionenfluss auf etwa 1/30 von dem der Neutronen und Protonen berechnet (die differentiellen Neutronen- und Protonenflüsse sind etwa gleich), und bei 100 MeV beträgt der differentielle Pionenfluss $\sim 1/100$ des Neutronenflusses [26]. Verglichen mit dem Neutronenfluss ist der Pionenfluss in der Atmosphäre klein ($< 1\%$) und kann damit hinsichtlich der Auswirkungen auf elektronische Ausrüstungen/Geräte vernachlässigt werden. Das QARM-Modell kann für diese weiteren Teilchen der kosmischen Sekundärstrahlung, einschließlich Protonen, detaillierte Angaben zu deren Fluss und Spektrum innerhalb der Atmosphäre liefern.

Als kosmische Sekundärstrahlung in der Atmosphäre werden auch Elektronen und Gammastrahlen erzeugt. Obwohl der Wert dE/dx (Energieanlagerung je Weglänge) in Silizium nicht hoch genug ist, um Einzelereignis-Effekte in elektronischen Ausrüstungen/Geräten zu erzeugen, lagern sie doch ionisierende Dosen in der Elektronik an. Allgemein gesagt sind die Flüsse energiereicher Elektronen und Gammastrahlen grob vergleichbar mit denen der atmosphärischen Neutronen.

Es gibt auch einen sehr kleinen Anteil von Schwerionen, d. h. kosmische Primärstrahlen und ihre sekundären Fragmente, in der Atmosphäre, die den Durchgang durch die Hunderte von g/cm² der Atmosphäre überleben. Ihr Fluss ist jedoch sehr klein. Die Schwerionen in der Atmosphäre können deshalb im Allgemeinen als mögliche Bedrohung der elektronischen Ausrüstungen/Geräte ignoriert werden, obwohl es im Falle sehr großer Höhen möglich ist, dass einigen Schwerionen begegnet wird. Allerdings ist es nur bei Höhen über 60 000 ft (18,3 km) erforderlich, den Auswirkungen von Schwerionen [27], [28] hinsichtlich der Wirkungen von kosmischen Primärstrahlen und deren sekundären Fragmenten Beachtung zu schenken. Zurzeit liefert das QARM-Modell [11] keine Angaben zu den verringerten Flüssen von Schwerionen der kosmischen Primärstrahlung und deren sekundären Fragmenten innerhalb der Atmosphäre, obwohl Erweiterungen vorliegen.

5.6 Verstärkte Sonnenaktivitäten

Die Sonnenaktivität folgt einem Zyklus von nahezu 11 Jahren, in denen sie Perioden erhöhter Aktivität (etwa die sechs mittleren Jahre) und nachlassender Aktivität (etwa die ersten und die letzten 2,5 Jahre) zeigt. Während der gesamten Periode gibt es eine bestimmte Wahrscheinlichkeit der Sonneneruptionen, wie Strahlungsausbrüche oder koronale Massenejektionen, die dazu führen, dass energiereiche Teilchen emittiert werden.

Diese solaren energiereichen Teilchen haben im Allgemeinen eine geringere Energie als die galaktische kosmische Strahlung. Die ersten Teilchen erreichen die Erde in der Größenordnung von Minuten, aber die Überhöhung hält für einige Stunden oder Tage an. Sie treten in Wechselwirkung mit der Atmosphäre und erzeugen Sekundärteilchen in ähnlicher Weise wie galaktische kosmische Strahlen, was aber aufgrund der niedrigeren Energie bedeutet, dass sie viel steilere Höhen- und Breitenprofile erzeugen. Für einige Ereignisse sind die Teilchenenergien ausreichend hoch, um überhöhte Sekundärflüsse in Flughöhen und auf dem Boden zu erzeugen (so genannte Bodenereignisse oder GLEs).

Die erhöhten kosmischen Sekundärstrahlen während der Strahlungsausbrüche sind auf dem Boden von einem weltumspannenden Netz von Detektoren für kosmische Neutronenstrahlen gemessen worden (kontinuierliche Verfolgung der Schwankung der kosmischen Strahlungsumgebung) und gelegentlich mit Messgeräten an Bord von Flugzeugen [29], [30]. Die SEP-Überhöhung des atmosphärischen Neutronenflusses, bezogen auf den Untergrundfluss (> 10 MeV) von 6 000 n/cm² je Stunde in 5.3.2, wurde für eine Anzahl ungünstigster Szenarien berechnet. Diese Szenarien sind abhängig von den Teilchenspektren spezifischer Strahlungsausbruchereignisse, der Höhe und der Stabilitätsgrenze. Beim Strahlungsausbruch im September 1989 lagen die Überhöhungsfaktoren bei 39 000 ft (12 km) bei 41 und 1,6 für Stabilitäten von 0 GV bzw. 3 GV und in einer Höhe von 56 000 ft (17 km) stiegen die Faktoren auf 73 bzw. 2,4 an. Bei dem Strahlungsausbruch vom Februar 1956, bei dem das ankommende Teilchenspektrum weniger gut charakterisiert ist, betrug der Überhöhungsfaktor 263 bei 0 GV und 39 000 ft (12 km). In hohen Breiten-

gradregionen ($R \leq 1$ GV) könnten somit während ungünstigster Strahlungsausbrüche extrem hohe SEE-Raten auftreten, die um einen Faktor von 300 bei 39 000 ft (12 km) erhöht sein können.

Diese Ereignisse sind üblicherweise von kurzer Dauer (mehrere Stunden) und bei den ungünstigsten Startzeiten in der Dauer von Langstreckenflügen enthalten. Somit würde, obwohl die ungünstigste momentane Ratenerhöhung einem Faktor von 263 entspricht, die über einem Flug bei hohen Breitengraden gemittelte SEE-Rate eher 25-mal größer sein als die Rate bei einer Mindestruhephase der Sonne. Das QARM-Modell umfasst 7 Ereignisse durch Solarteilchen, die ausführlich modelliert wurden [31]. Fünf dieser Ereignisse wurden mit den begrenzt zur Verfügung stehenden Daten zur Strahlungsdosis bei Flugbesatzungen verglichen und erreichten eine hohe Übereinstimmung. Die Verwendung dieser Ereignisse im QARM-Modell ermöglicht die Bestimmung der ungünstigsten Flugszenarien bezüglich der Startzeit. Das Ereignis vom Februar 1956 ist das belegbar ungünstigste und auf der Grundlage von Bodendaten das ungünstigste seit dem Beginn der Überwachung derartiger Ereignisse im Jahr 1942. Aufgrund des indirekten Nachweises von Nitratproben in Eisbohrkernen aber könnte der erste jemals beobachtete Strahlungsausbruch (das Carrington-Ereignis vom 1. September 1859) 4-mal ungünstiger gewesen sein [32], [33]. Außerdem zeigen Analysen von Ereignissen hinsichtlich der Strahlungsdosis bei Flugbesatzungen [34], dass die Dosis bei vier weiteren Ereignissen in den 1940er Jahren in großen geografischen Breiten und einer Höhe von 39 000 ft 10-mal größer gewesen sein könnte als die normale durchschnittliche Flugdosis oder SEE-Rate. Mit den ebenfalls in diese Kategorie fallenden jüngeren Ereignissen vom 29. September 1989 und 20. Januar 2005 (dies erfreulicherweise nur in großen südlichen Breiten aufgrund einer hohen Anisotropie in Ankunftsrichtungen) sollte eine Häufigkeit derartiger ungünstigster Ereignisse von 7 in 67 Jahren angenommen werden. Bei etwa 23 anderen Ereignissen (z. B. 15. April 2001) in diesem Zeitraum könnten routengemittelte Raten in großen geografischen Breiten im Bereich von 10 % bis 200 % der Raten bei Sonnenruhephasen gelegen haben.

5.7 Große Höhen von 60 000 ft bis zu Höhen größer als 60 000 ft (18 290 m)

Obwohl Neutronen die dominierende Ursache für SEEs bis zu einer Höhe von etwa 40 000 ft (12,2 km) sind, gewinnen andere Teilchen in größeren Höhen zunehmend an Bedeutung. Bei 60 000 ft (18,3 km) steigt der Beitrag von Protonen auf 50 % der Neutronenrate, während oberhalb dieser Höhe ein erheblicher Anteil von Schwerionen kosmischer Strahlung und deren Sekundärfragmenten gegeben ist. Außerdem wächst die Bedeutung der Ereignisse durch Solarteilchen und das Ereignis vom Februar 1956 wäre bei 60 000 ft (18,3 km) 6-mal ungünstiger als bei 40 000 ft (12,2 km) gewesen. Derzeit berücksichtigen Modelle wie QARM Neutronen und Protonen, nicht aber Schwerionen.

Schwerionen erzeugen SEEs durch direkte Ionisation und technische Modelle wie z. B. CREME96 [35], [36] werden für Raumfahrtssysteme verwendet. Diese beruhen auf der Charakterisierung der Umgebung durch das Teilchenspektrum als Funktion des linearen Energieübertragungsvermögens (LET). Dieses wird üblicherweise integral aufgetragen, d. h. der Teilchenfluss hat einen größeren LET. Die Weglängenverteilung in einem als Parallelepiped dargestellten empfindlichen Bauelementvolumen wird dann verwendet, um das Spektrum der angelagerten Ladungen und somit die Zahl, die größer als der SEE-Schwellenwert eines Bauelements ist, anzugeben. Eine frühere Arbeit [27] hat LET-Spektren für die obere Atmosphäre dargestellt, wobei halbempirische Querschnitte für die Wechselwirkungen von Schwerionen und die Erzeugung von Fragmenten verwendet wurden. Moderne Monte-Carlo-Strahlungstransportprogramme wie z. B. FLUKA [37] enthalten heute physische Module für die Behandlung von Ion-Ion-Stößen und diese werden für die Erzeugung von Antwortfunktionen für die Atmosphäre verwendet. Einzelheiten zur Umgebung in großen Höhen und zur Berechnung von Schwerionen-SEE-Raten sind in Anhang E enthalten.

6 Auswirkungen der atmosphärischen Strahlung auf Luftfahrttausrüstungen

6.1 Arten der Strahlungsauswirkung

Die ionisierende Strahlungsumgebung in der Atmosphäre, und deshalb auch im Inneren eines Luftfahrzeugs, kann eine Vielzahl von Wirkungen auf die Elektronik der Luftfahrttausrüstungen haben. In diesem Abschnitt werden drei Grundtypen von Strahlungsauswirkungen behandelt, und zwar Einzelereignis-Effekte, Gesamtionisierungsdosis und Verschiebungsschaden. Es wird gezeigt, dass einige Einzelereignis-Effekte einen Einfluss auf die Luftfahrttausrüstung haben, aber dass die Gesamtionisierungsdosis und der Verschiebungsschaden keine Bedeutung haben. Der Hauptschwerpunkt liegt also bei den Einzelereignis-Effekten in Luftfahrttausrüstungen. Einzelereignis-Effekt ist ein Gattungsbegriff und umfasst alle möglichen Auswirkungen

auf die elektronischen Ausrüstungen/Geräte durch die Wechselwirkung eines Einzelelements der Strahlung, welches im Falle der atmosphärischen Strahlung das Sekundärneutron ist.

Neben den vielen Arten der Teilchen, die beim Durchgang der kosmischen Strahlen durch die Erdatmosphäre bis zum Erreichen des Meeresspiegels erzeugt werden, haben die Neutronen die größte Bedeutung für das Verursachen von Problemen in elektronischen Schaltungen.

6.2 Einzelereignis-Effekte

6.2.1 Allgemeines

Alle Einzelereignis-Effekte (SEE) werden durch die Anlagerung von Energie innerhalb eines mikroelektronischen Bauelementes durch ein einzelnes Teilchen verursacht, das auf das Bauelement einwirkt. Die Energieanlagerung, die entweder direkt oder indirekt auftritt, führt zu einer Ladungsansammlung. Wenn das eintreffende Teilchen geladen ist (z. B. Schwerion aus kosmischer Strahlung) setzt sich die Ionisation direkt fort, da das Teilchen seine Energie durch Ionisierung der umgebenden Siliziumatome anlagert. Je größer das Vermögen des Teilchens zur Abgabe seiner Energie ist, desto größer ist die vom Teilchen angelagerte Energie (ausgedrückt als LET, lineares Energieübertragungsvermögen, Energie/Weglänge) und umso wahrscheinlicher ist es, dass die abgegebene Ladung ausreichend ist, einen Effekt zu verursachen. Wenn das einzelne Teilchen neutral ist wie ein Neutron, muss das Teilchen zuerst eine nukleare Wechselwirkung mit einem Atom in oder nahe der aktiven Fläche des Bauelements eingehen. Dadurch werden Rückstoßatome erzeugt, die als Recoils bezeichnet werden und die eine Energie besitzen, die (indirekt) in den umgebenden Siliziumatomen angelagert wird.

Ein Proton ist geladen, aber es hat einen genügend geringen LET in Silizium, sodass bis jetzt noch nicht nachgewiesen werden konnte, dass es SEEs durch direkte Ionisation verursacht. Bei hohen Energien (>5 MeV) gibt es jedoch Kernreaktionen mit dem Silizium in einer Weise, die ähnlich den Wechselwirkungen von Neutronen mit der gleichen Energie ist. Bis jetzt lässt sich daher sagen, dass Einzelereignis-Effekte von Protonen in Bauelementen nur durch Kernreaktionen verursacht werden. Auf der Grundlage aktueller Messungen kann angenommen werden, dass Protonen und Neutronen bei Energien >100 MeV die gleiche Fähigkeit zur Erzeugung einer Störung durch Einzelereignis (SEU), einem „Kippen“ des logischen Zustandes, in elektronischen Bauelementen besitzen. Dieses wird als SEU-Querschnitt bezeichnet und somit wird angenommen, dass atmosphärische Neutronen den gleichen SEU-Querschnitt wie sehr energiereiche Protonen besitzen.

Einzelereignis-Effekte in elektronischen Bauelementen der in Flugzeugen eingesetzten Luftfahrt-ausrüstungen werden seit den frühen 1990er Jahren beobachtet [5], [7], [38], [39], [40]. In der vorhandenen Literatur sind es Störungen durch Einzelereignis (SEUs) in Speicherbauelementen, die beschrieben wurden. Die meisten, wenn nicht sogar alle dieser Störungen wurden den atmosphärischen Neutronen zugeschrieben. Da die Gesamtanzahl der für SEU empfindlichen Bits in einem Flugzeug in den letzten zehn Jahren geometrisch gewachsen ist (mehr Bits je Bauelement, höhere Funktionalität erzeugte höheren Speicherbedarf), ist auch die Anzahl der verursachten SEUs in ähnlicher Weise gestiegen. Es gibt jedoch aus einer Reihe von Gründen nicht allzu viele Nachweise für SEUs während des Fluges:

- a) in den Luftfahrt-ausrüstungen werden routinemäßig Fehlererkennungs- und Fehlerkorrektursysteme angewendet, aber weil die Fehler korrigiert werden, gibt es wenig Interesse an der Aufzeichnung der ermittelten und korrigierten Fehler,
- b) das Auftreten dieser Fehler wird als Herstellerinformation angesehen, deshalb werden sie selten erfasst und sogar noch seltener analysiert und
- c) die meisten Fehlerkorrektursysteme suchen nur nach Fehlern in den Speichern, die benutzt werden, und folglich werden Bitveränderungen in unbenutzten Speichern immer ignoriert.

6.2.2 Störung durch Einzelereignis (SEU)

Eine Störung durch Einzelereignis (SEU) ist die häufigste Art eines Einzelereignis-Effektes. SEU wird durch die Anlagerung von Ladung in einem Bauelement durch ein einzelnes Teilchen verursacht, die ausreichend ist, um den logischen Zustand eines einzelnen Bits von einem Binärzustand in den anderen zu verändern. Einzelbit-Störungen werden mitunter auch als leichte Fehler bezeichnet, weil sie durch Reinitialisieren der Bits wieder korrigiert werden können. Bauelemente, die empfindlich für SEUs sind, sind im Allgemeinen

Speicher, Register oder Auffangspeicher. Speicher mit wahlfreiem Zugriff sind im Allgemeinen die für SEU empfindlichsten Bauelemente, weil sie die größte Anzahl Speicherbits aufnehmen. Aufgrund der großen Anzahl von „flüchtigen“ Speicherbits, die in Mikroprozessor-Pufferspeichern und -Registern, Mikrocontrollern, ASICs und frei programmierbaren Verknüpfungsfeldern (FPGAs) enthalten sind, sind diese Bauelemente ebenfalls anfällig. Die Empfindlichkeit für SEU erhöht sich bei abnehmender Versorgungsspannung.

In jüngster Vergangenheit wurde das Potenzial für SEU durch thermische Neutronen in komplexen hochdichten Bauelementen beobachtet, bei denen die Einzelelemente äußerst klein sind und die eine niedrige kritische Ladung für Störungen besitzen. Thermische Neutronen werden erzeugt, wenn energiereiche Sekundärneutronen mit dem Zellaufbau des Luftfahrzeuges in Wechselwirkung treten; dies betrifft vor allem wasserstoffhaltige Materialien, wie z. B. Gepäck, Passagiere und Kraftstoff. Der Fluss thermischer Neutronen kann an den gleichen Stellen innerhalb des Luftfahrzeuges etwa das Zweifache des Flusses energiereicher Neutronen betragen. Bei der von einigen unterschiedlichen Gruppen durchgeführten SEU-Prüfung an SRAMs wurde beobachtet, dass der SEU-Querschnitt für thermische Neutronen vergleichbar mit dem energiereicher Sekundärneutronen ist, siehe 8.3.3. Diese Bauelemente haben einen Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen, weil sie Bor 10 enthalten. Der für Luftfahrtumgebungen zutreffende vergleichsweise hohe Fluss thermischer Neutronen bedeutet für die Bauelemente, die Bor 10 in jedem beliebigen prozentualen Anteil enthalten, dass der Fluss thermischer Neutronen unbedingt zu beachten ist; zu weiteren Einzelheiten siehe Anhang A.

6.2.3 Störung mehrerer Bits (MBU) und Störung mehrerer Zellen (MCU)

Die Störung mehrerer Bits (MBU) betrifft mehrere Bits, die während derselben SEE-Wechselwirkung gestört werden, Bits eines einzigen logischen Wortes. Die MBU unterscheidet sich von der Störung mehrerer Zellen (MCU), bei der zwei oder mehr Bits (Zellen) gestört werden, üblicherweise Bits, die nebeneinander, aber nicht notwendigerweise in demselben logischen Wort angeordnet sind. Der Anteil der Störungen mehrerer Zellen (MCU) [MCU-Wahrscheinlichkeit/SEU-Wahrscheinlichkeit oder MCU-Querschnitt (Vielzahl >1)/SEU-Querschnitt] steigt drastisch mit der Abnahme der Baugröße des Bauelements und mit der jüngeren Fertigung von integrierten Schaltungen. Es wird angenommen, dass dies mit der Ladungsteilung zusammenhängt, d. h. die Ladung, die von den energiereichen Neutronen infolge der Wechselwirkung mit dem SRAM angelagert wird, wird von einer Anzahl nebeneinander angeordneter Speicherbits gemeinsam genutzt.

In Japan mit einem Neutronenstrahl durchgeführte Spallationsversuche an etwa im Jahr 2003 hergestellten SRAMs haben ergeben, dass der MCU-Anteil ungefähr 3 % bei 130-nm-Bauelementen, jedoch etwa 6 % bei 90-nm-Bauelementen betrug [41]. Auf der Grundlage einer späteren Zusammenstellung solcher Daten [42] aus acht verschiedenen Quellen, einschließlich [41], aber steigt der MCU-Anteil eindeutig mit der Abnahme der Baugröße, wobei es jedoch anscheinend zwei unterschiedliche Tendenzen gibt. Bei einer Gruppe von Bauelementen beginnt der MCU-Anteil relativ niedrig, ähnlich [41] (etwa 2 % bei 150-nm-Bauelementen), steigt aber um einen Faktor von etwa 20 bei einer Abnahme der Kenngröße von 150 nm auf 50 nm. Bei der anderen Gruppe von Bauelementen beginnt der MCU-Anteil viel höher, z. B. etwa 40 % bei 150-nm-Bauelementen, steigt dann aber viel langsamer, und zwar um einen Faktor von etwa 2 bei einer Abnahme der Kenngröße von 150 nm auf 50 nm. Des Weiteren zeigen jüngere Daten eine wesentlich größere Schwankungsbreite, wobei die Datenpunkte im Bereich zwischen den beiden Tendenzen liegen. Beiden Tendenzen gemeinsam ist, dass der MCU-Anteil bei einer Extrapolation auf eine Baugröße von etwa 35 nm den Faktor 1 annimmt, d. h. alle SEUs führen in zwei oder mehr Bits zu einer Störung.

Eines der jüngeren Schriftstücke [43] hat auch die Auswirkung einer Änderung des Einfallswinkels des Neutronenstrahls, der auf das Bauelement trifft, auf den MCU-Anteil untersucht. Der MCU-Anteil stieg mit dem Einfallswinkel; er war bei einem normalen Einfallswinkel am geringsten und beim Glanzwinkel (bei 90°) am höchsten, insgesamt aber betrug der bei oberhalb des normalen Einfallswinkels gemessene Anstieg höchstens etwa 80 % (bei 90°) und etwa 30 % bei 45°.

Die Änderung des MCU-Anteils mit der Energie wurde in [44] untersucht, wobei die Prüfung mit mono-energetischen Protonen erfolgte, und das Gesamtergebnis zeigt, dass der MCU-Anteil nur sehr leicht mit abnehmender Energie sank. Die Schwankung mit der Protonenenergie war nicht einheitlich, aber der ungefähre Abfall des MCU-Anteils betrug etwa 25 % bei 200 MeV bis 20 % bei $E = 46$ MeV in dem einen Bauelement und etwa 18 % bei 200 MeV bis etwa 15 % bei $E = 32$ MeV in dem zweiten Bauelement.

Bei SRAMs hängt damit die MCU-Rate als Anteil der SEU-Rate im Wesentlichen von der Baugröße des Bauelements (und dann auch vom Herstellungsjahr) ab, wobei die Neutronen-/Protonenenergie sehr geringe

und der Einfallswinkel größere Auswirkungen hat. Die großen Schwankungen des MCU-Anteils bei den unterschiedlichen SRAMs, die von verschiedenen Forschern, wie oben angegeben, geprüft wurden, sollten hinreichend beachtet werden. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass nur die konservativen oberen Grenzen, die nachfolgend zusammengefasst sind, für den MCU-Anteil in SRAMs angegeben werden können; und selbst sie sind nicht die konservativsten Werte, die verwendet werden können. Wenn diese Werte als zu hoch betrachtet werden, wären SEE-Einzelprüfungen erforderlich, um den MCU-Anteil in gegebenen Bauelementen zu messen.

Für ältere Bauelemente, die vor 2003 gefertigt wurden, sollte die in der ursprünglichen IEC/TS 62396-1 enthaltene Angabe von 3 % für den MCU-Anteil verwendet werden. Für Bauelemente, die zwischen 2003 und 2006 gefertigt wurden, kann ein MCU-Anteil von 10 % verwendet werden. Für Bauelemente, die nach 2006 gefertigt wurden, und insbesondere für Kenngrößen <100 nm, kann eine obere Grenze von 30 % verwendet werden.

Bei DRAMs ist die Situation völlig anders, da sie in ihrer Peripherie eine Steuerlogik enthalten. Das heißt, wenn diese Steuerlogik gestört wird, können ganze Bitzeilen und -reihen gestört werden mit dem Ergebnis, dass Tausende Bits aufgrund eines einzigen Neutronenstoßes fehlerhaft sind. Derartige tausendfache Bitfehler sollten tatsächlich eher als eine SEFI und nicht als eine Störung mehrerer Zellen betrachtet werden.

Im Vergleich zu SEUs steigt der MBU-/MCU-Anteil mit der Energie der einfallenden Teilchen und es wurde festgestellt, dass er bei 63-MeV-Protonen in 16-Megabit-DRAMs 7 % beträgt. Für Protonen wurden Vielfache bis zu 4 und für Ionen bis zu 19 beobachtet [45], [46].

Unter Verwendung der Daten von [47] kann für die Situation bezüglich der MCU in DRAMs eine Verallgemeinerung vorgenommen werden, die auf der Baugröße des Bauelements beruht, der eine ähnlich entscheidende Rolle wie der Baugröße bei der MCU in SRAMs zukommt. Bei einer Kenngröße von 180 nm beträgt der MCU-Anteil etwa 5 % und bei Bauelementen mit höheren Baugrößen sollte die in der ursprünglichen IEC/TS 62396-1 enthaltene Angabe von 3 % für den MCU-Anteil verwendet werden. Bei 180-nm-Bauelementen aber sind Störungen von Tausenden Bits möglich; es gibt jedoch eine große Schwankungsbreite beim SEFI-Verhalten der beiden SDR DRAMs, in denen es gemessen wurde. Der SEFI/SBU-Anteil schwankte zwischen 0,3 % und 24 % und der absolute Querschnitt schwankte zwischen $3,5 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{Bauelement}$ und $1,3 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{Bauelement}$.

Bei 110-nm-DRAMs ist der Anteil der klassischen MCU sehr unsicher, und zwar aufgrund der enormen Schwankungen des MCU-Anteils von 2 % bis 100 % in den drei verschiedenen Bauelementen, die geprüft wurden; bei allen handelte es sich um 512-Mbit-DDR2-Bauelemente. Hinsichtlich des absoluten MCU-Querschnitts aber sind Schwankungen viel geringer, zwischen etwa $1 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{Bauelement}$ bis $3,5 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{Bauelement}$. Bei dem SEFI-typischen Ereignis, das zu 1×10^3 bis 1×10^4 fehlerhaften Bits führte, lag sehr wahrscheinlich eher eine SEFI statt eine SBU vor. Damit schwankte das SEFI/SBU-Verhältnis (auf der Basis je Bauelement) zwischen etwa 1 und 20, mit einem Durchschnittswert von ungefähr 5, und der absolute SEFI-Querschnitt schwankte zwischen $1 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{Bauelement}$ und $2 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{Bauelement}$.

Bei 90-nm-DRAMs ist die Situation ähnlich der bei 110-nm-DRAMs. Doch nur eines der vier 90-nm-DDR2-Bauelemente, die geprüft wurden, zeigte die klassische MCU, und bei diesem Bauelement betrug der MCU-Anteil 14 %. Alle vier DDR2-Bauelemente zeigten das SEFI-typische Verhalten mit Tausenden Fehlern; in diesem Fall aber war eine SBU wahrscheinlicher als eine SEFI; und bei allen vier Bauelementen betrug das SEFI/SBU-Verhältnis etwa 15 %. Der absolute SEFI-Querschnitt schwankte zwischen $4 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{Bauelement}$ und $4 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{Bauelement}$.

Zusammenfassend scheinen die sich auf mehrere Tausend Bits auswirkenden SEFI-Ereignisse ein größeres Problem darzustellen als die klassische MCU von 2 Bits oder 3 Bits, und der Gesamtrend beim absoluten SEFI-Querschnitt scheint zu sein, dass er schrittweise mit der Baugröße des Bauelements abnimmt, von etwa $1 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{Bauelement}$ bei 180 nm bis etwa $1 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{Bauelement}$.

6.2.4 Transiente durch Einzelereignis (SET)

Ein SEU-bezogenes Ereignis in einigen Bauelementen, das zur Erzeugung einer Transiente durch Einzelereignis (SET) führt, welche von einem Bauelement als neues Informationsbit interpretiert werden kann. Diese Transienten sind unerwünschte Signale oder Spannungen, die sich – ausgelöst durch die Ladungsanlagerung von einem einzelnen Teilchen – während eines Taktzyklus durch den Schaltungspfad ausbreiten.

Derartige Signale können gefährlich sein, wenn sie sich bis zu einem Auffangspeicher ausbreiten und dort übernommen werden, oder auf einen inneren Knotenpunkt treffen und ein unerwartetes Verhalten verursachen oder sie können durch zulässige Synchronsignale des Kreises wirksam beseitigt werden. Anfänglich wurden derartige Transienten in linearen analogen Bauelementen, wie Komparatoren und Operationsverstärkern, beobachtet, sind allerdings auch bei digitalen Bauelementen aufgezeichnet worden. In analogen Bauelementen kann SET sich in der Änderung der Zeitsteuerung von Spannungs- und Stromsignalen ausdrücken und sie ist abhängig von der Größe der Differentialsteuerspannung. Die meisten SET-Prüfungen wurden mit Strahlen aus Schwerionen durchgeführt, jedoch wird SET auch in linearen Bauelementen mit Strahlen energiereicher Protonen ausgelöst [48], [49], [50], und folglich sind die atmosphärischen Neutronen auch die Ursache für diese Effektart.

Die digitale Transiente durch Einzelereignis, DSET, ist ein unerwünschtes digitales Signal oder eine unerwünschte digitale Spannung, das bzw. die durch Anlagerung von Ladung durch ein einzelnes Teilchen hervorgerufen wird und sich durch den Stromkreispfad während eines Taktzyklus ausbreiten kann. Da die Frequenz in der digitalen Elektronik auf über 100 MHz gestiegen ist, hat auch das DSET-Potenzial zugenommen. Eine DSET, die in einen Flipflop oder ein Register getaktet ist, kann in dem Element als eine SEU erscheinen.

Die analoge Transiente durch Einzelereignis, ASET, ist ein unerwünschtes Signal oder eine unerwünschte Spannung, das bzw. die durch Anlagerung von Ladung durch ein einzelnes Teilchen am Ausgang eines analogen Bauelements hervorgerufen wird. Dieser fehlerhafte Ausgang kann hinreichend lange andauern, um Überwachungselementen der Schaltung falsche Werte zu liefern, z. B. Analog-digital-Umsetzer, die korrupte Daten liefern.

6.2.5 „Latch-up“ durch Einzelereignis (SEL)

Latch-up durch Einzelereignis (SEL) ist eine Bedingung eines regenerativen Stromflusses, in dem ein parasitärer n-p-n-p-Pfad in einem Silizium-Bauelement durch die Ladungsanlagerung eines einzelnen Teilchens eingeschaltet wird. SEL ist hauptsächlich bei Substrat-CMOS-Bauelementen zu beachten, ist jedoch auch in CMOS-Bauelementen mit relativ dicken ($>10\text{ }\mu\text{m}$) Epitaxialschichten beobachtet worden. Der regenerative Stromkreis stellt einen Pfad für einen hohen Stromfluss bereit und kann häufig zum zerstörenden Durchbruch führen. Selbst wenn der Durchbruch nicht auftritt, bleibt dieser Pfad bestehen, bis die Stromversorgung des Bauelements unterbrochen wird; die Stromversorgung muss deshalb aus- und wieder eingeschaltet werden, um den Normalbetrieb wiederherzustellen. Seit 1992 wird für eine kleine Anzahl von CMOS-Bauelementen eine Empfindlichkeit gegen protonen- und neutroneninduziertes Latch-up nachgewiesen [51], [52]. Die SEL-Empfindlichkeit verringert sich mit ansteigender Betriebsspannung und vergrößert sich mit ansteigender Bauelementetemperatur. In sehr seltenen Fällen wurden außerdem weitere durch Einzelereignisse ausgelöste Mechanismen beobachtet, die zu einem hohen Strom im Bauelement und zu dessen Zerstörung führen können. Ein Beispiel dafür ist ein Treiber-Gleichzeitigkeitsbetrieb bei einem FPGA-Typ [53] und andere besondere Wirkprinzipien, deren Einfluss auf bipolare Bauelemente beobachtet wurde [54], [55].

6.2.6 Funktionsunterbrechung durch Einzelereignis (SEFI)

Eine Funktionsunterbrechung durch Einzelereignis (SEFI) bezieht sich auf eine SEU in einem Bauelement, üblicherweise in einem komplexen Bauelement wie einem Mikroprozessor, wenn ein Steuerpfad stark verändert wurde und dazu führt, dass das Teil die ordnungsgemäße Funktion einstellt. Dieser Effekt wird manchmal auch als Totalsperre bezeichnet und gibt an, dass das Teil in einen „eingefrorenen“ Zustand versetzt worden ist. Im Allgemeinen wird SEFI durch eine SEU in einem kritischen Bit verursacht, wie bei einem Bit, welches bedeutende Ausgabeoperationen steuert. Beispiele für diese Bits sind Programmzähler, Sonderfunktionsregister, Steuer-, Zeitgeber und Betriebsartenregister in DRAMs und sogar eingebaute Prüfbits (en: BIT bits, built-in test bits), die vom Bauelementeverkäufer nur für die Vorsortierung verwendet werden. In einigen Bauelementen wie DRAMs [56] und FPGAs [57] kann SEFI zu einem Anstieg des Versorgungstromes führen, was ähnlich dem Effekt eines Latch-up durch Einzelereignis ist, sich aber über einen anderen Mechanismus vollzieht.

6.2.7 Durchbrennen durch Einzelereignis (SEB)

Bauelemente wie N-Kanal-Leistungs-MOSFETs, Bipolartransistoren mit isoliertem Gate (IGBTs) sowie bipolare Leistungstransistoren und -dioden mit anliegenden hohen Vorspannungen und starken inneren

elektrischen Feldern sind anfällig für ein Durchbrennen, welches von einem Einzelereignis ausgelöst wird (SEB). Die Durchdringung der Source-Körper-Drain-Region durch eine Ladungsanlagerung durch ein Schwerion kann die dünne Körperregion unter dem Source in Durchlassrichtung vorspannen. Wenn die am Drain anliegende Klemmenspannung die lokale Durchbruchspannung des parasitären Zweipols überschreitet, löst der durch das Einzelereignis verursachte Impuls einen Lawinendurchbruch in der Drainsperrschicht aus, der möglicherweise zu einem zerstörenden Durchbrennen führt. Bei handelsüblichen N-Kanal-Leistungs-MOSFETs kann dieser Effekt bei Werten der Drainspannung U_{ds} auftreten, die niedriger als die Bemessungsspannung des Bauelementes sind. Beruhend auf den Ergebnissen aus einer Bestrahlungsprüfung mit einem Schwerionenstrahl wird ein Schwellenwert- U_{ds} als die höchste U_{ds} festgelegt, bei der der MOSFET ohne die Wahrscheinlichkeit betrieben werden kann, dass ein Schwerion ein SEB auslöst. Auch energiereiche Neutronen und Protonen sind in der Lage, in N-Kanal-Leistungs-MOSFETs ein SEB auszulösen [58]. In allen Fällen ist die Schwellenwert- U_{ds} für Neutronen und Protonen höher als für Schwerionen. Dem SEB wird vorgebeugt, indem die MOSFETs unterhalb des bei der Bestrahlungsprüfung bestimmten U_{ds} -Schwellenwertes für Neutronen und Protonen betrieben werden. Bei Hochspannungsbaulementen mit einer Bemessungs- $U_{ds} \geq 400$ V haben Prüfungen auf Bodenhöhe (U_{ds} bei >90 % der Bemessungsspannung) zerstörende Ausfälle gezeigt, die mit den Raten aufgrund von SEB durch atmosphärische Neutronen übereinstimmend sind [59]. Da der Wert des atmosphärischen Neutronenflusses in Flughöhen mehr als das Hundertfache größer als auf Bodenhöhe ist, ist das Potenzial für SEB in Hochspannungsbaulementen in Luftfahrtgeräten problembewusst zu behandeln. Zur Bestimmung der Empfindlichkeit von Hochspannungsbaulementen gegenüber SEB können Laserprüfungen angewendet werden; siehe Abschnitt B.5. Einzelheiten zu den Auswirkungen atmosphärischer Strahlung auf Hochspannungsausrüstungen und fehlertolerante Konstruktionen sind in IEC/TS 62396-4 enthalten.

6.2.8 Gate-Durchbruch durch Einzelereignis (SEGR)

Sowohl N-Kanal- als auch P-Kanal-Leistungs-MOSFETs sind dem Gate-Durchbruch durch Einzelereignis (SEGR) ausgesetzt. Dieser Effekt wird mit einem transienten dünnen Plasmaschlauch erklärt, welcher durch die Spur eines Schwerions erzeugt wird, wenn dieses den dünnen Gate-Oxid-Bereich des MOSFET durchschlägt. Als Ergebnis dieses Ionenspurschlauches gibt es einen lokalisierten Anstieg im Oxidfeld, der einen Oxiddurchbruch verursachen kann, der zuerst zum Gateableitstrom und schließlich zum Gateabreißen führt. Bei MOSFETs haben Prüfungen von Hochspannungsbaulementen auf Bodenniveau [59] gezeigt, dass in einigen dieser Bauelemente der Ausfall aufgrund von SEGR und nicht SEB aufgetreten ist. Somit sind energiereiche atmosphärische Neutronen in der Lage, in einigen Hochspannungs-MOSFETs SEGR auszulösen.

Eine damit verwandte Auswirkung wurde in Bauelementen, wie frei programmierbaren Verknüpfungsfeldern (FPGA), als Dielektrikum-Durchbruch durch Einzelereignis (SEDR) beobachtet, bei dem ein dünnes Dielektrikum durch Schwerionen mit sehr hohem LET durchbrochen wird. Aktuelle Prüfungen haben gezeigt, dass die Dielektrika nur von Schwerionen mit sehr hohem LET durchbrochen worden sind und nicht von energiereichen Neutronen oder Protonen.

6.2.9 Schwerer Fehler durch Einzelereignis (SHE)

Es ist lange bekannt, dass Schwerionen in der Lage sind, in SRAMs „Festbits“ zu erzeugen. Diese Ereignisse werden manchmal als schwere Einzelfehler (en: single hard error – SHE) bezeichnet. Diese Fehler sind die Folge von sehr lokalisierten Gesamtdosiswirkungen, wenn einige Ionen auf das Gateoxid empfindlicher Transistoren einwirken. Derartige Festbits sind nicht zu vernachlässigen, weil sie die meisten üblichen Fehlererkennungen und -korrekturen (en: error detection and correction – EDAC), bezeichnet als SECDEC (en: single error correct, double error detect), ungültig machen. Weil die Festbits durch EDAC nicht korrigiert werden, bleiben sie bestehen. Wenn ein Wort ein Festbit enthält, könnte eine SEU in einem weiteren Bit dieses Wortes zu einem beliebigen Zeitpunkt einen feststellbaren Fehler erzeugen. Die ersten Fälle dieser schweren Fehler wurden nur durch Schwerionen mit hohem LET verursacht. Vor kurzem wurde das erstmalige Auftreten von SHE durch Protonen in einer Laboratoriumsprüfung veröffentlicht, bei der gezeigt wurde, dass in neueren Bauelementen (in diesem Fall ein 64-Mbit-DRAM [60]) Protonen und folglich auch atmosphärische Neutronen in der Lage sind, Festbits zu erzeugen.

6.2.10 Mögliche SEE-bezogene Risiken zukünftiger Technologien

- MBU und MCU bei zukünftigen Bauelementen ≤ 35 nm; ein MCU-Anteil von 100 % sollte erwartet werden.

Bei SRAM-Bauelementen, die vor 2003 mit einer Kenngröße von ≥ 200 nm gefertigt wurden, beträgt der MCU-Anteil üblicherweise einige Prozent. Da sich die Kenngrößen jüngerer SRAM-Bauelemente auf 150 nm vermindert haben, ist die MCU-Rate auf etwa 40 % gestiegen und es wird erwartet, dass sich bei Kenngrößen von ≤ 35 nm ein MCU-Anteil von 100 % ergeben wird.

- Auswirkungen auf Flash-ROMs mit kleiner Geometrie

Herkömmlicherweise ist der nicht-flüchtige ROM-Speicher den Neutronen in der atmosphärischen Strahlung gegenüber sehr tolerant. Bei Kenngrößen aber, die sich 100 nm nähern, könnten die Speicher gegen verschiedene SEEs, einschließlich SEFI, empfindlich werden.

- Direkte Ionisation durch Protonen ist bedeutsam bei ≤ 65 nm

Prüfungen von SOI-SRAMs mit Kenngrößen ≤ 65 nm zeigen, dass es für protoneninduzierte Störungen keine Schwellenenergie gibt und der Querschnitt tatsächlich auf Werte unterhalb von 1 MeV sinkt [87]. Die direkte Ionisation durch Protonen bei hohen LET-Werten nahe des Spurendes ist, im Gegensatz zu Nuklearreaktionen, hinreichend für SEUs in derartigen Bauelementen. Solche energiearmen oder abgebremsten Protonen werden in Materialien des Bauelements erzeugt und tragen zur SEU-Rate bei.

- Direkte Ionisation durch Myonen

Myonen verhalten sich wie Elektronen, sind aber 200-mal schwerer und entstehen beim Zerfall von Pionen. Pionen werden ebenso wie Neutronen bei Nuklearreaktionen zwischen kosmischen Protonenstrahlen und dem Sauerstoff und Stickstoff in der Atmosphäre erzeugt. Da Myonen der schwachen Wechselwirkung unterliegen, verursachen sie bei Wechselwirkungen mit Silizium keine Störungen und können deshalb nur Störungen durch direkte Ionisation hervorrufen. Myonen sind die dominierendsten Teilchen der Kosmischen Strahlung auf Bodenniveau, die meisten aber haben Energien von $\geq 1\,000$ MeV. Einige jedoch werden bei kleinerer Energie erzeugt oder auf eine kleinere Energie abgebremst. Damit die direkte Ionisation zu einer SEE führen kann, müssen die Myonen eine Energie von ≤ 1 MeV haben.

6.3 Gesamtionisationsdosis (TID)

Auswirkungen der Gesamtionisationsdosis (TID) beziehen sich auf die kumulative Auswirkung der Ionisation (Ladungsaufbau) in einem integrierten Schaltkreis, welche zu einer allmählichen Verschlechterung der elektrischen Parameter führt. Wenn ein MOS-(Metalloxidschicht-Halbleiter-)Bauelement einer ionisierenden Strahlung ausgesetzt wird, werden im gesamten Oxid Paare von Elektronenlöchern erzeugt, die einen Ladungsaufbau bewirken und zur Funktionsbeeinträchtigung des Bauelementes führen. Die Hauptmechanismen sind der Aufbau einer positiven Oxidfangstellenladung und einer eingefangenen Zwischenflächenladung in der Grenzschicht zwischen dem Silizium und dem Siliziumdioxid. Große Konzentrationen der Oxidfangstellenladung verursachen im Bauelement einen erhöhten Leckstrom. Große Konzentrationen der Zwischenflächenladung erhöhen die Schwellenspannung des Transistors und verschlechtern die Zeit- und Frequenzparameter eines Bauelementes. Ähnliche Auswirkungen werden in bipolaren Bauelementen erzeugt.

Beruhend auf den in den letzten 20 Jahren gesammelten Erfahrungen der Gesamtdosisprüfungen an mikroelektronischen Bauelementen, bei denen wahrscheinlich Tausende unterschiedlicher Bauelemente geprüft wurden, wurde eine untere Grenze für den kleinsten TID-Wert von 1 000 cGy(Si) ermittelt, die dazu führt, dass ein Bauelement nicht entsprechend seiner Spezifikation betrieben werden kann. Für die überwiegende Mehrzahl der Bauelemente, einschließlich nahezu aller handelsüblichen Bauelemente (COTS-Bauelemente) liegt der TID-Schwellenwert sehr viel höher als 1 000 cGy. Trotzdem bedeutet die Anwendung der 1 000 cGy als kleinstem Schwellenwert, und selbst die Einbeziehung eines Reservefaktors von 2, dass im ungünstigsten Fall ein kleinster Gesamtdosiswert, den die Luftfahrtgeräten absorbieren würden, 500 cGy beträgt, bevor TID-Auswirkungen möglicherweise zu einem zu behandelnden Problem für die Luftfahrtgeräten werden könnten.

Zur Ionisationsdosis tragen alle Hauptteilchen bei, die die Strahlungsumgebung innerhalb der Atmosphäre darstellen, d. h. Neutronen, Protonen, Elektronen, Photonen usw. Beruhend auf Messungen, die in einem kommerziellen Verkehrsflugzeug durchgeführt wurden [61], beträgt die maximale Dosisrate von allen diesen Teilchen ~ 70 nGy je Minute ($\sim 0,4$ mrad je Stunde oder ~ 4 μ Gy je Stunde). Dies führt bei einem Nennwert von 100 000 Flugstunden zu ~ 40 cGy über diese Lebensdauer und liegt damit eine Größenordnung niedriger als der TID-Schwellenwert von 500 cGy für den ungünstigsten Fall. Bei einem Flugzeug mit größerer Flughöhe, z. B. 55 000 ft (16,8 km), verdoppelt sich die Dosisrate auf 8 μ Gy je Stunde, was über 100 000 Flugstunden zu einer Maximaldosis von 80 cGy führt und damit immer noch gut unterhalb des TID-Schwellenwertes liegt.

Die Gesamtionisationsdosis ist jedoch kumulativ, sodass jede Dosis aus weiteren Quellen berücksichtigt werden sollte, wie z. B. von der Röntgen-Prüfung mechanischer Teile.

Ein oberer Grenzwert, geschätzt nach der maximalen Dosis, die die elektronischen Geräte/Ausrüstungen bei einer Röntgen-Prüfung aufnehmen können, beträgt 1 mGy. Dies wurde extrapoliert aus der maximalen Dosis, die Gegenstände von Röntgeneinrichtungen für die Gepäckuntersuchung (10 µGy) aufnehmen können und deckt sich auch ungefähr mit den Dosisbereichen, die von kommerziellen Röntgen-Untersuchungsanlagen aufgenommen werden können (200 µGy bis 500 µGy). Somit stellen TID-Auswirkungen für Luftfahrt-ausrüstungen im Allgemeinen keinen Problemfall dar.

Zum Nachweis der baulichen Unversehrtheit werden an bestimmten Teilen des Flugwerkes/der Zelle mechanische Röntgen- und Gammastrahlenuntersuchungen durchgeführt. Die bei dieser Untersuchungsart abgegebenen Strahlungsdosen können höher sein als bei Einrichtungen für die Gepäckuntersuchung. Werden derartige Untersuchungen durchgeführt, wenn die während der Betriebslebensdauer von jeder lokalisierten luftfahrtelektronischen Ausrüstung aufgenommene kumulative Dosis 50 cGy überschreitet, dann muss die Entnahme der elektronischen Ausrüstung vor der Durchführung der Strahlenuntersuchung in Betracht gezogen werden. Beispiele für diese Ausrüstungen sind elektronische Baugruppen, die in Tragflächen und Motoren montiert sind.

6.4 Verschiebungsschaden

Noch eine weitere Art der Auswirkungen, die die ionisierende Strahlung in mikroelektronischen Bauelementen auslösen kann, ist der Verschiebungsschaden. Er hat auch kumulative Auswirkungen, bezieht sich aber in diesem Falle darauf, dass Atome aus ihrem Gitter verschoben werden. Ist eine ausreichende Anzahl von Atomen verschoben, funktioniert das Bauelement nicht länger normal. Diese Auswirkung ist hauptsächlich schwereren Teilchen, wie Neutronen und Protonen, zuzuschreiben, weil die leichteren Teilchen, wie Elektronen und Gammastrahlen, beim Herausstoßen der Atome aus ihrem Gitter weniger effektiv sind.

Beruhend auf der Erfahrung bei der Prüfung Dutzender Teile auf Verschiebungsschaden wurde ein effektiver unterer Grenzwert für den Mindestneutronenfluss von 1×10^{10} n/cm² ermittelt, der dazu führt, dass ein Bauelement nicht mehr entsprechend seiner Spezifikation betrieben werden kann. Dieser Wert von 1×10^{10} n/cm² beruht auf dem Verschiebungsschaden an empfindlichen Optokopplern [62]. Bei mikroelektronischen Bauelementen liegt der Schwellenwert der Neutronenfluenz für einen Schaden höher. Die Grundlage für diese Prüfung war eine äquivalente 1-MeV-Neutronenfluenz. In den Flughöhen der Luftfahrzeuge hat ein großer Anteil der Neutronen höhere Energien als 1 MeV und ihr Potenzial für einen Verschiebungsschaden in den Bauelementen ist größer als bei den 1-MeV-Neutronen. Die NIEL-Funktion (en: non-ionising energy loss) ist für Halbleitermaterialien wie Silizium und GaAs als Funktion der Energie berechnet worden und NIEL ist als bestes Maß für das Potenzial eines Materials, einem Verschiebungsschaden zu unterliegen, akzeptiert. Beruhend auf dem NIEL für Silizium durch Neutronen als Funktion der Energie ist es konservativ anzunehmen, dass energiereichere Neutronen eine höchstens um den Faktor 3 bessere Effektivität für einen Verschiebungsschaden haben als die 1-MeV-Elektronen.

In den Flughöhen der Luftfahrzeuge beträgt ein anwendbarer Schätzwert des Flusses sehr energiereicher Neutronen (1 MeV bis 1 000 MeV) 8×10^3 n/cm² je Stunde. Unter der Annahme, dass die Elektronik für 1×10^5 Flugstunden derart beansprucht wird, ergibt sich ein Neutronenfluss von 8×10^8 n/cm². Mit der Anwendung eines Faktors von 3 als ein oberes Grenzwertäquivalent zwischen den energiereichen Neutronen und den 1-MeV-Neutronen für die Zwecke des Verschiebungsschadens lässt sich diese Fluenz in eine äquivalente 1-MeV-Neutronenfluenz von $2,4 \times 10^9$ n/cm² umformen. Dieses obere 1-MeV-Neutronenfluenz-Grenzwertäquivalent für Luftfahrtausrüstungen liegt noch um einen Faktor von 4 unter dem Mindestwert, mit dem ein Verschiebungsschaden an den empfindlichsten Bauelementen verursacht werden kann. Beruhend auf der kleinsten 1-MeV-Neutronenfluenz von 1×10^{10} n/cm² stellt der Verschiebungsschaden für luftfahrtelektronische Ausrüstungen/Geräte demzufolge kein Problem dar.

7 Leitfaden für Systementwicklungen

7.1 Übersicht

Die Methodiken und Praktiken, die mit Sicherheitsfragen der Systementwicklung in Verbindung stehen, können zu einer Akkommodation von Raten leichter und schwerer Fehler in Bauteilen und Geräten/Ausrüstungen führen. Wenn elektronische Bauelemente von Luftfahrtausrüstungen, die durch atmosphärische Strahlung ausgelöste Störungs- und Ausfalleffekte erfahren können, welche die Sicherheit des Luftfahrzeugs nachteilig beeinflussen können, identifiziert sind, ist das Verfahren für die Bewertung der Sicherheitsbeeinträchtigung durch derartige Effekte identisch mit dem, welches zur Bewertung weiterer potenzieller Gefährdungen angewendet wird, die mit einem luftfahrtelektronischen Produkt in Verbindung stehen. Bild 6 enthält ein Flussdiagramm, welches diesen Prozess auf einer hohen Ebene darstellt. Dieses Flussdiagramm steht im Einklang mit den empfohlenen Praktiken, die in ARP4754 (*Certification Considerations for Highly-Integrated or Complex Aircraft Systems*) und ARP4761 (*Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Systems and Equipment*) enthalten sind. In AC23.1309-1C und AC25.1309-1A sind zusätzlich zu den ARPs quantitative Anforderungen an die Verfügbarkeit von Luftfahrzeugfunktionen enthalten. Weitere Angaben für Systementwickler sind in IEC/TS 62396-3 enthalten.

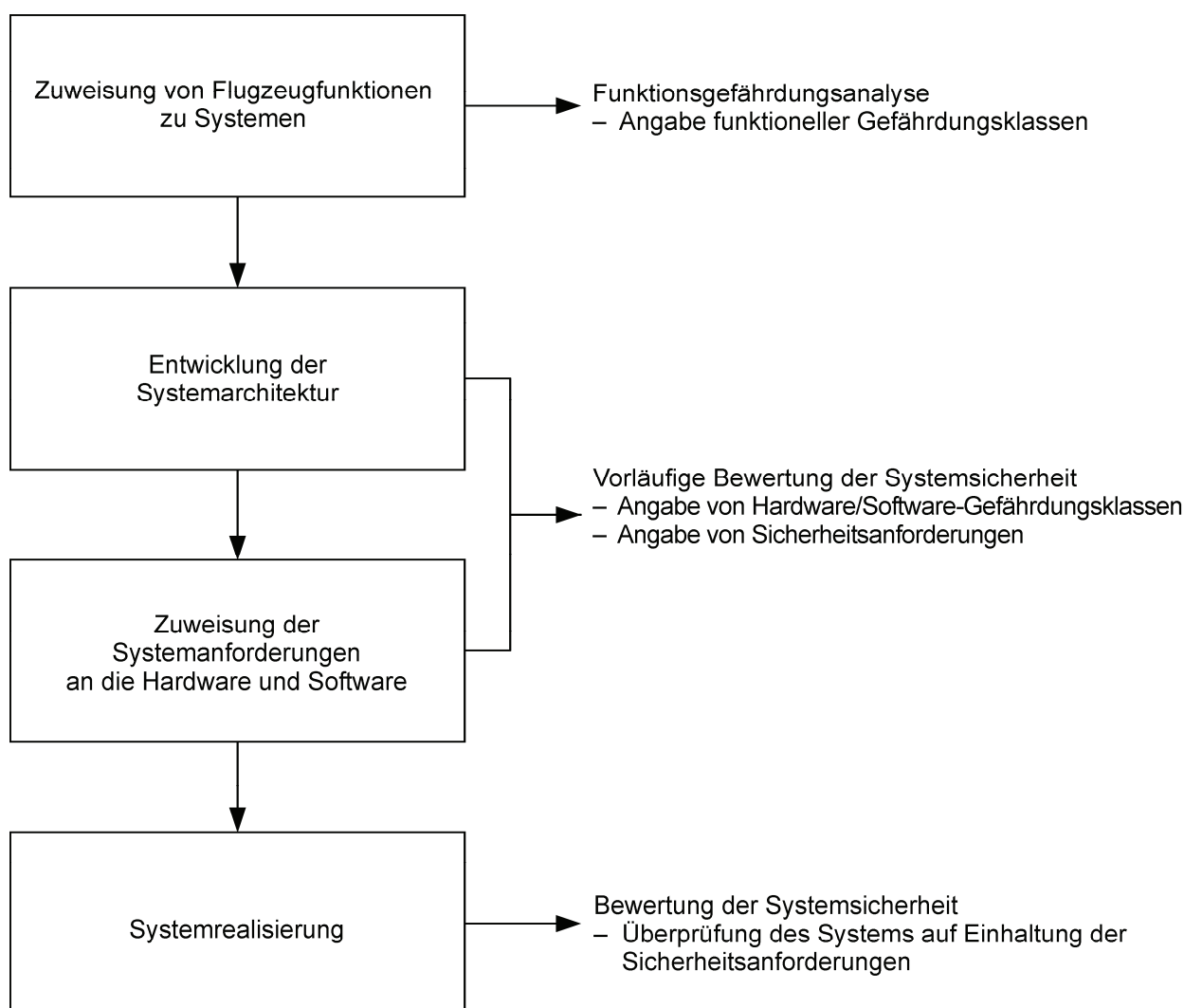


Bild 6 – Bewertungsverfahren für die Systemsicherheit

Die erste Stufe im Entwicklungsprozess ist die Zuordnung der Luftfahrzeugfunktionen zu Systemen, mit denen diese Funktionen realisiert werden. Als ein Teil dieser Entwicklungsphase wird jedes dieser Systeme durch Anwendung der Funktionsgefährdungsanalyse (FHA) hinsichtlich der möglichen Gefährdungen bewertet, die die Sicherheit des Luftfahrzeuges beeinflussen könnten. Mit der FHA werden alle Gefährdungen anhand einer Reihe von Gefährdungsklassen bewertet, die in Tabelle 1 angegeben sind. Zusätzlich zur

Identifizierung von übergeordneten Systemgefährdungen werden mit der FHA die geforderten Gefährdungsklassifizierungen für jede Funktion gekennzeichnet. Diese Klassifizierung wird gleich den höchsten kritischen Gefährdungen gesetzt, die im Zusammenhang mit jeder Funktion stehen. SEE erzeugt im Allgemeinen keine charakteristischen Ausfalleffekte auf Funktionsebene, weil weitere Hardware-Ausfallarten die gleichen Effekte verursachen können. Demzufolge braucht SEE nicht als gesonderte Gefährdung in die FHA aufgenommen zu werden.

Sicherungsebenen der Systementwicklung beziehen sich auf Prozesse, die während der Systementwicklung angewendet werden (Entwicklung, praktische Umsetzung, Verifizierung/Zertifizierung, Herstellung usw.). Beruhend auf „hochintegrierten“ oder „komplexen“ (deren Sicherheit nicht allein durch Prüfung nachgewiesen werden kann und deren Logik zu kompliziert ist, um sie ohne die Hilfe eines analytischen Werkzeuges zu verstehen) Elementen (hauptsächlich digitale elektronische Bauteile und Software) wurde es als notwendig erachtet, sich auf die Entwicklungsprozesse für Systeme zu konzentrieren.

Entwicklungssicherungsaktivitäten unterstützen Systementwicklungsprozesse. Systeme und Gegenstände werden „Entwicklungssicherungsebenen“ zugeordnet, die auf Klassifizierungen der Ausfallbedingung beruhen, welche mit den in den Systemen und Gegenständen praktisch realisierten Luftfahrzeugfunktionen in Verbindung stehen. Die erforderliche Strenge und Disziplin bei der Ausführung der Tätigkeiten zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses schwankt entsprechend der zugewiesenen Entwicklungssicherungsebene und sollte entsprechend angepasst werden.

Systeme, die Funktionen des Luftfahrzeuges umsetzen, werden nach den Ausfalleffekten der Funktionen klassifiziert, die sie umsetzen. Tabelle 1 liefert einen Querverweis zwischen funktionalen Ausfalleffekten und der Klassifizierung der Systeme, die die entsprechenden Funktion ausführen.

Tabelle 1 – Nomenklatur Querverweis

Funktionale Ausfallbedingung Klassifizierung (AC 23.1309-1C, AC 25.1309-1A und ARP4754)	Sicherungsebene der Systementwicklung (ARP4754)
Katastrophal	Ebene A
Sehr groß/Gefährlich	Ebene B
Groß	Ebene C
Klein	Ebene D
Keine Auswirkung	Ebene E

Während der Entwicklung der Systemarchitektur und Zuweisung der Systemanforderungen an die Hard- und Software wird eine vorläufige Analyse der Systemsicherheit (PSSA) durchgeführt. Der Zweck der PSSA ist es, die geplante Architektur zu beurteilen, um die Angemessenheit der Architektur für die Einhaltung der Systemsicherheitsanforderungen zu bestimmen. Im Gegensatz zur FHA berücksichtigt die PSSA die vorgesehene Systemarchitektur und kennzeichnet die Ausfallarten, die einzeln oder in Kombination zu übergeordneten Gefährdungsereignissen führen können, die in der FHA bestimmt worden sind. Da die SEE keine neuen Ausfallarten einführen würde, würden die in der PSSA berücksichtigten Ausfallarten die SEE einschließen. Abhängig von den Auswirkungen der SEE berücksichtigt die PSSA diejenigen, die leichte Fehler verursachen, getrennt gegenüber denen, die zu schweren Fehlern führen. Der Einfluss der Flugphase ist üblicherweise zu berücksichtigen, weil die Wahrscheinlichkeit von SEE während der Reise höher als während des Startens und Landens ist. Weil die Ergebnisse der PSSA die fehlertoleranten Architekturmaßnahmen steuern, identifiziert die PSSA jede erforderliche Fehlertoleranz der Architektur.

Während der Systemrealisierungsphase wird die Entwicklung abgeschlossen und überprüft. Die Analyse der Systemsicherheit (SSA) wird durchgeführt, um zu überprüfen und zu dokumentieren, dass das System, wie es entwickelt und gebaut wurde, den Sicherheitsanforderungen entspricht. Damit sind alle anwendbaren SEE-Raten in der SSA enthalten.

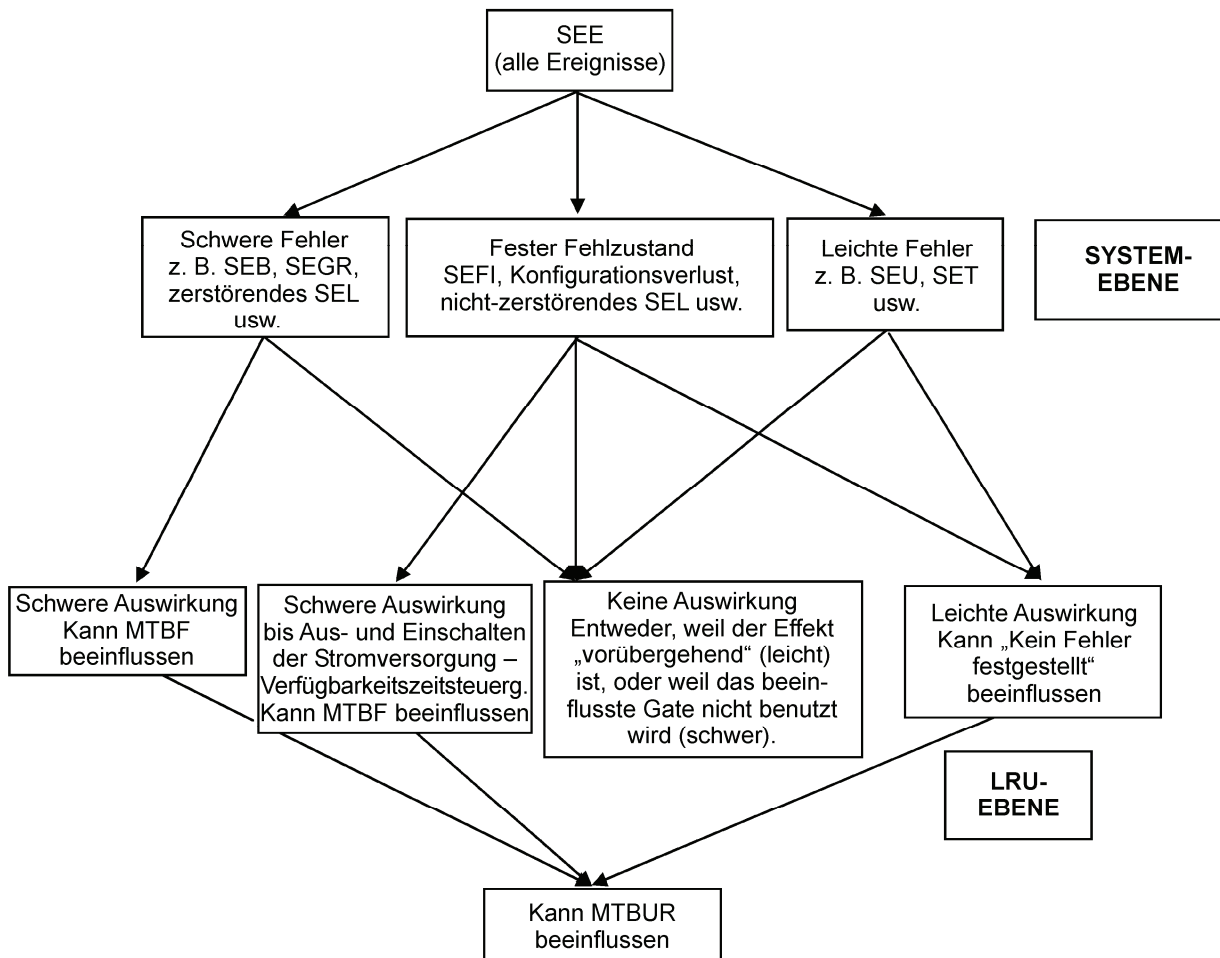


Bild 7 – SEE im Verhältnis zu System und LRU

7.2 Systementwicklung

Weil die Ausfalleffekte die Funktionsstörung und den Funktionsausfall einschließen können, erfordert die praktische Realisierung einiger Flugzeugfunktionen üblicherweise Systemarchitekturen mit einem bestimmten Grad der Überwachung und Redundanz der Ausrüstungen/Geräte. Der Grad der Redundanz wird von den Ausfallraten der Gerätebauteile bestimmt und würde SEE-Ausfall/Fehlerraten einschließen; der Einfluss von SEE ist in Bild 7 angegeben. Weil die zur SEE führenden Wechselwirkungsereignisse der Neutronen stochastisch und relativ selten sind, würden sich unter Umständen ungünstige Sicherheitseffekte auf Systeme der Ebenen A, B oder C beschränken. Bei Systemen der Ebenen D und E würde der Einfluss der SEE hauptsächlich die Wirtschaftlichkeit und Kundenzufriedenheit betreffen und braucht bei Bewertungen der Systemsicherheit nicht berücksichtigt zu werden.

Für Systeme der Ebenen A, B und C müssen die SEE-Raten Einzelereignis-Effekte umfassen, die zu leichten Fehlern und schweren Fehlern führen. Leichte Fehler sind als Fehler definiert, die einfach behoben werden können, üblicherweise durch ein Neubooten des Systems oder sogar durch Aus-/Einschalten der Stromversorgung. Die nichtzerstörenden SEE-Effekte, die leichte Fehler einschließen, umfassen SEU, MCU, SET und SEFI (meistens). Schwere Fehler sind diejenigen Fehler, die nicht einfach durch ein Neubooten des Systems behoben werden können. Sie können von einer zerstörenden Beschädigung an einer Ausrüstung/einem Gerät oder durch einen leichten Fehler verursacht werden, der sich innerhalb eines Systems ausbreitet und dazu führt, dass das normale Booten nicht möglich ist. Die zerstörenden SEE-Effekte, die schwere Fehler darstellen, umfassen SEL, SHE, SEB, SEGR und gelegentlich SEFI. In den wenigen Ausrüstungen/Geräten, die für zerstörende SEE-Effekte durch energiereiche Neutronen anfällig sind, wie SHE und SEL, werden die SEE-Raten in Luftfahrtausrüstungen (siehe 8.2.3 und 8.2.4) viel größer sein als die Raten schwerer Ausfälle in diesen Ausrüstungen aufgrund von mechanischen Vorgängen, die für Luftfahrtausrüstungen üblicherweise im Bereich von 100 FITs bis 1 000 FITs liegen (1×10^{-6} bis 1×10^{-7} Ausfälle/Geräte-Stunde [63]).

Die SEU-Raten für einzelne Bauelemente können aus vielen Datenquellen bezogen werden und die zwei hauptsächlichen Herangehensweisen, die dafür angewendet werden können, werden in Abschnitt B.3 und Abschnitt B.4 diskutiert. Die in Abschnitt B.2 beschriebene Herangehensweise, eine LRU oder eine Leiterplatte einem Protonen- oder Neutronenstrahl auszusetzen, liefert mehr Informationen darüber, wie potenzielle SEEs in den Bauelementen das Teilsystem beeinflussen, jedoch wurden nur wenige dieser Prüfungen durchgeführt. Es wurde nur für sehr wenige Bauelemente dokumentiert, dass sie für zerstörende SEE-Effekte anfällig sind, hauptsächlich SEL durch energiereiche Neutronen oder Protonen, jedoch wurde nur eine begrenzte Bauelementeanzahl in derartigen Strahlen geprüft. Aus dem Flugbetrieb gewonnene Erfahrungen an Bauelementen, die in Luftfahrtgehäusen eingesetzt sind, könnten jedoch dazu verwendet werden, die ungenügende Anfälligkeit gegen zerstörende SEE-Mechanismen nachzuweisen, obwohl dies bis jetzt formell noch nicht durchgeführt worden ist.

Die Redundanz bei Ausrüstungen/Geräten gemeinsam mit anderen fehlertoleranten Architekturmaßnahmen würde der Reihe nach auf Anforderungen an annehmbare SEE-Raten übertragen werden. Bei der Realisierung eines Einzelsystems für eine bestimmte Flugzeugfunktion sollten sich die Zielstellungen um annehmbare Geräteausfallraten drehen, die SEE-Raten einschließen. Überlegungen hinsichtlich der Architektur, der Geräteauslegung oder Bauelementeauswahl schwächen den Einfluss von Ausfallraten (einschließlich SEE-Raten) für ein Produkt ab. Die geforderte Disziplin und Strenge beim Systemdesign und beim Nachweis der Abschwächung von Fehlereffekten hängt von der Sicherungsebene der Systementwicklung ab.

Für leichte Fehler und schwere Fehler (Fehlzustände) sind abhängig vom Gesamtgeräteeinfluss auf diese Fehler/Fehlzustände getrennte Fehlerraten erforderlich. Beispielsweise brauchen leichte Fehler keinen Gerätefehlzustand darzustellen, wenn ein automatisches oder von der Besatzung ausgelöstes Zurücksetzen ausreicht, um das Gerät wieder in den bestimmungsgemäßen Betriebszustand zu versetzen. Die mit der Bestimmung der SEE-Rate in Verbindung stehende Disziplin und Strenge könnte von der Charakterisierung der tatsächlichen SEE-Rate für ein spezifisches Bauelement bis zu einer Bestimmung der Ähnlichkeit mit einer Klasse von Bauelementen mit bekannter SEE-Rate reichen. Die SEE-Rate eines Bauelements, die ein System der Ebene A beeinflusst (Auswirkung des Funktionsausfalls ist katastrophal) sollte mit größerer Strenge (siehe 7.4.2) quantitativ bestimmt werden als eine SEE-Rate, die ein System der Ebene B (Auswirkung des Funktionsausfalls ist sehr groß/gefährlich) beeinflusst. In ähnlicher Weise sollte eine SEE-Rate, die ein System der Ebene B beeinflusst, mit größerer Strenge (siehe 7.4.3) quantitativ bestimmt werden, als wenn ein System der Ebene C (große Auswirkung) (siehe 7.4.4) oder Systeme der Ebene D (kleine Auswirkung) und der Ebene E (keine Auswirkung) (siehe 7.4.5) beeinflusst werden.

Im Sinne dieses Schriftstückes führen leichte Fehler zu einem Funktionsfehler oder -ausfall, der beispielsweise durch Zurücksetzen oder Aus-/Einschalten der Stromversorgung behoben werden kann. Schwere Fehler verursachen einen Geräteausfall, der bleibend ist und nur durch Reparaturarbeiten zu beheben ist.

7.3 Betrachtungen zur Gerätetechnik

SEU-Raten stellen bei digitaler elektronischer Gerätetechnik ein besonderes Problem dar. Die Auswirkungen beziehen sich auf die Eigenschaft ungültiger Zustandsänderungen; z. B. solche, die in Auffangschaltungen auftreten (Speicher, Register usw.), die grundlegende Bausteine der digitalen Gerätetechnik darstellen.

Extreme Strahlungsausbrüche auf der Sonne erzeugen zusätzliche Neutronen innerhalb der Atmosphäre und verursachen ohne direkte Warnung einen Anstieg des atmosphärischen Gesamtneutronenflusses. Deshalb sollte für Systeme der Ebenen A, B und C ein Skalierungsfaktor für die solare Überhöhung des Flusses sehr energiereicher Neutronen angewendet werden (siehe 5.6).

Bei Anwendung des Sicherheitsbewertungsprozesses und Vorgabe einer Ausfall-/Fehlzustandsrate für jede SEE-Art können Systemarchitekturen vorgesehen werden, um einen robusten Betrieb in einer unter Umständen ausfallerzeugenden Umgebung zu erreichen. Merkmale der Systemarchitektur, wie Redundanz, Überwachung, Fehlerkorrektur oder Partitionierung können für die Abschwächung der Auswirkungen eines Geräteausfalls auf den Betrieb des Systems und der Verringerung der Wahrscheinlichkeit einer Systemgefährdung nützlich sein. Redundanz ist eine Technik, bei der mehrere Implementierungen einer Funktion vorhanden sind – entweder als mehrere Einheiten oder mit mehreren Wegen in einer Einheit. Es wird angenommen, dass ein schwerer Fehler/Fehlzustand (SEE-induziert usw.), der ein Element des funktionsausführenden Systems beeinflusst, unabhängig von einem derartigen Ausfall ist, der auf ein Element des redundanten Systems einwirkt. Die Überwachung und die Akkommodation der Auswirkung eines Geräteausfalls ist eine nützliche Technik zur Verringerung des Einflusses von beliebigen derartigen Auswirkungen.

Wenn verschiedene Funktionen durch die Technik der integrierten modularen Luftfahrttausrüstung (IMA) vorgesehen sind, muss die Bestimmung der Entwicklungssicherungsebene die Auswirkungen des gleichzeitigen Verlustes und/oder Fehlverhaltens aller Funktionen einschließen, die das IMA-System zur Verfügung stellt. Die mit der höchsten Entwicklungssicherungsebene des Systems in Verbindung stehende Disziplin und Strenge würde für die Gerätetechnik gelten, die mit der IMA-Rechnerplattform verbunden ist.

7.4 Kennwertbestimmung und Kontrolle der Teile

7.4.1 Strenge und Disziplin

Die Strenge und Disziplin, die bei der Kennwertbestimmung der SEE-Raten der Teile und bei der Kontrolle der Teile erforderlich ist, schwankt entsprechend der Entwicklungssicherungsebene und sollte entsprechend angepasst werden.

7.4.2 Systeme der Ebene A

7.4.2.1 Kennwertbestimmung

Systeme der Ebene A werden in zwei Gruppen unterteilt. Eine Gruppe umfasst die Funktionen, bei denen der Pilot nicht Teil der Betriebsregelschleife ist. Diese werden als Systeme der Ebene A, Typ I klassifiziert, z. B. FBW usw.

Die zweite Gruppe umfasst Funktionen, bei denen sich der Pilot durch den Pilot/System-Informationsaustausch in der Regelschleife befindet. Diese sind festgelegt als Systeme der Ebene A Typ II, z. B. EFIS usw.

ANMERKUNG Ausfälle und Funktionsstörungen in einem System der Ebene A Typ I können direkter und abrupter zu einem katastrophalen Ereignis beitragen als Ausfälle und Funktionsstörungen in einem System der Ebene A Typ II. Es ist deshalb zweckmäßig, für Systeme des Typs I ein strengeres Konformitätsverfahren als für Systeme des Typs II zu fordern.

7.4.2.2 Ebene A Typ I

Diese Sicherungsebene erfordert die strengste/disziplinierteste (Prüfung-/Analysen-) Vorgehensweise (einschließlich Kennwertbestimmung der SEE-Rate), um die Übereinstimmung mit den Anforderungen für ein annehmbares Funktionsverhalten in einer Strahlungsumgebung nachzuweisen. Dabei sollte eine der folgenden Methoden angewendet werden:

- SEE-Raten in elektronischen Bauteilen dürfen aus der Neutronenprüfung an spezifischen, bei der Konstruktion verwendeten Teilen durch Beanspruchung in einer geeigneten Simulationseinrichtung abgeleitet werden. Ein Beispiel einer sehr guten Nachbildung der atmosphärischen Neutronenumgebung ist das Los Alamos WNR, siehe 8.3.3 und Anhang C. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist ein Faktor von etwa 2 hinsichtlich der Ereignisrate.
- SEE-Raten in elektronischen Bauteilen dürfen auch aus der Protonenprüfung an spezifischen, in der Konstruktion verwendeten Teilen durch Beanspruchung mit energiereichen Protonenstrahlen (größer als 100 MeV) abgeleitet werden (siehe 8.3.3, Abschnitt B.2 und Anhang C). Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist ein Faktor von etwa 3 hinsichtlich der Ereignisrate.
- Auf Systemebene „in-the-loop“ kann die Art der SEE-Prüfung von luftfahrtelektronischen Ausrüstungen oder Systemen entsprechend der Beschreibung in Abschnitt B.1 angewendet werden. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist vom angewendeten Teilchenstrahl abhängig und ist ein Faktor von etwa 2 bis 3 hinsichtlich der Ereignisrate.
- Wo derartige Daten nicht zur Verfügung stehen oder die Prüfung praktisch nicht durchführbar ist, dürfen die Verfahren nach 7.4.2.3 für die Ableitung von Ereignisraten angewendet werden, jedoch muss für die Ereignisraten ein geeigneter Mindestfaktor für die nach diesen Verfahren berechneten Werte angewendet werden.

Diese Systemarten erfordern das robusteste Teilverhalten und strengste Kontrollen der Bauelemente-technologie. Für die Überwachung von Veränderungen des Bauelementelieferanten, welche die SEE-Ausfall/Fehlzustandsraten beeinflussen können, müssen Technologiekontrollen eingerichtet sein.

7.4.2.3 Ebene A Typ II

SEE-Raten sollten entweder beruhen auf:

- a) der bei Ebene A Typ I angewendeten Strenge/Disziplin oder
- b) weniger strengen/disziplinierten Vorgehensweisen unter Anwendung einer der folgenden Verfahren:
 - Die Verwendung von Herstellerangaben und für die SEE anwendbaren Daten, z. B. Silizium auf Isolator und vorhandener strahlungstoleranter Epitaxialschicht, um Latch-up zu verhindern, sowie nicht zusammenhängende Speicher zur Vermeidung von MBU (Genauigkeitsfaktor von etwa 2 hinsichtlich der Ereignisrate);
 - Bestrahlung von einzelnen Teilen der Luftfahrttausrüstung, die eine Vielzahl von unter Umständen anfälligen Teilen enthalten, wie in Abschnitt B.2 beschrieben;
 - Vom Fachmann für SEE-Strahlungswirkungen muss eines der folgenden technischen Hilfsmittel angewendet werden:
 1. Anwendung von SEE-Daten von Schwerionen, die nach einem analytischen Ansatz ausgewertet wurden, um SEE-Daten von Neutronen zu erhalten. Genauigkeitsfaktor von etwa 10 hinsichtlich der Ereignisrate.
 2. Anwendung von SEE-Daten von Neutronen/Protonen an spezifischen Teilearten (siehe Abschnitt B.3). Genauigkeitsfaktor von etwa 10 hinsichtlich der Ereignisrate.
 3. Anwendung generischer SEE-Daten, beruhend auf der Bauelemente-Grundtechnologie und der Art (z. B. CMOS-SRAM); (siehe Abschnitt B.4) wird angewendet, wenn keine zutreffenden SEE-Daten für die Teile zur Verfügung stehen. Genauigkeitsfaktor von etwa 10 hinsichtlich der Ereignisrate, weil dies ein an sich konservatives Verfahren ist.
 4. Anwendung von SEE-Teileprüfung durch Lasersimulation mit einem Laser, der an einem Bezugsbauelement des gleichen Funktionstyps (z. B. SRAM) und ähnlicher Technologie und ähnlichen Größenverhältnissen kalibriert worden ist; (siehe Abschnitt B.5). Die Genauigkeit ist bei Anwendung von Bezugsbauelementen ein Faktor von etwa 10 hinsichtlich der Ereignisrate.

Diese Arten von Systemen erfordern das stabilste Teilverhalten und strengste Kontrollen der Bauelemente-technologie. Für die Überwachung von Veränderungen des Bauelementelieferanten, welche die SEE-Ausfall-/Fehlzustandsraten beeinflussen können, müssen Technologiekontrollen eingerichtet sein.

7.4.3 Ebene B

Die SEE-Raten sollten entweder beruhen auf:

- a) der bei Ebene A angewendeten Strenge/Disziplin oder
- b) SEE-Fehler-/Ausfallraten, die auf SEE-Prüfungen an ähnlichen Bauelementen zurückgeführt werden können, wobei Prüfergebnisse von anderen als Neutronenanlagen verwendet werden sollten; siehe Abschnitte B.3, B.4 und B.5.

Diese Arten von Systemen erfordern eine mittlere Teile- und Technologiekontrolle mit periodischen Sicherungen, dass keine Veränderungen des Lieferanten die SEE-Fehlverhaltens-/Ausfallraten beeinflussen können.

7.4.4 Ebene C

Die SEE-Raten sollten entweder beruhen auf:

- a) der bei Ebene B angewendeten Strenge/Disziplin oder
- b) SEE-Fehlverhaltens-/Ausfallraten, die rückverfolgbar sind auf Prüfergebnisse mittels eines SEE-Fehlverhaltens-/Ausfallratenmodell (Anwendung einer mittleren SEE-Fehlerrate für alle unter Umständen anfälligen Bauelemente – in diesen Fällen kann die SEE-Fehlerrate für einige Komponenten hoch und

für andere niedrig sein, jedoch kann die Gesamtfehlerrate des Gerätes als annnehmbar erwartet werden – siehe Abschnitt B.4).

Diese Arten der Systeme setzen die üblichen Teilekontrollen und Benachrichtigungspraktiken für Änderungen ein. Änderungen müssen auf den möglichen Einfluss auf SEE-Fehlverhaltens-/Ausfallraten überprüft werden. Der Einfluss einer Teileänderung wird durch das Produkt gezeigt (Erkennen von Trends, die einen großen Anstieg der Fehlverhaltens-/Ausfallraten zeigen).

7.4.5 Ebenen D und E

Diese Arten der Systeme setzen die üblichen Teilekontrollen und Benachrichtigungspraktiken für Änderungen ein. Es ist keine zusätzliche Sortierung hinsichtlich der Auswirkungen der atmosphärischen Strahlung gefordert, sofern es nicht spezifisch vom Kunden gefordert wird.

8 Bestimmung der Raten von Einzelereignis-Effekten bei Luftfahrttausrüstungen

8.1 Haupt-Einzelereignis-Effekte

Viele mikroelektronische Bauelemente sind für Einzelereignis-Effekte in Luftfahrttausrüstungen in Flughöhen anfällig und es gibt viele unterschiedliche Wege, sich mit diesem Phänomen zu beschäftigen. Obwohl in Abschnitt 6 viele verschiedene Arten von Einzelereignis-Effekten aufgeführt sind, muss zuerst anerkannt werden, dass es in nahezu allen Fällen bei den zu Beginn des 21. Jahrhunderts verfügbaren Bauelementen notwendig ist, sich mit den Haupteffekten, nämlich SEU, MBU, MCU und SEFI, zu beschäftigen. Dies braucht für die Zukunft nicht mehr zu gelten, weil die Herstellungsverfahren und Ertragsanforderungen neuerer elektronischer Bauelemente durch Entwicklungen in der Bauelementetechnologie weiter verbessert werden. Die Ereignisraten für andere Einzelereignis-Effekte sind im allgemeinen klein genug, so dass sie in den meisten Fällen ignoriert werden können. Eine Schwierigkeit stellt jedoch SEL dar, weil, obwohl die übergroße Mehrzahl von CMOS-Bauelementen nicht für SEL aufgrund atmosphärischer Neutronen anfällig ist, einige Bauelemente anfällig sind und die SEL-Rate atmosphärischer Neutronen kann für einige von ihnen nicht als klein genug angesehen werden, um sie vernachlässigen zu können. Das SEL-Potenzial kann sich aufgrund von Chiprevisionen bestehender Teile ändern.

Der Schlüssel, um sich mit Einzelereignis-Effekten in Luftfahrttausrüstungen zu beschäftigen, liegt in der Quantifizierung der SEE-Rate einer LRU, die üblicherweise als kombinierte SEE-Rate aller in der LRU eingesetzten Bauelemente genommen wird. Die SEE-Rate wird nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$\text{SEE-Rate} = \text{atmosphärischer Neutronenfluss (n/cm}^2 \text{ je Stunde)} \times \text{SEE-Querschnitt (cm}^2 \text{ je Bauelement)} \quad (2)$$

Hierfür können eine Reihe unterschiedlicher Herangehensweisen angewendet werden, von der Prüfung einer LRU oder der darin befindlichen Leiterplatten, während sie mit einem Neutronen- oder Protonenstrahl beansprucht werden (dynamische Prüfung), bis hin zur Berechnung der Raten, die auf Angaben für das statische SEE-Verhalten der einzelnen Bauelemente beruhen. Einzelheiten zum Thema Einzelereignisprüfungen von Luftfahrttausrüstungssystemen sind in IEC/TS 62396-2 enthalten.

Das SEE-Verhalten eines Bauelements auf einen Teilchenstrahl ist charakterisiert wie der SEE-Querschnitt, der eine Anzahl von Ereignissen dividiert durch die Fluenz der Teilchen ist (p/cm^2 , Teilchenfluss integriert über die Beanspruchungsdauer), der das Bauelement ausgesetzt war. Somit wird der Querschnitt in Einheiten von $\text{cm}^2/\text{Bauelement}$ oder cm^2/bit angegeben.

8.2 Einzelereignis-Effekte mit niedrigen Ereignisraten

8.2.1 Durchbrennen durch Einzelereignis (SEB) und Gate-Durchbruch durch Einzelereignis (SEGR)

Durchbrennen durch Einzelereignis (SEB) und Gate-Durchbruch durch Einzelereignis (SEGR) gelten nur für Bauelemente wie Leistungs-MOSFETs und IGBTs. Wie in Abschnitt 6 diskutiert, können energiereiche Neutronen in der Atmosphäre SEB und SEGR in Leistungs-MOSFETs auslösen, jedoch ist hier noch ein weiterer wichtiger Bauelementeparameter beteiligt, die Drain-Source-Spannung U_{DS} , (U_{GS} , die Gate-Source-Spannung spielt eine kleinere Rolle). Leistungs-MOSFETs werden im Allgemeinen unter einer Bedingung der

Unterlastung betrieben, d. h. bei einer U_{DS} , die unter der Bemessungs- U_{ds} des Bauelements liegt. Eine große Anzahl von Leistungs-MOSFETs wurde Laboratoriumsprüfungen mit Strahlen von Schwerionen auf SEB und/oder SEGR unterzogen, und diese haben den Wert der U_{DS} (Annahmewert der U_{DS}) bestimmt, bei der kein SEB oder SEGR auftritt. In ähnlicher Weise wurde eine kleinere Anzahl von Leistungs-MOSFETs mit Strahlen von Protonen und energiereichen Neutronen auf SEB geprüft, und die Ergebnisse, die U_{DS} -Annahmewerte, wurden in Tabellen erfasst [64], [65], [66]. Der Annahmewert der U_{ds} für Protonen/Neutronen ist höher als für Schwerionen. Aus diesen Ergebnissen können wir verallgemeinern, dass, beruhend auf den geprüften Bauelementen, atmosphärische Neutronen in Leistungs-MOSFETs, die für 400 V und mehr bemessen sind, SEB auslösen können. Wenn jedoch Bauelemente bei einer $U_{DS} < 300$ V betrieben werden ist die Wahrscheinlichkeit eines SEB klein genug, so dass SEB nicht zu einem Problem werden sollte. Bei Spannungen > 300 V ist der SEB-Querschnitt erforderlich, um die SEB-Rate zu berechnen, und dieser Querschnitt kann nur durch SEB-Prüfungen mit energiereichen Protonen/Neutronen bestimmt werden, wie in [67], [68], [69] beschrieben.

Es gibt Hinweise darauf, dass Hochspannungselektronik durch Sekundärneutronen auf Meeresspiegelhöhe beeinflusst worden ist. Wie in [59] und [64] angegeben, sind alle Fälle, in denen Hochleistungselektronik auf Bodenhöhe ausgefallen ist, kosmischer Neutronenstrahlung zuzuschreiben.

8.2.2 Transiente durch Einzelereignis (SET)

Das Verhalten auf Transienten durch Einzelereignis (SET) wurde bei einer Anzahl von Bauelementen mit Schwerionen gemessen, jedoch wurden nur bei drei unterschiedlichen Bauelementtypen Protonenstrahlen verwendet, und zwar bei einem Komparator [49], einem Analog-Digital-Wandler [70] und einem Pulsbreitenmodulator (PWM) [48]. Die Fähigkeit einer Schaltung, eine SET auszuhalten, ist in starkem Maße von der spezifischen Anwendung abhängig. Trotzdem können die berechneten SET-Raten für diese drei Bauelementtypen bei Flughöhen unter Berücksichtigung des nominellen Neutronenflusses (siehe 5.3.2) nützlich bei der Bewertung der Auswirkungsarten sein, die ausgelöst werden können, und liefern eine Obergrenze für ihre Auftretenswahrscheinlichkeit. Bei dem Pulsbreitenmodulator führten die SETs zur Veränderung der Wellenform am Ausgang des Bauelements, das üblicherweise eine konstante Frequenz und Tastverhältnis besitzt. [48]. Phasenverschiebungsfehler des Ausgangssignals wurden als kleine Ereignisse gewertet, und sie haben eine Obergrenzenrate von 4×10^{-6} Ereignisse/Bauelement-Stunde bei Flughöhen, während Periodendauer-Fehlanpassungsfehler (größere Ereignisse) eine Obergrenzenrate von 1×10^{-6} Ereignisse/Bauelement-Stunde haben. Bei dem Komparator lagen die aufgezeichneten Transienten bei etwa 1 μ s und die Wahrscheinlichkeit derartiger Ereignisse ist von der Eingangsspannung abhängig. Bei einem Eingangssignal von -25 mV führten die mit Protonen erzielten Ergebnisse zu einer Obergrenze der SET-Rate von 1×10^{-6} Ereignisse/Bauelement-Stunde bei Flughöhen und bei einem Eingangssignal von $-12,5$ mV führten die mit Protonen erzielten Ergebnisse zu einer Obergrenze der SET-Rate von 2×10^{-5} Ereignisse/Bauelement-Stunde bei Flughöhen.

8.2.3 Schwerer Fehler durch Einzelereignis (SHE)

Vor kurzem wurde ein 64-Mbit-SDRAM mit energiereichen Protonen auf schwere Fehler durch Einzelereignis (SHE) geprüft, und es wurden Festbits, SHEs, aufgezeichnet [70]. Dies ist die nützlichste Angabe für die Schätzung der SHE-Rate in Flughöhen. SHE ist ein Mikrodosiseffekt und es ist überhaupt nicht sicher, dass andere große SDRAMs die gleiche Anfälligkeit gegen diesen Effekt wie der geprüfte SDRAM haben. Trotzdem ist die für diesen SDRAM bei Flughöhen berechnete SHE-Rate hilfreich, eine Obergrenze der Auftretenswahrscheinlichkeit von schweren Fehlern anzugeben. Durch die mit Protonen erzielten Ergebnisse [70] wurde eine Obergrenzenrate von 4×10^{-6} SHE-Ereignisse/Bauelement-Stunde bei Flughöhen aufgrund atmosphärischer Neutronen erhalten. Diese Rate beruht auf der Annahme, dass jedes Bit des 64-Mbit-SDRAM gleichermaßen anfällig ist.

8.2.4 „Latch-up“ durch Einzelereignis (SEL)

Viele CMOS-Bauelemente sind gegen SEL aufgrund von Schwerionen anfällig. Von ihnen wurde eine kleine Anzahl auch mit Strahlen energiereicher Protonen und Neutronen geprüft, und es hat sich gezeigt, dass sie für SEL aufgrund von Protonen und Neutronen anfällig sind. Die Hinweise in [71] und [72] führen einige dieser Bauelemente auf, bei denen durch Protonen und Neutronen ausgelöstes SEL vorkommen kann, und

es werden auch ihre SEL-Querschnitte angegeben, jedoch werden jedes Jahr oder jedes zweite ein oder mehr neue Bauelemente von SEE-Forschern gefunden, die für Protonen-SEL anfällig sind [73].

Eine Vorgehensweise, die nützlich sein kann, besteht darin, eine Obergrenzenrate anzugeben, die auf einem Bauelement mit der höchsten Wahrscheinlichkeit für ein Auftreten von durch atmosphärische Neutronen bei Flughöhen verursachte SELs beruht [71], [72]. In den Hinweisen [71] und [72] sind insgesamt sieben Bauelemente mit Protonen-SEL-Querschnitten angegeben und die beiden höchsten SEL-Querschnitte betragen $4,5 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$ (DSP) und $6,6 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$ (Mikrocontroller). Leider wurden vor sehr kurzer Zeit zwei durch Protonen ausgelöste Latch-up-Querschnitte für SRAMs veröffentlicht [46] und [74] und diese durch Protonen ausgelöste SEL-Querschnitte von $7 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$ und $4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ überschreiten beide den größten vorherigen Protonen-SEL-Wert. Bei einer weiteren Untersuchung [75] wurden SRAMs einem WNR-Neutronenstrahl ausgesetzt und bei SRAMs von drei verschiedenen Verkäufern wurde Latch-up erzeugt, zwei auch bei großen SEL-Querschnitten. Die Obergrenzen-SEL-Rate für Luftfahrttausrüstungen, die auf dem derzeit größten gemessenen SEL-Querschnitt von $4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ und einem Neutronenfluss von $6 \times 10^3 \text{ n/cm}^2$ je Stunde beruht, beträgt somit $2,4 \times 10^{-4}$ Latch-up/Bauelement je Stunde oder einmal in etwa 4 000 h. Weil hinsichtlich der Problematik diese Rate als hoch genug erscheint, könnte die beste Alternative darin bestehen, alle Bauelemente in einer LRU einem Strahl energiereicher Protonen oder Neutronen auszusetzen und auf Latch-up zu überwachen (Ansteigen des Stromes). Für das „Latch-up“-Screening stellt auch das gepulste Laserverfahren eine effiziente Lösung dar. Der Strahl wird nur verwendet, um zu bestimmen, ob ein Bauelement ein „Latch-up“ infolge eines Ionisationsereignisses zeigt [76]. Diese Prüfung liefert eine maßgebliche und reproduzierbare Lösung für die Bauelementebewertung während der Konstruktionsphase, aber auch um die Auswirkungen von Chipänderungen auf die SEL-Empfindlichkeit zu kontrollieren.

Dadurch könnten Bauelemente, die für neutroneninduzierte SEL anfällig sind, erkannt und alternative Maßnahmen in Betracht gezogen werden. Diese Vorgehensweise wird von einigen NASA-Zentren und -Programmen aufgrund der Bedeutung von SELs durch die im Raum eingefangenen Protonen praktiziert.

8.3 Einzelereignis-Effekte mit höheren Ereignisraten – Daten von Störungen durch Einzelereignis

8.3.1 Allgemeines

Der Schlüssel, mit dem man in die Lage versetzt wird, sich mit Einzelereignis-Effekten in Luftfahrttausrüstungen zu befassen, liegt in der Quantifizierung der Rate der Einzelereignis-Effekte für ein Luftfahrtgehäuse. Kann eine Schätzung für eine Ereignisrate vorgenommen werden, so können entsprechende Maßnahmen für die Akkommodation des Ereignisses in Betracht gezogen werden. Wenn die Ereignisrate klein genug ist, könnte die Entscheidung getroffen werden, dieses zu tolerieren. Wenn sie zu hoch ist kann der Einbau verschiedener fehlertoleranter Maßnahmen berücksichtigt werden, wie eine Fehlererkennung und -korrektur (EDAC) oder Redundanz. Diese fehlertoleranten Maßnahmen betreffen Architektur- und Systemansätze, die über den Anwendungsbereich dieses Dokumentes hinausgehen.

Wie in Abschnitt 6 ausgeführt, sind SEU, MCU und SEFI die drei Einzelereignis-Effekte, die die größte mögliche Bedrohung für Luftfahrttausrüstungen in Luftfahrzeugen sind, und sie werden in der Reihenfolge abnehmenden Auftretens aufgeführt. Außerdem könnte, wie in 8.2.4 diskutiert, für einige wenige CMOS-Bauelemente die Einzelereignis-Latch-up-Rate von Interesse sein. Auf einem vereinfachten Niveau ist zu sagen, dass die SEU-Rate von der Anzahl der Bits in einem Bauelement abhängt und in den meisten Fällen dienen die Bits entweder als Speicher, Register oder Auffangspeicher. Die Bauelementearten, die die größte Anzahl „flüchtiger“ Bits enthalten, sind Speicher, Mikroprozessoren, ASICs und frei programmierbare Verknüpfungsfelder (FPGAs). Wenn die SEU-Rate bei Flughöhen auf einer Basis je Bit betrachtet wird, dann ist die SEU-Rate für diese verschiedenen Bauelementearten innerhalb eines Bereiches von 1 bis 2 Größenordnungen ähnlich.

8.3.2 SEU-Querschnitt

Das SEU-Verhalten eines Bauelements auf einen Teilchenstrahl ist charakterisiert wie der SEU-Querschnitt, der eine Anzahl von Störungen dividiert durch die Fluenz der Teilchen ist (p/cm^2 , Teilchenfluss integriert über die Beanspruchungsdauer), der das Bauelement ausgesetzt war. Somit wird der Querschnitt in Einheiten von $\text{cm}^2/\text{Bauelement}$ oder cm^2/bit angegeben. Verschiedene wissenschaftliche und technische Organisationen in

der Welt führen derartige SEU-Prüfungen durch, um das SEU-Verhalten von Bauelementen auf die unterschiedlichen Teilchen zu charakterisieren. Die übergroße Mehrzahl dieser Prüfungen wird für die elektronischen Ausrüstungen durchgeführt, deren Einsatz im Weltraum vorgesehen ist. Aus diesem Grunde werden die meisten Prüfungen mit Strahlen aus Schwerionenteilchen und einige werden mit Protonenstrahlen durchgeführt. Eine kleinere Anzahl wird mit Neutronenstrahlen durchgeführt.

In der Literatur über Strahlungseffekte werden drei verschiedene Arten von SEU-Querschnitten beschrieben, Schwerionen-SEU-Querschnitte, Protonen-SEU-Querschnitte und Neutronen-SEU-Querschnitte. Für die unmittelbare Anwendung sind die Schwerionen-SEU-Querschnitte, die für die elektronischen Ausrüstungen für Weltraumanwendungen vorgesehen sind, nicht direkt für Anwendungen von Luftfahrtausrüstungen zutreffend, dennoch wird die Anwendung der Schwerionen-SEU-Daten für die Zwecke der Luftfahrtausrüstung in Abschnitt B.3 weiterhin diskutiert.

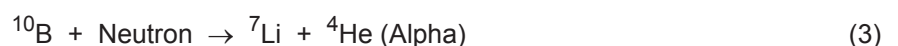
8.3.3 Protonen- und Neutronenstrahlen für die Messung von SEU-Querschnitten

Für Teilchenenergien über 50 MeV können die mit Protonen und Neutronen gemessenen SEU-Querschnitte im Wesentlichen als gleich genommen werden, jedoch gilt dies nicht bei niedrigeren Energien aufgrund der Coulombschen Potentialschwelle für Protonen, die für die ungeladenen Neutronen nicht vorhanden ist. Es gibt aber beim Vergleich zwischen Neutronen- und Protonendaten ein Problem, insofern als die Protonen-SEU-Querschnitte mit einem monoenergetischen Protonenstrahl gemessen werden, während es außer unter besonderen Umständen schwierig ist, einen Neutronenstrahl mit einer Energie zu erzeugen. Protonenstrahlen stehen weltweit bei einer Reihe von Hochenergiebeschleunigern zur Verfügung, z. B. in der Indiana University Cyclotron Facility (IUCF) in den USA, dem Paul-Scherer-Institut (PSI) in der Schweiz, der Tri-University Meson Facility (TRIUMF) in Kanada usw. Jeder Beschleuniger hat eine obere Energie, jedoch erfolgt die Prüfung häufig bei mehreren Energien und die SEU-Querschnitte werden in Abhängigkeit von der Protonenenergie angegeben. Deshalb kann der mit Protonenstrahlen >100 MeV gemessene SEU-Querschnitt verwendet werden, um den äquivalenten WNR-Querschnitt zu liefern.

Das Spektrum der atmosphärischen Neutronen überstreicht in Flughöhen einen Energiebereich bis >1 000 MeV. Es gibt eine Neutronenquellenart, die die atmosphärische Neutronenumgebung nachbildet und den Prüfern ermöglicht, Elektronikausrüstungen dem Strahl auszusetzen und die ausgelösten Einzelereignis-Effekte zu messen. Dabei handelt es sich um die in Anhang C angegebenen Beispiele von Neutronenspallationsquellen; diese Quellen können so konstruiert sein, dass ihr Spektrum die atmosphärische Strahlungsumgebung (weiße Neutronenquelle) bis zur höchsten Energie des Beschleunigers simuliert. Derartige Quellen können Neutronenflüsse erzeugen, die um Größenordnungen höher sind als die der atmosphärischen Strahlungsumgebung, und sie ermöglichen hochbeschleunigte Prüfungen an Elektronikausrüstungen.

Die anderen zur Verfügung stehenden Neutronenquellen sind monoenergetische Neutronengeneratoren und quasi-monoenergetische Neutronenstrahlen. Die Neutronengeneratoren vertrauen auf die D-T-Reaktion, um monoenergetische Strahlen von 14-MeV-Neutronen zu erzeugen, und gelegentlich auf die D-D-Reaktion, um Strahlen von ~3-MeV-Neutronen zu erzeugen. Die quasi-monoenergetischen Strahlen beruhen darauf, dass ein Protonenstrahl ein Lithium-7-Target trifft und einen Neutronenstoß mit nahezu der Energie der Protonen sowie einen niedrigeren Fluss von Neutronen mit Energien über den gesamten Energiebereich von der Spitzenenergie bis hinunter zu thermischen Energien erzeugt. Dieser „Schweif“ mit niedriger Energie macht einen wesentlichen Anteil aller erzeugten Neutronen aus. Es besteht eine gewisse Unsicherheit darin, wie viel des SEU-Beitrages aus den Neutronen des Niedrigenergieschweifes in vereinbarter Weise abzuziehen ist, um monoenergetische Neutronen-SEU-Querschnitte zu erhalten.

Innerhalb eines Luftfahrzeuges gibt es jedoch noch eine weitere Neutronenquelle, die Einzelereignis-Effekte auslösen kann und die für Laborprüfungen eine gänzlich andere Art von Neutronenquelle erfordert. Diese sind die in 5.3.5 diskutierten thermischen Neutronen. Die mittlere Energie dieser Neutronen beträgt 0,025 eV, ganz allgemein jedoch gilt für sie ein Wert von <1 eV; das ist eine um 6 bis 9 Größenordnungen geringere Energie als die der hauptsächlich betrachteten energiereichen Neutronen im Bereich von 1 MeV bis 1 000 MeV. Die thermischen Neutronen verursachen Einzelereignis-Effekte durch die Wechselwirkung mit dem Bor-10-Isotop innerhalb integrierter Schaltungen (Glaspassivierungsschicht über Silizium) und nicht mit den Siliziumatomen. Für die ansteigende SEU-Rate aufgrund von thermischen Neutronen ist die folgende Reaktion verantwortlich:



Kernreaktoren für Forschungszwecke und andere Anlagen (siehe Anhang C) stellen günstige Quellen für thermische Neutronen mit relativ hohen Neutronenflüssen für die beschleunigte Prüfung dar. Es gibt jedoch wenige Untersuchungen, bei denen Bauelemente thermischen Neutronen ausgesetzt und der sich ergebende EU-Querschnitt gemessen worden ist. Nur bei einer kleinen Anzahl dieser Untersuchungen wurden SRAMs den Strahlen thermischer Neutronen und energiereichen Neutronenstrahlen ausgesetzt und deren SEU-Querschnitte verglichen. In einer Untersuchung [46] wurden die SEU-Querschnitte für thermische Neutronen und energiereiche Neutronen in SRAMs von vier verschiedenen Verkäufern gemessen. Bei den SRAMs von zwei Verkäufern war der Querschnitt für thermische Neutronen um einen Faktor zwischen 1,5 und 3 höher als der Querschnitt für energiereiche Neutronen, beim Bauelement eines Verkäufers war das Verhältnis der SEU-Querschnitte für thermische und energiereiche Neutronen etwa 1, und beim vierten Verkäufer gab es für thermische Neutronen keine SEU-Querschnitte. In einer zweiten Untersuchung [77] war bei einem SRAM der SEU-Querschnitt für thermische Neutronen um einen Faktor von etwa 10 niedriger als der durch energiereiche Neutronen, bei einem zweiten SRAM jedoch war der SEU-Querschnitt für thermische Neutronen um einen Faktor von 2,5 höher. Bei der interessantesten Untersuchung [78] wurden SRAMs den natürlich auftretenden Neutronen an einem Ort großer Höhe ausgesetzt, wobei einige Bauelemente das gesamte Spektrum empfangen und die anderen gegen thermische Neutronen abgeschirmt wurden. Die SEU-Rate aufgrund von thermischen Neutronen betrug etwa das Dreifache der Rate aufgrund von energiereichen Neutronen, und unter Berücksichtigung der relativen Größe der Neutronenflüsse beträgt der SEU-Querschnitt für thermische Neutronen etwa das Vierfache von dem für energiereiche Neutronen. Ein weiterer Vergleich zwischen den Querschnitten für energiereiche und thermische Neutronen bei SRAMs wird in [21] vorgenommen. Daraus folgt, dass die zusätzliche SEU-Rate für thermische Neutronen zu einer Problematik für Luftfahrtgeräten geworden ist. In Anhang A und IEC/TS 62396-5 werden Einzelergebnis-Effekte aufgrund thermischer Neutronen weiterhin diskutiert.

Die Neutronen-SEU-Querschnitte, die bei einer spezifischen Prüfung erhalten wurden, sind von der verwendeten Neutronenquelle abhängig. Bei Luftfahrtanwendungen sind die mit dem WNR-Strahl gemessenen Querschnitte am besten, weil diese Neutronen das gleiche Energiespektrum wie die atmosphärischen Neutronen haben. Diese WNR-SEU-Querschnitte können direkt für die atmosphärischen Neutronen in Flughöhen angewendet werden [72].

Der Zusammenhang zwischen dem WNR-SEU-Querschnitt und den Protonen- und Neutronen-SEU-Querschnitten bei spezifischen Energien wird in Bild 8 für drei ältere SRAMs angegeben. Scheinbar ist für die zwei Bauelemente, deren Querschnitte im WNR-Strahl gemessen wurden, der WNR-SEU-Querschnitt etwa gleich dem Protonen-SEU-Querschnitt für eine Energie >100 MeV sowie dem monoenergetischen Neutronen-SEU-Querschnitt bei 100 MeV. Deshalb kann der SEU-Querschnitt von Protonenstrahlen mit mehr als 100 MeV dazu verwendet werden, um den äquivalenten WNR-Querschnitt zu liefern. Die Angaben für den monoenergetischen Neutronen-SEU-Querschnitt wurden aus Messungen mit einem pseudo-monoenergetischen Strahl abgeleitet und entsprechend dem Beitrag des Schweißes niederenergetischer Neutronen korrigiert [79]. Auf der Grundlage jüngerer Prüfungen [20] kann des Weiteren angenommen werden, dass aus Prüfungen mit monoenergetischen Protonenstrahlen (>100 MeV) stammende SEU-Querschnitte in SRAMs, FPGAs und Mikroprozessoren innerhalb eines Faktors von weniger als 2 liegen im Vergleich zu denen, die in Prüfungen mit dem WNR-Neutronenstrahl gemessen würden.

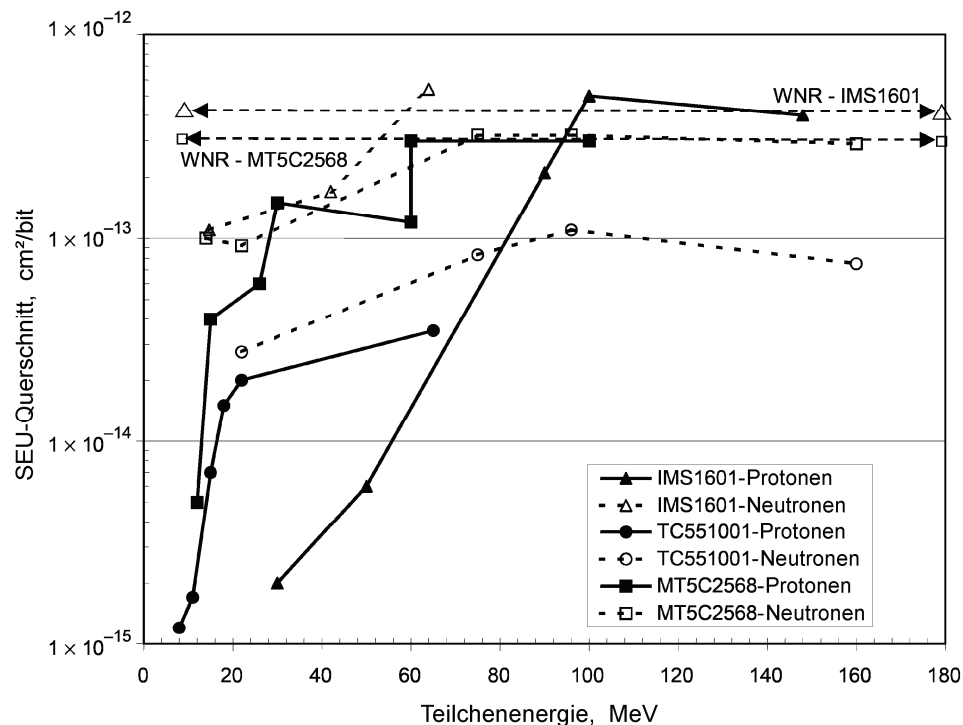


Bild 8 – Schwankungen des SEU-Querschnittes von RAMs in Abhängigkeit von der Neutronen-/Protonenenergie

Für den Vergleich der Neutronen- und Protonenmessungen und hinsichtlich der Bedeutung der Neutronen mit niedriger Energie werden in Bild 9 zwei Beispiele mit Daten von 4-Mbit-SRAMs angegeben [20], [46]. Die Baugröße dieser Bauelemente betrug $0,4 \mu\text{m}$ und das Bild enthält Daten für das empfindlichste und das unempfindlichste Bauelement der Stichprobe. Bei den mit Neutronenenergien von 21 MeV bis 174 MeV am TSL gewonnenen Ergebnissen werden die oberen und unteren Grenzwerte für Neutronen abgeleitet durch Division durch Neutronenspitzenwert bzw. Neutronengesamtwert. Die Ergebnisse von TRIUMF für Protonen bei 13 MeV bis 490 MeV sind exakt monoenergetisch und liegen dazwischen. Der Punkt für Neutronen bei 14 MeV wurde aus einer monoenergetischen Neutronenquelle (D-T) erhalten und ist höher als der TSL-Punkt bei der niedrigsten Energie. Die mit der TRIUMF-Neutronenspallationsquelle gewonnenen Querschnitte sind über das Spektrum >10 MeV gemittelt und als gepunktete Linie dargestellt. Sie stimmen hinreichend mit den Querschnitten aus Plateau-Prüfungen mit monoenergetischen Protonen und quasi-monoenergetischen Protonen überein. Weitere Datenpunkte bei 3 MeV und 4 MeV wurden an der ASP- (D-D) und der IUCF-Anlage (3 MeV – 5 MeV) ermittelt, die eine bis zwei Größenordnungen unterhalb des Plateaus bei hohen Energien liegen. Zusätzliche Daten, die die 3-MeV- bis 5-MeV-Daten mit Neutronenspallationsquellen vergleichen, stehen in [20] zur Verfügung und geben an, dass die Ersteren um einen Faktor von 5 bis 600 niedriger sind.

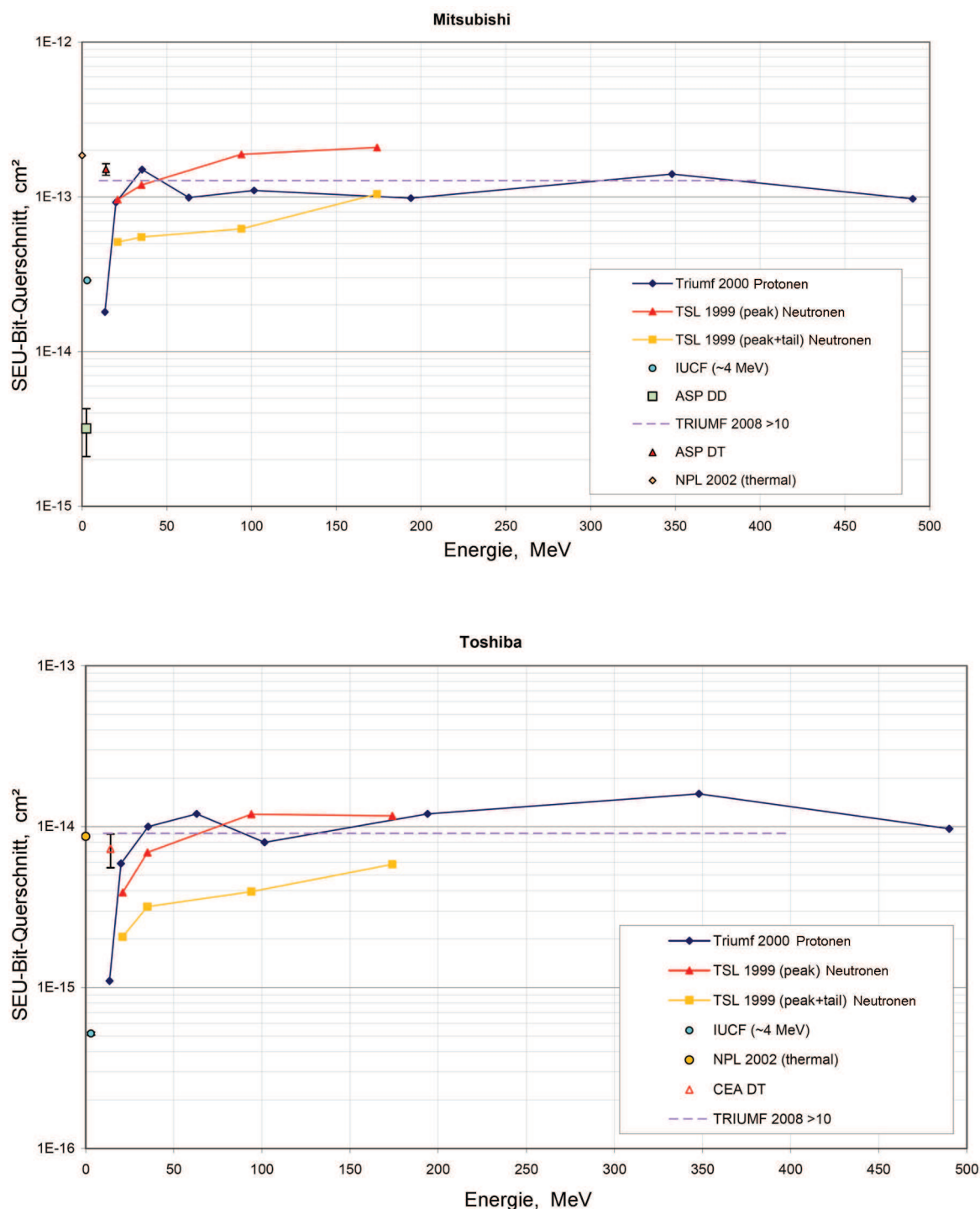


Bild 9 – Daten von SEU-Bit-Querschnitten für Neutronen und Protonen

In Bild 9 ist auch der an der NPL-Anlage gemessene SEU-Querschnitt bei thermischen Neutronen (kleiner als 1 eV) enthalten. Dieser ist bei einem Bauelement etwa um den Faktor 1,5 bis 3 höher als der SEU-Querschnitt bei hochenergetischen Neutronen, und bei dem anderen ist er gleichwertig. Weitere Beispiele von Prüfdaten zur Empfindlichkeit gegenüber thermischen Neutronen sind in [20] und [21] enthalten und sie zeigen, dass bei einigen Bauelementen thermische Neutronen die SEU-Rate in Luftfahrtstrukturausrüstungen dominieren können, während bei anderen der Beitrag geringer sein kann. Wie mit dem Problem der thermischen Neutronen zu verfahren ist, wird in IEC/ TS 62396-5 umfangreich diskutiert.

8.3.4 Trends der Querschnitte je Bit in SRAMs hinsichtlich SEU

In der Praxis sind, obwohl die besten SEU-Daten aus den Messungen im WNR-Strahl stammen, die größte Quelle Protonen-SEU-Daten, die als Ersatz für die WNR-SEU-Querschnitte benutzt werden können, die Protonen-SEU-Querschnitte bei einer Energie >100 MeV. Im Jahr 1997 wurden für Luftfahrttausrüstungen tabellarisch erfasste Werte von SEU-Querschnitten, cm^2/bit , zusammengestellt, die aus WNR- und Protonen- (Energie >200 MeV) Messungen für SRAMs und DRAMs abgeleitet worden sind [80]. Die in [80] gezogene Schlussfolgerung ist, dass, beruhend auf den zusammengestellten Ausgangsdaten, die mittlere SEU-Anfälligkeit für SRAMs und DRAMs mit der Zeit abnahm. Jedoch nimmt bei SRAMs die SEU-Anfälligkeit je Bit langsam ab, während die SEU-Anfälligkeit für DRAMs wesentlich schneller abnahm.

Weil diese Zusammenstellung der SEU-Querschnittsdaten als Funktion des Bauelementedatums sehr nützlich für das Verstehen der Trends der SEU-Anfälligkeit der Elektronik ist, wurden zwei Kurven für SRAMs und DRAMs [81] aktualisiert. Die Aktualisierung erfolgte durch Auftragen aller Ausgangsdaten und dem anschließenden Hinzufügen von Daten aus jüngeren Quellen, um die erfassten Jahre und die Breite der aufgenommenen Teile zu vergrößern. In Bild 10 sind die Daten für SRAM dargestellt. In diesem Bild sind außerdem zwei Anpassungen dargestellt. Die erste Anpassung stammt aus dem Ausgangsschriftstück [80] und beruht auf allen Ausgangsdaten. Sie zeigt über die Zeit eine Verringerung des SEU-Querschnittes mit einer leichten Neigung. Bei der Betrachtung von Bild 10, welches die neueren Daten enthält, ist es schwierig, einen kontinuierlichen Trend bei der Verringerung der SEU-Querschnitte festzustellen, d. h., für die meisten Bauelemente scheint es eine Annäherung an einen asymptotischen Wert zu geben. Viele dieser Daten konzentrieren sich scheinbar um einen SEU-Querschnitt von $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{bit}$, jedoch etwas zerstreuter innerhalb eines Bandes mit einem Faktor von 3 bis 0,33 dieses Wertes.

Abschließend ist eine Trendkurve aufgenommen worden, die aus den in [82] angegebenen Daten abgeleitet wurde und die auf SEU-Raten am Boden beruht, die häufig als SER (Raten leichter Fehler) bezeichnet werden. Die SEU-Querschnitte wurden von SER-Raten nach einem gleichmäßigen Verfahren abgeleitet, und diese Trendlinie (die Ziegler-Kurve) zeigt den gleichen wie vorstehend beobachteten Trend. Beruhend auf den gemessenen SEU-Querschnitten der einzelnen SRAMs scheint es für die meisten Bauelemente einen asymptotischen Wert des SEU-Querschnittes innerhalb des Bandes von $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{bit}$ bis $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{bit}$ zu geben.

Die Schlussfolgerung bezüglich des angenäherten asymptotischen Verhaltens von SRAMs in Abhängigkeit von der Zeit hinsichtlich ihrer SEU-Empfindlichkeit auf atmosphärische Neutronen sollte mit Vorsicht behandelt werden. Es ist hauptsächlich aus Daten in Bild 10 abgeleitet worden und es kann nicht bestimmt werden, wie repräsentativ die im Bild verwendeten Bauelemente für sämtliche SRAMs sind, die in Luftfahrttausrüstungen eingesetzt werden können. Die im Bild verwendeten SRAMs sind diejenigen, die entweder mit dem WNR-Strahl oder mit energiereichen Protonen auf SEU geprüft worden sind. Wie im Bild zu sehen, haben einige SRAMs sogar niedrigere SEU-Querschnitte als die scheinbaren asymptotischen Bänder, die abgeleitet werden können, entweder $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{bit}$ bis $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{bit}$ oder $3 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{bit}$ bis $3 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{bit}$.

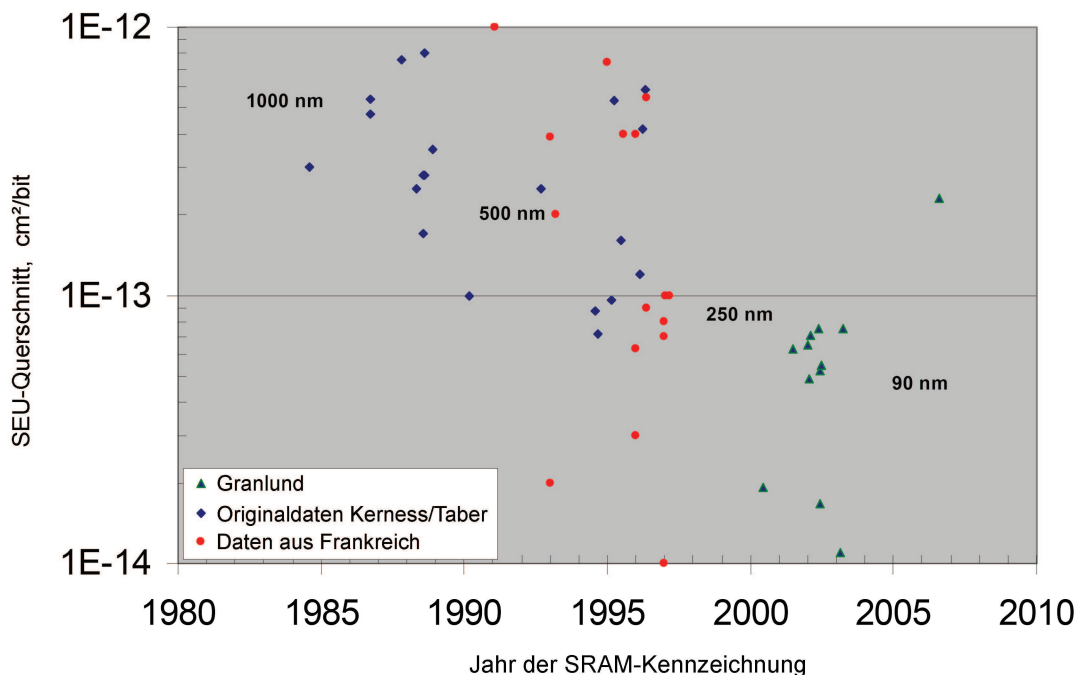


Bild 10 – SEU-Querschnitt in SRAMs in Abhängigkeit vom Fertigungsdatum

Die SRAM-SEU-Daten in Bild 10 umfassen SRAMs mit Baugrößen >500 nm und andere mit kleineren Baugrößen bis <100 nm; die ungefähren Technologiegrößen wurden in nm hinzugefügt. Zusammenstellungen von SEU-Querschnitten jüngerer Bauelemente, bis zu kleineren Baugrößen von 180 nm [83], [84], [85], haben eine leichte Abnahme bei den Querschnitten gezeigt, wobei die meisten Querschnitte in den Bereich von $1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{bit}$ bis $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{bit}$ fallen, einige wenige aber, hauptsächlich die für Bauelemente <200 nm, im Bereich zwischen $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{bit}$ und $1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{bit}$ liegen. Mit der kontinuierlichen Abnahme der Baugrößen haben einige SRAMs, im Vergleich zu den meisten früheren Bauelementen, eine erhöhte Empfindlichkeit bei niedrigen Neutronenenergien, d. h. $E < 10 \text{ MeV}$, gezeigt. Während die Faustregel, dass sich der SEU-Beitrag von Neutronen mit $1 < E < 10 \text{ MeV}$ in der atmosphärischen Neutronenumgebung auf unter 10 % der Gesamtrate [86] beläuft, allgemein gilt, betrug bei diesen wenigen Bauelementen das Verhältnis von $[\text{SEU-Querschnitt } (E > 10 \text{ MeV})]/[\text{SEU-Querschnitt } (E \text{ 3 - 5 MeV})]$ ungefähr 1,0. Für solche Bauelemente liegt der SEU-Beitrag von Neutronen mit $E < 10 \text{ MeV}$ damit bei über 10 % [20].

Ein verwandter, doch anderer Effekt kann in SRAMs mit Baugrößen von <90 nm beobachtet werden, der sich auf Störungen bezieht, die durch direkte Ionisation durch energiearme Protonen (E etwa 0,1 MeV) verursacht werden [87]. Neutronen aller Energien können Sekundärprotonen mit derartig niedrigen Energien erzeugen. Somit handelt es sich bei SEUs, die durch solche energiearmen Sekundärprotonen hervorgerufen werden, um einen neuen Mechanismus, durch den Neutronen SEUs in SRAMs verursachen können [88]. Energiearme Protonen sind Teil der Umgebung.

8.3.5 Trends der SEU-Querschnitte je Bit und weitere Einzelereignis-Effekte in DRAMs

Bei DRAMs ist die Situation anders. Der steile Abfall des SEU-Querschnittes in Abhängigkeit vom Herstellungsjahr der DRAMs, der in den Ausgangsdaten [80] zu sehen ist, wird durch Aufnahme jüngerer Daten verstärkt. So wie die mikroelektronischen Technologien modifiziert werden, um bei einzelnen Bauelementen die Aufnahme einer größeren Bitanzahl zu ermöglichen, ist in diesem Fall das Reinergebnis für die SEU-Empfindlichkeit ein kontinuierlicher Abfall dieser Empfindlichkeit auf bitweiser Basis. Dies wird in Bild 11 gezeigt, in dem die Ausgangsdaten [80] gemeinsam mit den SEU-Ergebnissen aus jüngeren Prüfungen dargestellt sind. Die Ausgangsdaten beruhen hauptsächlich auf 4-Mbit- und 16-Mbit-DRAMs, aber die neueren Prüfungen mit stark verkleinerten SEU-Querschnitten je Bit beruhen hauptsächlich auf Bauelementen von 64 Mbit bis 256 Mbit. Außerdem wurden DRAMs geprüft [7], [39], die unter Verwendung verschiedener DRAM-Technologien konstruiert wurden, interner Grabenkondensator (TIC, nur von IBM und einem oder zwei anderen Verkäufern angewendet) und Stapelkondensator (SC, von allen anderen DRAM-Verkäufern angewendet). TIC-DRAMs haben eine geringere SEU-Empfindlichkeit.

Aufgrund der großen Schwankungsbreite zwischen Bauelementen verschiedener Technologien und Baugrößen wird den Entwicklern jedoch empfohlen, zutreffende Daten zu sammeln oder das ausgewählte Bauelement zu prüfen.

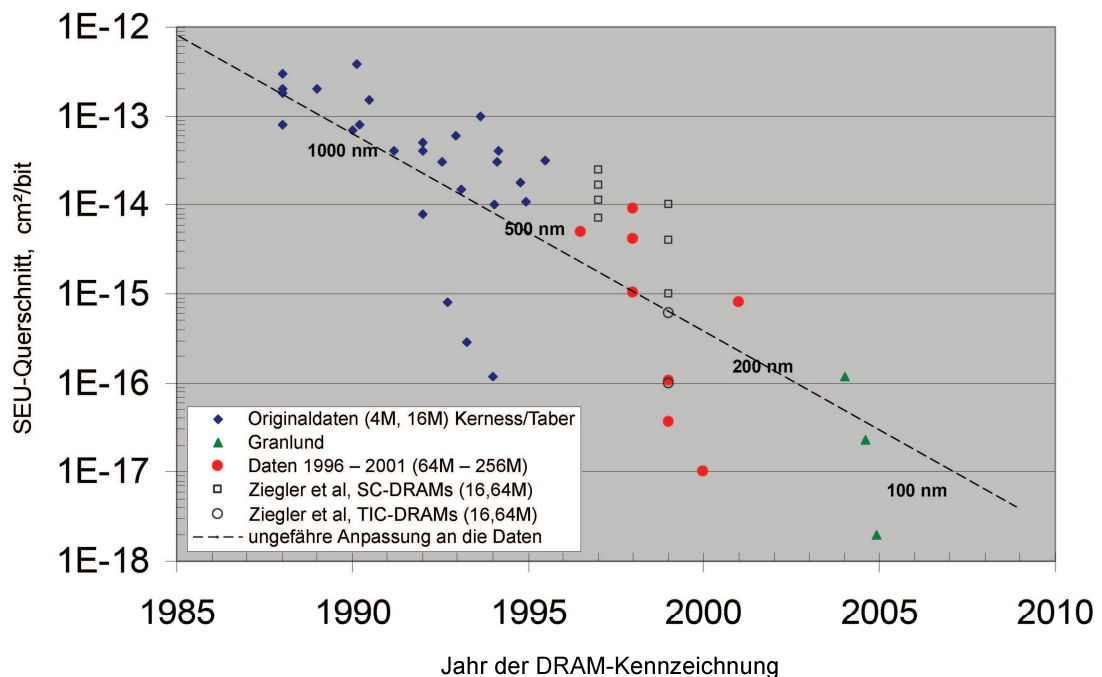


Bild 11 – SEU-Querschnitt in DRAMs in Abhängigkeit vom Herstellungsdatum

In Bild 11 ist eine ungefähre Trendlinie zusammen mit der ungefähren typischen Technologiegröße dargestellt. Die DRAM-Daten stammen aus mehreren Quellen, einschließlich der Daten für SC-DRAMs [82], [89], [90]. Diese Daten wurden modifiziert, um sie dem Format des Bildes anzupassen, weil die ursprünglichen Baumann-Kurven auf der Größe der DRAMs und nicht auf dem Herstellungsdatum beruhten. Der Hauptpunkt, der aus dieser Trendlinie abzuleiten ist, besteht darin, dass der SEU-Querschnitt je Bit die Verringerung fortsetzt, während die Größe des DRAMs ansteigt, was scheinbar im Zusammenhang mit der neuen DRAM-Technologie steht, die zur Erlangung höherer Speicherdichten entwickelt wurde.

Die meisten Anwendungen werden durch EDAC geschützt, also das Auftreten von SEUs in den DRAMs, die den Hauptspeicher bilden. Bei EDAC werden jedem Wort zusätzliche Bits hinzugefügt, um dem EDAC-System die Erkennung und Korrektur eines „umgekippten“ Bits zu ermöglichen. Es gibt jedoch auch noch weitere SEE-Wirkungen in DRAMs, die berücksichtigt werden sollten, nämlich ihre Empfindlichkeit gegen Störungen mehrerer Zellen (MCU), Festbits (einzelne schwere Fehler) und Funktionsunterbrechung durch Einzelereignis (SEFI). Die neuen größeren DRAMs scheinen für die ersten beiden dieser Wirkungen anfällig zu sein, jedoch sind die SEE-Querschnitte und deshalb auch die SEE-Raten klein im Vergleich zu SEU. Somit sollten diese Effekte bei zukünftigen Entwicklungen von DRAM-Konstruktionen berücksichtigt werden.

Wahrscheinlich ist MCU der Haupteffekt, der im Allgemeinen etwa 1 % bis 3 % der SEU-Rate beträgt. Jedoch kann sich der MCU-Anteil im Vergleich zu der SEU-Rate von einem DRAM zum nächsten stark unterscheiden und der Einfluss, den eine MCU in einem DRAM auf die Funktion einer Leiterplatte hat, kann wegen der Verteilung der Bits je Wort im DRAM auch sehr unterschiedlich sein. Das Verfahren, nach dem die Bits je Wort physikalisch im DRAM verteilt werden, weist zwischen den Verkäufern Unterschiede auf. Festbits können ein Problem darstellen, weil, wenn die Bits erst einmal fest sind, das SECDED-EDAC-Verfahren, welches Wörter schützt, nicht mehr für Wörter arbeitet, die derartige Bits enthalten. Die Schwankung des MCU-Anteils kann viel größer sein und hier ist Laserscreening von Nutzen, um die physikalische Lage der Bits und die relative Empfindlichkeit auf MCU anzugeben. Wenn es eine physikalische Trennung zwischen den Bits je Wort gibt, dann verringert dies die Empfindlichkeit für MBU in einem bestimmten Wort.

8.4 Berechnung von SEE-Raten in Luftfahrtausrüstungen

Auf der Grundlage der in Abschnitt 8 dargelegten und diskutierten SEE-Daten ist es offensichtlich, dass Einzelereignis-Effekte in der in Luftfahrtausrüstungen eingesetzten Elektronik ausgelöst werden können. In Abschnitt 8 wurden eine Reihe von SEE-Prüfungen diskutiert, die im Laboratorium mit Neutronen- und Protonenstrahlen durchgeführt und bei denen SEE-Querschnitte in Bauelementen der Mikroelektronik gemessen wurden. Weiterhin wurde eine begrenzte Anzahl von Daten tatsächlicher SEE-Raten veröffentlicht, die während des Fluges aufgezeichnet worden sind [5], [7], [38], [39], [40]. Das Ziel ist die Festlegung einer Methodik, um zu SEE-Raten für die in Luftfahrtausrüstungen eingesetzten mikroelektronischen Bauelemente aufgrund des Einflusses atmosphärischer Neutronen zu gelangen, sowie den Einfluss von Einzelereignis-Effekten auf vorhandene Luftfahrtausrüstungen zu bestimmen.

Die vereinfachte Methode zur Berechnung der SEE-Rate für einen bestimmten Effekt, wie in dieser Norm definiert, ist die Multiplikation des SEE-Querschnitts für diesen Effekt (Einheiten in cm^2) mit dem integrierten Neutronenfluss von $6\,000\text{ n/cm}^2$ (Energie $>10\text{ MeV}$). Dieser Fluss von $6\,000\text{ n/cm}^2$ ist ein Nennwert für eine Höhe von $40\,000\text{ ft}$ ($12,2\text{ km}$) und eine Breite von 45° , der für andere Höhen und Breiten (siehe Anhang D) und die Einflüsse durch Strahlungsausbrüche auf der Sonne, wie in 5.6 diskutiert, angepasst werden kann. Mit der vorstehend beschriebenen Umgebung kann die SEE-Rate berechnet werden mit:

$$\text{SEE-Rate je Bauelement-Stunde} = 6\,000\text{ (n/cm}^2\text{ je Stunde)} \times \text{SEE-Querschnitt [cm}^2\text{ je Bauelement]} \quad (4)$$

Neutronen $>10\text{ MeV}$ sind die dominierende Ursache für SEEs in empfindlichen Bauelementen mit einer geometrischen Kenngröße $>150\text{ nm}$; bei Bauelementen mit einer Kenngröße $\leq 150\text{ nm}$ kann der Beitrag von Neutronen mit einer Energie zwischen 1 MeV und 10 MeV bedeutsam sein. Daher muss bei der Berechnung des SEE-Beitrags für Teile mit einer geometrischen Kenngröße $\leq 150\text{ nm}$ ein Nennwert von $>1\text{ MeV}$ für den Neutronenfluss von $7\,200\text{ n/cm}^2$ je Stunde bei $40\,000\text{ ft}$ ($12,2\text{ km}$) und einer Breite von 45° verwendet werden. Dieser Wert kann auf andere Höhen und Breiten angepasst werden.

Bei der anderen Methode zur Berechnung der SEE-Rate wird der SEE-Querschnitt als Funktion der Energie (z. B. wie in Bild 8) mit dem Neutronenspektrum (wie in Bild 1) über alle Energien integriert. In der überwiegenden Mehrzahl der Fälle aber steht zwar der Spallationsneutronen-, z. B. WNR-SEE-Querschnitt für die Bauelemente zur Verfügung, nicht aber der Querschnitt in Abhängigkeit von der Energie. Beim Vergleich der berechneten SEU-Raten in sechs SRAMs ($0,5\text{ }\mu\text{m} < \text{Kenngröße} < 0,35\text{ }\mu\text{m}$), die auf der Integrationsmethode unter Verwendung des QARM-Neutronenspektrums beruhen [14], zeigen die mit der vereinfachten Methode nach dieser Norm ermittelten Raten eine gute Übereinstimmung mit den Raten nach der Integrationsmethode, sind aber um 50% höher und können nicht für kleinere Geometrien verwendet werden.

Die Rate für die Störung mehrerer Zellen (MCU) sollte für den EDAC-geschützten Speicher, der vorher identifiziert und aus den Betrachtungen für die SEU-Rate herausgenommen wurde, berechnet werden. Da sich der MCU-/SEU-Anteil mit abnehmender Baugröße und mit der RAM-Art so schnell verändert hat, wie in 6.2.3 beschrieben, sollte die MCU-Rate erst nach Berücksichtigung der in 6.2.3 gelieferten Angaben berechnet werden. Vereinfacht wird bei dieser MCU-Rate für den geschützten Speicher angenommen, dass die Störungen das EDAC-System umgehen und zu einem Fehler führen, der die LRU beeinträchtigen kann.

Für die Beantwortung dieser Fragen hinsichtlich der SEE-Raten und des Einflusses der SEE-Raten auf die Luftfahrtausrüstungen wird ein hierarchisches Vier-Ebenen-Verfahren vorgeschlagen, ausgehend von einer strengen Bewertung zu einer konservativen Obergrenzen-Bewertung. Die primären Ebenen umfassen die Prüfung spezifischer mikroelektronischer Bauelemente oder von Leiterplatten, hingegen umfasst die niedrigste Ebene die Anwendung vorhandener Daten von SEE-Querschnitten bis zum möglichen Ausmaß und deren Anwendung in konservativer Weise, was folglich das höchste Risiko mit sich bringt. Die Verfahren werden in den Abschnitten B.1 bis B.6 genauer beschrieben.

8.5 Berechnung der Verfügbarkeit der vollen Redundanz

Die meisten modernen Luftfahrtausrüstungen verwenden aktuelle Bauelemente der Elektronik mit eingebauten integrierten Schaltungen im Submikrometerbereich. Derartige Bauelemente können aufgrund der atmosphärischen Strahlung im Luftfahrzeug SEE-empfindlich sein. Das Ergebnis eines solchen SEEs ist die Erzeugung von Fehlern und Fehlzuständen in der Ausrüstung, die Auswirkungen auf die Funktionalität der

Ausrüstung haben können. Fehlertolerante Maßnahmen können, wie erforderlich, vorgesehen werden, um die Anforderungen an Luftfahrtsysteme für die höheren Konstruktionskategorien A bis C (siehe Abschnitt 7, Leitfaden für Systementwicklungen) zu erfüllen. Die Ausrüstung kann Verfahren zur Erkennung von Fehlern oder Fehlzuständen enthalten und eine gewisse Redundanz verwenden, um Auswirkungen auf die Funktion vorzubeugen. Das beeinträchtigte Element aber wird sich erst erholen, wenn die ursprüngliche SEE in irgendeiner Form korrigiert worden ist; während dieser Zeit fehlt die Zeit zur Wiederherstellung der vollen Redundanz [91]. Eine Korrektur kann durch einen regelmäßigen Prozess wie Datenbereinigung (Auffrischen nicht beschädigter Speicherdaten in festgelegten Abständen) vorgenommen werden oder man vertraut auf eine Korrektur bei Erkennung eines Fehlers oder Fehlzustands. Beispielsweise sei die Verfügbarkeit, A , eines Speicherblocks betrachtet. Wenn die mittlere Zeit bis zur Wiederherstellung t_{rec} ist, dann ist die mittlere Wiederherstellungsrate $\mu = 1/t_{\text{rec}}$, und wenn die mittlere Zeit der Fehlererzeugung durch SEE t_{SEE} ist, dann ist die mittlere SEE-Rate $\lambda = 1/t_{\text{SEE}}$. Die Verfügbarkeit der vollen Redundanz ist dann durch folgende Gleichung gegeben:

$$A = \mu / (\lambda + \mu) \quad (5)$$

Ist die Wiederherstellungsrate sehr viel höher als die SEE-Rate, so tendiert die Verfügbarkeit gegen 1, d. h. volle Verfügbarkeit. Die Systemverfügbarkeit wird für drei verschiedene SEE-Arten betrachtet:

- transiente Fehler oder Störungen (z. B. SEU, MCU) mit schneller Korrektur nach Auftreten des Ereignisses oder wenn die Daten erforderlich sind;
- feste Fehler und Fehlzustände (z. B. SEFI, nicht zerstörendes „Latch-up“), die andauern, bis die Stromversorgung des Bauelements aus- und wieder eingeschaltet wird. Wenn es keine Möglichkeit gibt, die Stromversorgung während des normalen Ausrüstungsbetriebs aus- und wieder einzuschalten, wird der Zustand bis zum Ende der Betriebsdauer andauern.
- schwere Fehler (z. B. Festbits und zerstörendes „Latch-up“), die bleibend sind und Instandhaltungsarbeiten an der Einheit erfordern. Diese Ereignisse werden in der gleichen Weise betrachtet wie alle anderen Bauelementefehler; siehe Abschnitt 7.

Die ersten beiden dieser SEE-Arten erfordern keine Instandhaltungsarbeiten, da sie ohne ein Eingreifen von außen beim nächsten Betrieb behoben sind. Beispiele für die Verfügbarkeit der vollen Redundanz bei den ersten beiden SEE-Arten werden nachfolgend angegeben.

8.5.1 SEU bei Fehlertoleranz und SET

Betrachtet wird eine SEU in einem SRAM mit eingebauter Fehlertoleranz wie z. B. EDAC, ECC oder Mehrfachzeichenfolgen (Redundanz) in Verbindung mit Mehrheitsbewertung. In diesen Fällen kann die Wiederherstellungszeit beim ECC oder der Redundanz mit Mehrheitsbewertung sehr kurz sein; bei Annahme einer Zeit von 1 ms beträgt die Wiederherstellungsrate $1/1\,000 = 1\,000\text{ s}^{-1}$, also 3,6 Mio. je Stunde. Bei einem SRAM mit benutzten Speicherstellen von 5 Mbit und einem SEU-Querschnitt zwischen $10^{-13}\text{ cm}^2/\text{Bit}$ und $10^{-14}\text{ cm}^2/\text{Bit}$ (siehe Bild 10) schwanken die entsprechenden SEU-Raten von 3×10^{-3} Störungen/Bauelement-Stunde bis 3×10^{-4} Störungen/Bauelement-Stunde. In diesem Beispiel ist die Wiederherstellungsrate um Größenordnungen höher als die SEU-Rate und die Verfügbarkeit nimmt daher einen Wert von nahezu 1 ein. Es würde keine bedeutsame Beeinträchtigung der Ausrüstungsverfügbarkeit geben, die aber wesentlich beeinträchtigt werden kann, wenn der Speicher sehr groß ist und die Datenbereinigung nicht in hinreichend kurzen Abständen durchgeführt wird.

Transienten durch Einzelereignis (SET) können bis zu 10 μs andauern, nach denen das Bauelement zum üblichen Betrieb zurückkehrt. Bei einer typischen Wiederherstellungszeit von 10 μs würde die Wiederherstellungsrate $1/10^{-5} = 100\,000\text{ s}^{-1}$ oder 3 600 Mio. h^{-1} betragen. Die SET-Rate während des Fluges schwankt bei einem Komparator oder Pulsbreitenmodulator von 10^{-7} Ereignissen/Bauelement-Stunde bis 2×10^{-5} Ereignissen/Bauelement-Stunde (siehe 8.2.2). In diesem Beispiel ist die Wiederherstellungsrate wieder um Größenordnungen höher als die SET-Rate und die Verfügbarkeit beträgt nahezu 1.