

**Entwicklung einer
Bewertungsgrundlage
für die Zuverlässigkeit
programmierbarer
und rechnerbasierter
Komponenten im
Kernkraftwerk bezüglich
Strahlungseinfluss**

Entwicklung einer Bewertungsgrundlage für die Zuverlässigkeit programmierbarer und rechnerbasierter Komponenten im Kernkraftwerk bezüglich Strahlungseinfluss

Stefanie Blum
Henriette Gatz
Manuela Jopen
Christian Lambertus
Dagmar Sommer

Juli 2019

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 4716R01352 wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Ausfallmechanismen, Auswertung, Bewertungsmethode, digitale Leittechnik, Elektrotechnik, programmierbare Komponenten, rechenbasierte Komponenten, Single Event Effects, Strahlungseffekte, Total Ionizing Dose, Zuverlässigkeit

Kurzfassung

Die zunehmende Verschlechterung der Ersatzteilversorgung für konventionelle nicht programmierbare oder rechnerbasierte elektro- und leittechnische Komponenten wird in den nächsten Jahren zu einem steigenden Einbau von rechnerbasierten oder programmierbaren Komponenten¹, sowohl in betrieblichen, als auch in sicherheitstechnisch wichtigen Systemen führen. Daher werden im vorliegenden Bericht die Auswirkungen von Strahlung auf programmierbare- und rechnerbasierte Bauteile, die auf Halbleitertechnik basieren, betrachtet.

Die Betriebserfahrung unterhalb der Meldeschwelle aus deutschen Kernkraftwerken, die aus Vorgängervorhaben vorliegt, wurde in Bezug auf Strahlungseinwirkung auf diese Bauteile ausgewertet. Weiterhin wurde eine Recherche internationaler Betriebserfahrung aus diversen Bereichen, u. a. der Luft- und Raumfahrt, durchgeführt.

¹ Programmierbare Geräte bestehen aus mindestens einem diskreten programmierbaren Bauteil, rechnerbasierte Geräte, bestehen aus mindestens einem Prozessor. (SiAnf, KTA 3501)

Abstract

The increasing deterioration in the supply of spare parts for conventional (non-software-based) electrical and instrumentation and control components will lead to an increased installation of computer-based or programmable components both in operational and in safety-related systems in the upcoming years. This report analyzes the effects of radiation on programmable and computer-based components based on semiconductor technology.

The operating experience below the reporting criteria from German nuclear power plants known from previous projects was evaluated with respect to radiation effects on components. Furthermore, a research of international operating experience from various other fields, e. g. of the aerospace industry, was carried out.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Strahlungsumgebung	3
2.1.1	Natürliche Hintergrundstrahlung: kosmisch und terrestrisch	3
2.1.2	¹⁰ B-Problematik	4
2.1.3	Strahlungsumgebung im Kernkraftwerk	5
2.2	Charakterisierende Größen	11
2.2.1	Linear Energy Transfer (LET)	12
2.2.2	Wirkungsquerschnitt	13
2.2.3	Kritische Ladung	14
2.2.4	Zusammenhang zwischen den charakterisierenden Größen und der Soft-Error-Rate	16
3	Aufbau und Funktion verschiedener Halbleiterbauteile	19
3.1	Grundlagen zum MOS-Transistor	19
3.2	Random Access Memory (RAM)	24
3.3	Bistabile Kippstufe (Flipflop)	24
3.4	Inverter	25
3.5	Static Random-Access Memory (SRAM)	26
3.6	Dynamic Random Access Memory (DRAM)	28
3.7	Flash-Speicher	29
3.8	Field Programmable Gate Array (FPGA)	31
3.9	Zusammenfassung	33
4	Strahlungsinduzierte Effekte auf Halbleiterbauteile	35
4.1	Einleitung	35
4.2	Single Event Effects (SEE)	35

4.2.1	Permanente Fehlermodi (Hard Errors)	36
4.2.2	Temporäre Fehlermodi (Soft Errors).....	41
4.2.3	SEE-Abhängigkeit vom Schaltkreistyp und beeinflussende Größen	43
4.3	Total Ionizing Dose (TID).....	45
4.3.1	TID-Effekte in MOS-Transistoren	46
4.4	Versetzungsschäden.....	47
4.5	Total Non-Ionizing Dose (TNID)	49
4.6	Strahlungseffekte bei Speicherbausteinen und Mitigationsmöglichkeiten .	50
4.6.1	Strahlungseffekte bei SRAM- und DRAM-Speichern	50
4.6.2	Strahlungseffekte bei Flash-Speichern	50
4.6.3	Fehlerkorrektur bei Speicherelementen.....	51
4.6.4	Strahlungseffekte bei FPGAs	52
4.6.5	Zusammenfassung.....	53
5	Laboruntersuchungen und Simulationen.....	55
5.1	Laboruntersuchungen und Testmethoden	55
5.1.1	Bestrahlungsexperimente mit Schwerionen, Protonen und Neutronen	55
5.1.2	Messungen mit fokussierten, gepulste Laserstrahlen	55
5.1.3	Fehlerinjektionsverfahren	56
5.1.4	Internationale Datenbanken	57
5.2	Simulationen	58
5.3	Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) und Transport of Ions in Matter (TRIM).....	58
5.4	Zusammenfassung.....	62
6	Standards.....	63
6.1	Deutsches Regelwerk	63
6.1.1	Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke.....	63
6.1.2	Detailliertere Anforderungen hierzu finden sich in den Regeln des KTA.KTA-Regel 3505 „Typprüfung von Messwertgebern und Messumformern der Sicherheitsleittechnik“	64

6.2	Internationale Standards	67
6.2.1	ECSS-Standards im Rahmen der Europäische Kooperation für Raumfahrtnormung	67
6.2.2	Standards der Vereinigung für Festkörpertechnologie (JEDEC-Standards)	69
6.2.3	Amerikanische Militärstandards (MIL).....	69
6.2.4	Standards der Amerikanischen Gesellschaft für Prüfung und Materialien (ASTM International Standards)	70
6.2.5	Vergleich internationaler Standards.....	71
6.3	Zusammenfassung.....	74
7	Auswertung der Betriebserfahrung	75
7.1	Auswertung der nationalen Betriebserfahrung.....	75
7.1.1	Auswertung der Daten aus den Vorläuferprojekten	75
7.1.2	Erkenntnisse aus der Industrie	78
7.1.3	Zusammenfassung.....	81
7.2	Auswertung der internationalen Betriebserfahrung außerhalb der Kerntechnik	81
7.2.1	Raumfahrt	81
7.2.2	Luftfahrt.....	87
7.2.3	Medizintechnik	98
7.2.4	Ereignisse aus der kommerziellen Halbleitertechnologie	103
7.2.5	Fazit zur Auswertung der internationalen Betriebserfahrung	105
8	Basis einer Bewertungsmethode für SEE und TID	107
8.1	Einleitung	107
8.2	Basis Bewertungsmethode für SEE.....	111
8.2.1	Bewertungsmethode auf System-/ Komponenten-/ Betriebsmittelebene	112
8.2.2	Bewertungsmethode auf Bauteilebene	115
8.3	Basis Bewertungsmethode für TID	117
8.4	Zusammenfassung.....	119
9	Fazit.....	121

Abkürzungsverzeichnis	123
Literaturverzeichnis	127
Abbildungsverzeichnis	139

1 Einleitung

Die zunehmende Verschlechterung der Ersatzteilversorgung für konventionelle (nicht software-basierte) elektro- und leittechnische Komponenten wird in den nächsten Jahren zu einem steigenden Einbau von rechnerbasierten oder programmierbaren Komponenten sowohl in betrieblichen als auch in sicherheitstechnisch wichtigen Systemen der Elektro- und Leittechnik von Kernkraftwerken führen. Daher werden im vorliegenden Bericht die Auswirkungen von ionisierender Strahlung auf programmierbare und rechnerbasierte Bauteile², die auf Halbleitertechnik basieren, betrachtet. Den Anstoß dazu gab die aus den Vorgängerprojekten 3610R01361 und 3610R01363 der GRS hervorgegangene Erkenntnis, dass betriebliche Messinstrumente im dort betrachteten Zeitraum von 2002 bis 2010 aufgrund von Strahlungseinwirkung im Kontrollbereich deutscher Kernkraftwerke ausgefallen waren. Da es sich hierbei um nicht sicherheitsrelevante Messinstrumente handelte, waren diese Ereignisse nicht meldepflichtig im Sinne der Atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung (AtSMV). Gleichwohl machten diese Schadensmeldungen auf den Umstand aufmerksam, dass die ausgetauschten Komponenten mit programmierbaren oder rechnerbasierten Bauteilen bestückt waren, die im ursprünglichen Aufbau nicht vorgesehen waren. Im Zuge der Weiterentwicklung von Messinstrumenten und Leittechniksystemen im Allgemeinen ist von einem vermehrten Einsatz von programmierbaren und rechnerbasierten Bauteilen, möglicherweise auch in sicherheitsrelevanten Systemen, auszugehen, die im Kernkraftwerk einer mehr oder weniger starken Belastung durch Strahlung ausgesetzt sein können.

Die Auswirkung von Strahlung auf programmierbare und rechnerbasierte Bauteile ist sehr vielfältig und wird besonders im Bereich der Luft- und Raumfahrt intensiv erforscht. Es gibt daher eine große Anzahl verschiedener Standards und Testmethoden aus diesem Anwendungsbereich, deren Herangehensweise einen Ansatz für die Bewertung dieser Komponenten zum Einsatz in einer kerntechnischen Anlage bilden können.

² Programmierbare Geräte bestehen aus mindestens einem diskreten programmierbaren Bauteil, rechnerbasierte Geräte, bestehen aus mindestens einem Prozessor. (SiAnf, KTA 3501)

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden theoretische Grundlagen zu Strahlungsquellen und zur Strahlungsumgebung von Bauteilen im Kernkraftwerk sowie zu relevanten Effekten von Strahlung auf diese Bauteile gegeben.

2.1 Strahlungsumgebung

Halbleiterbasierte Bauteile sind je nach Einsatzort einer Vielzahl von Strahlungsquellen ausgesetzt. Die thematisch wichtigsten Strahlungsquellen für die Betrachtungen in diesem Bericht sind im Folgenden dargestellt.

2.1.1 Natürliche Hintergrundstrahlung: kosmisch und terrestrisch

In unserem alltäglichen Leben sind wir von natürlicher Strahlung umgeben. Hierbei unterscheidet man zwischen kosmischer und terrestrischer Strahlung.

Kosmische Strahlung erreicht uns aus dem Weltall. Primäre, hochenergetische Teilchen aus dem Weltall mit einer Zusammensetzung aus hauptsächlich Protonen (89 %), Heliumkernen (10 %) und schwereren Kernen (1 %) treffen auf die Erdatmosphäre. Dort erzeugen sie mehrere Teilchen, hauptsächlich Neutronen, Protonen und Pionen³. Diese Sekundärteilchen verursachen weitere Reaktionen, so dass es zu einem Teilchenschauer auf die Erde kommt. Dieser besteht aus einer elektromagnetischen Komponente, ausgelöst durch den Zerfall von neutralen Pionen, und einer hadronischen⁴ Komponente, die durch Neutronen, Protonen und die geladenen Pionen gebildet wird. Eine weitere Komponente bilden die Myonen⁵, welche aus dem Zerfall geladener Pionen entstehen und aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit den Erdboden erreichen können, obwohl ihre Lebensdauer sehr gering ist. /CER 19/

³ Instabiles, subatomares Teilchen bestehend aus einem Quark-Antiquark Paar.

⁴ Hadronen sind subatomare Teilchen, die durch die starke Wechselwirkung zusammengehalten werden, hierzu zählen auch Neutron und Proton (Baryonen aus u- und d-Quarks mit Spin 1/2).

⁵ Myonen sind Elementarteilchen, die der elektroschwachen, jedoch nicht der starken Wechselwirkung unterliegen. Das Myon besitzt eine negative Elementarladung und Spin 1/2 und zerfällt nach einer mittleren Lebensdauer von 2,2 μs .

Die Erde selbst ist Quelle der terrestrischen Strahlung. Radioaktive Stoffe (einschließlich Uran, Thorium und Radium) sind auf natürliche Weise im Boden und im Gestein vorhanden. Die Luft enthält Radon, darüber hinaus enthält Wasser geringe Mengen an gelöstem Uran und Thorium, und alle organischen Stoffe (sowohl Pflanzen als auch Tiere) enthalten radioaktiven Kohlenstoff und Kalium. Einige dieser Materialien werden mit Nahrung und Wasser aufgenommen, während andere (z. B. Radon) eingeatmet werden. /NRC 17/

Die Dosis aus terrestrischen Quellen variiert in verschiedenen Teilen der Welt. Die natürliche kosmische Strahlungsbelastung ist stark an Höhenunterschiede, atmosphärische Bedingungen und das Magnetfeld der Erde gekoppelt.

2.1.2 ¹⁰B-Problematik

Eine weitere bedeutende Quelle ionisierender Partikel in Halbleiterbauteilen ist eine Reaktion, die durch die Wechselwirkung von Neutronen mit Bor induziert wird. ¹⁰B wird häufig als p-Dotierung in Halbleitern verwendet. Neutronen reagieren mit ¹⁰B-Dotierungen in Silizium und erzeugen dabei Alpha-Partikel. Der Wirkungsquerschnitt für die Reaktion von Neutronen mit ¹⁰B korreliert mit $1/\sqrt{E}$, wobei E die Energie des Neutrons ist. Somit ist der Wirkungsquerschnitt besonders bei thermischen Neutronen hoch. /WAN 08/

Bor kommt in den zwei stabilen Isotopen ¹⁰B und ¹¹B vor, von denen ¹⁰B einen großen Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen besitzt und damit zu Kernreaktionen mit Neutronen neigt, siehe Abb. 2.1. In der ¹⁰B(n; α) – Li – Reaktion wird der Lithium-Kern mit einer kinetischen Energie von 0,84 MeV zu 94 % und mit 1,014 MeV zu 6 % emittiert /WAN 08/. Die emittierten Alpha-Teilchen führen zu unerwünschten Effekten, z. B. Single Event Effects⁶, in Halbleiterkomponenten, so dass eine immer reinere Herstellung der verwendeten Materialien mit geringerem ¹⁰B-Anteil angestrebt wird. /WAN 08/

¹⁰B ist Bestandteil von Borphosphorsilicatglas (BPSG)-Isolationsschichten und ein häufig verwendetes Dotiermaterial in Halbleitern, wodurch diese besonders empfindlich für thermische

⁶ Single Event Effects (SEE) ist der Oberbegriff für Effekte, die durch ein einzelnes, energetisches Teilchen verursacht werden und in Kapitel 4.2 näher beschrieben werden. Ein SEE ist eine Störung des normalen Betriebs einer Schaltung, die durch den Durchgang eines einzelnen ionisierenden Teilchens durch oder in der Nähe eines empfindlichen Knotens in einer Schaltung verursacht wird. SEEs können destruktiv sein.

Neutronen werden. Der Absorptionsquerschnitt von ^{10}B ist 100- bis 100.000-mal größer als der anderen Materialien in Halbleiterbauteilen. Die Reaktionsprodukte sind in der Lage, Elektron-Loch-Paare im Silizium zu bilden und Single Event Effects auszulösen. /ARM 03/

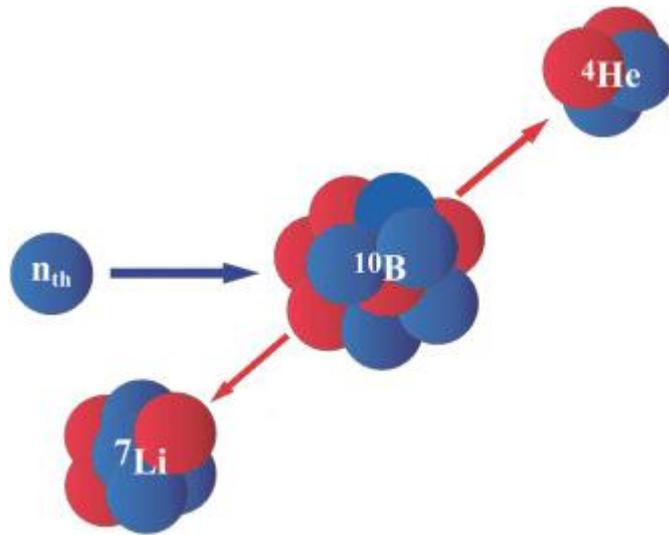


Abb. 2.1 Schematische Darstellung der Kernspaltungsreaktion eines Bor-Neutroneneinfangs, wobei ein ^{10}B -Atom ein thermisches Neutron einfängt und spontan zerfällt, wodurch die Spaltprodukte ^4He (α -Teilchen) und ^7Li entstehen /LAN 16/

2.1.3 Strahlungsumgebung im Kernkraftwerk

Natürliche Hintergrundstrahlung spielt im Kernkraftwerk eine untergeordnete Rolle. Für den wesentlichen Strahlungsanteil sind der Kern und aktivierte Materialien bzw. Komponenten verantwortlich.

Grundsätzlich sind drei verschiedene Strahlungsumgebungen im Kernkraftwerk zu unterscheiden /HOL 02/:

- Vom Reaktorkern bis zum biologischen Schild,
- der Sicherheitsbehälter im Normalbetrieb bzw. anormalen Betrieb und
- der Sicherheitsbehälter unter Störfallbedingungen.

Zum Schutz vor Direktstrahlung aus dem Reaktorkern werden wie zur Rückhaltung der Radioaktivität mehrere Barrieren eingesetzt. Dies sind beispielsweise eine ca. 2 m starke Betonabschirmung und die ca. 25 cm starke Reaktordruckbehälterwandung. Im Wesentlichen zu

betrachten sind dabei die Abschirmung der durch die Spalt- und Zerfallsprozesse entstehenden Neutronen- und Gammastrahlung. Von den im Kernkraftwerk vorkommenden Strahlungsarten sind diese als die relevanten anzusehen, da Gammastrahlung eine hohe Reichweite aufweist und Neutronenstrahlung, da einige Materialien eine hohe Reaktionsrate mit Neutronen besitzen (siehe Kapitel 2.2.2). Die im Kernkraftwerk auftretende Alpha- und Betastrahlung werden durch die druckführende Umschließung und ihre geringe Reichweite abgeschirmt.

Die Halbwertsdicken in Abhängigkeit von der Energie der Neutronen werden in Tab. 2.1 gezeigt. In Beton ist die Reichweite der schnellen Neutronen wesentlich größer als die der thermischen, weshalb es ausreicht bei der Bemessung der Abschirmung nur die Reichweite der schnellen Neutronen zu betrachten

Die Flussdichte der schnellen Neutronen nimmt nach der Rate-zu-Dosis-Beziehung entsprechend der Dosisleistung, auf die sich die Halbwertsdicken beziehen, wie folgt ab:

$$\dot{D} = \phi \cdot \left(-\frac{dE}{\rho dx} \right) \quad (2.1)$$

\dot{D} Dosisrate in Gy,

ϕ Neutronenflussdichte in $1/\text{cm}^2/\text{s}$,

ρ Materialdichte in kg/qm .

Tab. 2.1 Halbwertsdicken einiger Materialien für Neutronenstrahlung unterschiedlich Neutronenenergien /MET 05/

	Abschirmmaterial [Halbwertsdicke in cm]		
n-Energie [MeV]	Wasser	Normalbeton	Schwerbeton
0,14	2,6	4,8	3,4
0,78	2,7	5,4	3,9
2,34	5,3	9,0	7,2

Damit verringert sich die Neutronenflussdichte in einfacher Betrachtung um die Hälfte nach Durchdringen einer Halbwertsdicke. Außerhalb einer Betonabschirmung von ca. 2 m um den Reaktordruckbehälter folgt damit ein zu erwartender Neutronenfluss der um mehrere Größenordnungen kleiner als die im Reaktor vorherrschenden Flussdichten von $10^{12} - 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ für thermische und $10^{10} - 10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ für schnelle Neutronen ist /HOL 02/. Unter Störfallbedingungen kann sich dieser Wert im Reaktorsicherheitsbehälter allerdings erhöhen. Letztlich sind für eine genaue Aussage zum Fehlverhalten von Halbleiterbauteilen aufgrund von thermischer Neutronenstrahlung im Reaktorsicherheitsbehälter genaue Werte der Neutronenflussdichte notwendig, sowohl für den Normalbetrieb als auch für Störfallbedingungen. Unter der Annahme von Barrierschäden ist von einem erheblich erhöhten Neutronenfluss auszugehen.

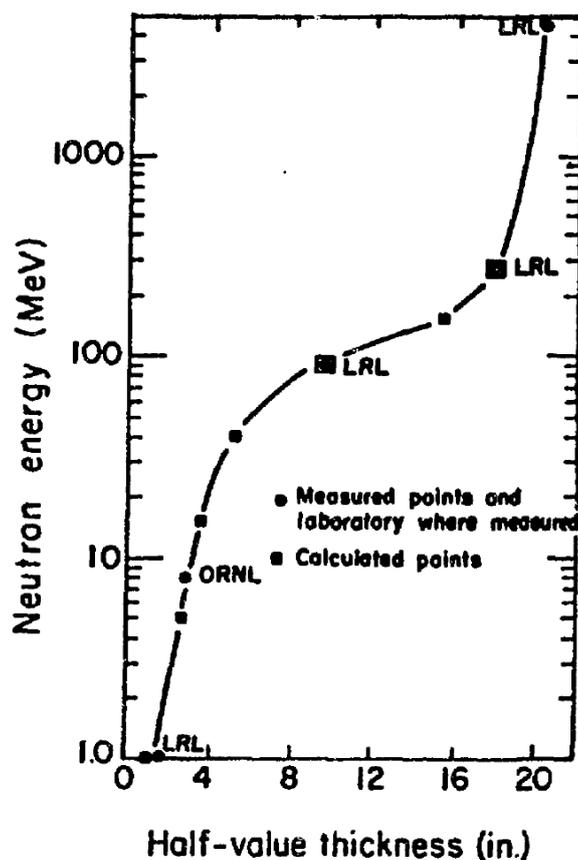


Abb. 2.2 Halbwertsdicke von Neutronen in Beton für verschiedenen Energien (ORNL – Oak Ridge National Laboratory, LRL - Lunar Receiving Laboratory) /BUT 73/

Neben Neutronen ist zudem die aus den Kernreaktionen im Reaktor entstehende Gamma-Strahlung zu betrachten. Tab. 2.2 zeigt beispielhaft die Halbwertsdicken für Photonen in verschiedenen Materialien:

Tab. 2.2 Halbwertsdicken einiger Materialien für γ -Strahlung unterschiedlicher γ -Energien /MET 05/

	Abschirmmaterial [Halbwertsdicke in cm]		
γ -Energie [MeV]	Wasser	Normalbeton	Blei
0,5	7,2	3,4	0,42
1,0	9,9	4,7	0,89
1,5	12,0	5,7	1,20
2,0	14,0	6,6	1,30
6,0	21,5	Abschätzung: 10	1,40

Photonen treten auf verschiedene Arten mit Materie in Wechselwirkung. Wichtig im Zusammenhang mit der Schädigung von elektronischen Halbleiterkomponenten sind folgende Phänomene /NIST 10/, /CHA 99/:

- **Photoeffekt:** Lösen eines Elektrons aus der Atomhülle.
- **Compton-Streuung:** Photonenstreuung an einem Teilchen, verbunden mit Energieübertrag an den Wechselwirkungspartner und Verringerung der Wellenlänge des eintreffenden Photons.
- **Paarbildung:** Erzeugung eines Elektron-Positron-Paares.
- **Kernphotoeffekt:** Energieübertrag des eintreffenden Photons auf Nukleonen und deren Lösung aus dem Kern.

Die Art der Wechselwirkung hängt im wesentlichen von der Energie des Photons und der Dichte des Target-Materials⁷ ab. Dabei nimmt die Intensität mit der Eindringtiefe exponentiell wie folgt ab:

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\mu x) \quad (2.2)$$

I Intensität $\frac{W}{\text{cm}^2}$,

μ Massenschwächungskoeffizient $\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$,

x Massenbelegung $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$,

I_0 Eingangintensität $\frac{W}{\text{cm}^2}$.

Der Massenschwächungskoeffizient μ lässt sich über die Summe der Gesamtwirkungsquerschnitte der durch Photonen hervorgerufenen Prozesse wie folgt beschreiben:

$$\mu = \frac{N_A}{A} \cdot \sigma_{\text{tot}} \quad (2.3)$$

N_A Avogadro-Konstante mol^{-1} ,

A molare Masse $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$,

σ_{tot} Gesamtwirkungsquerschnitt b.

Der Gesamtwirkungsquerschnitt ist die Summe aller Wirkungsquerschnitte der oben genannten Einzelprozesse:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{photo}} + \sigma_{\text{comp}} + \sigma_{\text{paar,el}} + \sigma_{\text{paar,kern}} + \sigma_{\text{kern}}. \quad (2.4)$$

⁷ Als „Target“ bezeichnet man in der Physik die Materie, die (beispielsweise bei Beschleunigerexperimenten) einem Teilchenstrahl ausgesetzt wird.

Zur Schädigung von Halbleiterbauelementen tragen Reaktionen bei, deren Produkte direkt oder indirekt ionisieren, also Elektron-Loch-Paare im Halbleitermaterial bilden. Die aus der Wechselwirkung mit Materie hervorgerufenen Teilchen können in der Folge ebenso Ionisierung hervorrufen wie Direktstrahlung. Abb. 2.3 zeigt die Wirkungsquerschnitte für Photonen in Silizium. Für die in einem Kernkraftwerk relevanten Photonenenergien von bis zu 6 MeV erkennt man, dass vor allem der Photoeffekt und die Compton-Streuung eine wesentliche Rolle spielen. /NIST 10/

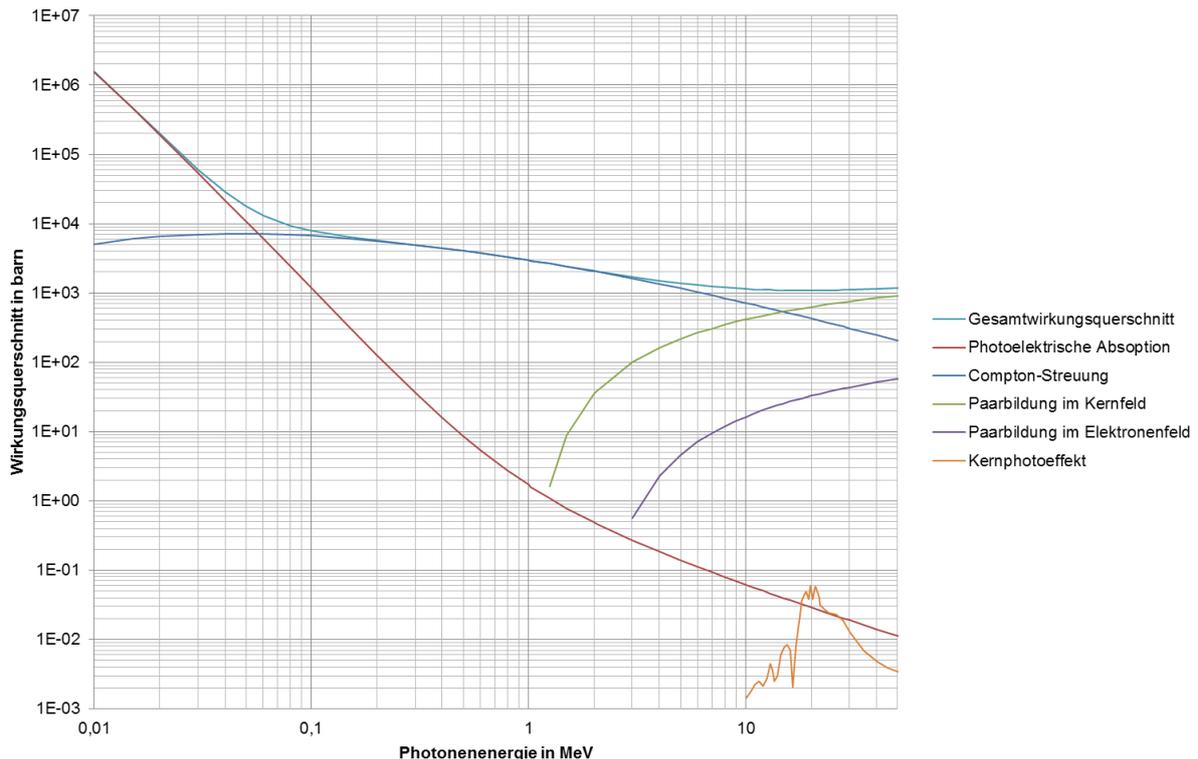


Abb. 2.3 Wirkungsquerschnitte für Photonen in Silizium /NIST 10/

Die Paarbildung im Kernfeld liefert für Energie ab ca. 1,25 MeV den zweitgrößten Beitrag, während die Paarbildung im Elektronenfeld eine eher untergeordnete Rolle spielt. Für die in einem Kernkraftwerk zu erwartenden Photonenenergien tritt der Kernphotoeffekt nicht auf. /CHA 99/

Durch den Compton-Effekt wird ein Prozess beschrieben, bei dem ein eintreffendes Photon einen Teil seiner Energie auf ein quasifreies Elektron überträgt. Die übertragene Energie hängt

vom Austrittswinkel des Photons und Elektrons ab. Formal wird die Compton-Streuung folgendermaßen beschrieben /NIST 10/:

$$E'_{\text{el}}(\theta) = E_{\text{ph}} - E'_{\text{ph}}(\theta) = E_{\text{ph}} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{E_{\text{ph}}}{m_e c^2} (1 - \cos(\theta))} \right) \quad (2.5)$$

E'_{el} Energie des Elektrons vor dem Stoß,

E_{ph} Energie des Photons vor dem Stoß,

E'_{ph} Energie des Photons nach dem Stoß,

m_e Masse eines Elektrons,

c Lichtgeschwindigkeit,

θ Streuwinkel des Elektrons.

Die Gesamtheit der hier beschriebenen Effekte führt in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Intensität zur Schädigung in programmierbaren oder rechnerbasierten Komponenten im Kernkraftwerk, insbesondere wenn Halbleiterbauteile in den Komponenten verwendet werden und diese zudem mit ^{10}B dotiert sind. Zum Verständnis dieser Schädigungsphänomene dienen in den folgenden Kapiteln eine Beschreibung der charakterisierenden Größen und in Kapitel 3 eine Übersicht typischer Halbleiterbauteile, die in verschiedenen Komponenten zur Anwendung kommen.

2.2 Charakterisierende Größen

In diesem Kapitel wird eine Auswahl charakterisierende Größen zum Verständnis der Schadensmechanismen der Single Event Effects und der Total Ionizing Dose vorgestellt. Wichtige physikalische Größen, von denen diese Schadenseffekte abhängig sind, werden in diesem Kapitel eingeführt und die Abhängigkeiten dargestellt.

2.2.1 Linear Energy Transfer (LET)

Durch die Größe LET wird der Energieverlust durch Ionisierung eines Teilchens je Einheitslänge und Dichte beim Durchgang von Materie beschrieben. Die Einheit ist $\text{MeV cm}^2/\text{mg}$. Der LET-Wert ist ein wichtiger Parameter um die Sensitivität einer Halbleiter-Komponente bezüglich Strahlungseinfluss zu quantifizieren. So lässt sich mittels des LET die Anzahl der durch Ionisierung entstandenen Elektron-Loch-Paare berechnen. Im Durchschnitt werden 3,6 eV benötigt, um ein Elektron-Loch-Paar in Silizium zu bilden. Die Bildung von Elektron-Loch-Paaren ist problematisch, da freie Ladungsträger im Halbleiter entstehen, die zu Störströmen führen können. In Abb. 2.4 ist zu erkennen, dass der LET-Wert von der jeweiligen Energie des durchtretenden Teilchens abhängt. Beim Durchgang eines Teilchens muss insbesondere bei der Abschirmung darauf geachtet werden, dass der LET-Wert nicht gerade dann maximal ist, wenn das Teilchen die sensitiven Orte der Komponente erreicht. Der Fall eines auftreffenden Neutrons auf ein Siliziumtarget wird in Abb. 2.4 gezeigt. Dort wird der Zusammenhang zwischen Energie der Teilchen, die als Reaktionsprodukt aus der Reaktion eines Neutrons mit Silizium entstehen können, und LET in Silizium dargestellt. Dabei zeigt sich insbesondere für Natrium und Silizium ein gut zu erkennender Bragg-Peak. /NIC 11/

Zunächst steigt der LET mit der Teilchenenergie bis zu einem Wert, dem Bragg-Peak, um danach mit steigender Teilchenenergie wieder zu fallen. Für das Reaktionsprodukt Silizium liegt der höchste Bragg-Peak bei ca. $15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$. Dieser Wert kann als grobes Kriterium für die Strahlenresistenz bezüglich Neutronenstrahlung einer Halbleiter-Komponente betrachtet werden. Für alle Werte $\text{LET}_{\text{th}} < 15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ wäre diese somit resistent gegen Neutronenstrahlung, sofern bei Versuchen mit diesem Wert kein Ausfall des Bauteils festgestellt wird.

Dieser Ansatz kann unzutreffend sein, falls schwerere Reaktionsprodukte ins Silizium gelangen können, beispielsweise durch angrenzendes Elektrodenmaterial wie Kupfer oder Wolfram. /NIC 11/ Die genannten LET-Werte liegen oberhalb der im Kernkraftwerk auftretenden Werte für die Neutronenstrahlung. Die weltweiten Tests beziehen sich nicht auf die ausschließliche Anwendung im Kernkraftwerk, sondern auch auf den Einsatz in der Luft- und Raumfahrttechnik sowie beim Militär.

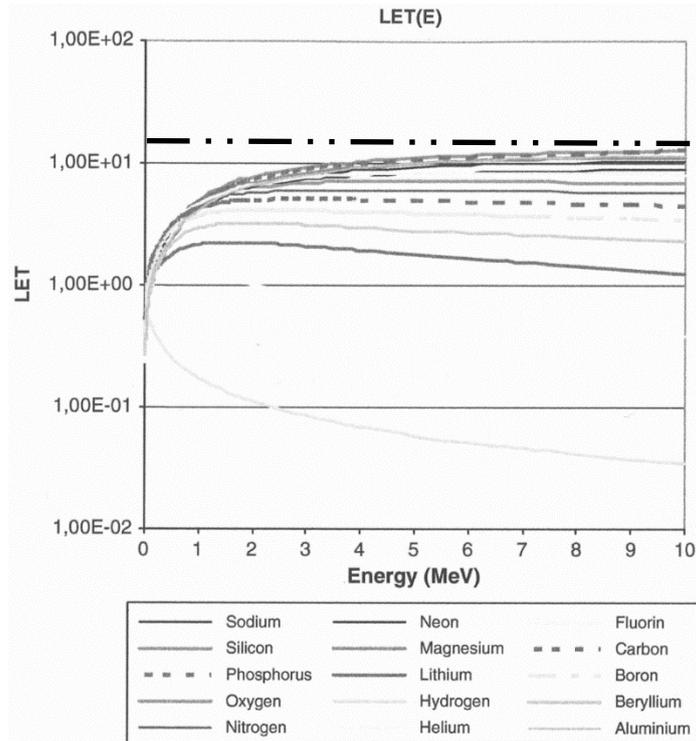


Abb. 2.4 LET(E) in $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ für verschiedene Reaktionsprodukte in Silizium ($E < 10 \text{ MeV}$) /NIC 11/ Die schwarze Linie (— · — · —) zeigt etwa den LET_{th} von $15 \text{ MeV cm}^2/\text{mg}$

2.2.2 Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt σ ist in der Physik ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass ein einfallendes Teilchen mit einem anderen Teilchen („Target“) wechselwirkt (z. B. durch Absorption oder Streuung). Dabei unterscheiden sich jedoch die grundlegenden Konzepte und Interpretationen in Abhängigkeit der Strahlungssituation. Man muss zwei Fälle unterscheiden: zum einen den Effekt der Ionisierung der durch Kernreaktion im Silizium entstehenden Teilchen (sekundär), und zum anderen die direkte Ionisierung der eintreffenden Teilchen (primär). /PET 11/

Die Gleichung für den Wirkungsquerschnitt korrespondiert zu der für einen breiten, gerichteten Partikelstrom in der Teilchenphysik. Der Wirkungsquerschnitt ist:

$$\sigma = \frac{N}{F} \quad (2.6)$$

Die Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis auf dem Chip ist durch σ mit der Einheit cm^2 gegeben. N gibt die Anzahl der Ereignisse an und F die Fluenz in Teilchen/ cm^2 . Wird der Wirkungsquerschnitt je Bit gesucht, wird der Gesamtwirkungsquerschnitt durch die Anzahl der Bits auf dem Chip M geteilt:

$$\sigma = \frac{N}{F \times M} \quad (2.7)$$

Dabei ist zu beachten, dass bei dieser Betrachtungsweise keine Winkelabhängigkeit berücksichtigt wird und von einem breiten, gleichmäßigen Teilchenstrom ausgegangen werden muss.
/PET 11/

2.2.3 Kritische Ladung

Über das Konzept der kritischen Ladung wird die Sensitivität einer Komponente bezüglich Strahlungseinfluss bestimmt und es spielt für alle Arten von Single Events eine wichtige Rolle. Es handelt sich um die akkumulierte Ladungsmenge, die notwendig ist, um ein Single-Event auszulösen. Das Konzept der kritischen Ladung wird im Folgenden kurz zusammengefasst.

Kritische Ladung und LET-Schwellwert

Üblicherweise wird angenommen, dass die kritische Ladung über den komponentenspezifischen Zusammenhang des LET und des Wirkungsquerschnittes bestimmt wird. Der Zusammenhang zwischen LET und SEE-Wirkungsquerschnitt σ ist in Abb. 2.4 grafisch dargestellt.

Dargestellt sind Messwerte (schwarze Punkte) und ein Weibull-Fit nach:

$$\sigma = \sigma_{\text{sat}} \left(1 - \exp\left(\frac{LET - LET_{\text{th}}}{W}\right)^S \right) \quad (2.8)$$

W und S sind Parameter des Fits. /POL 17/

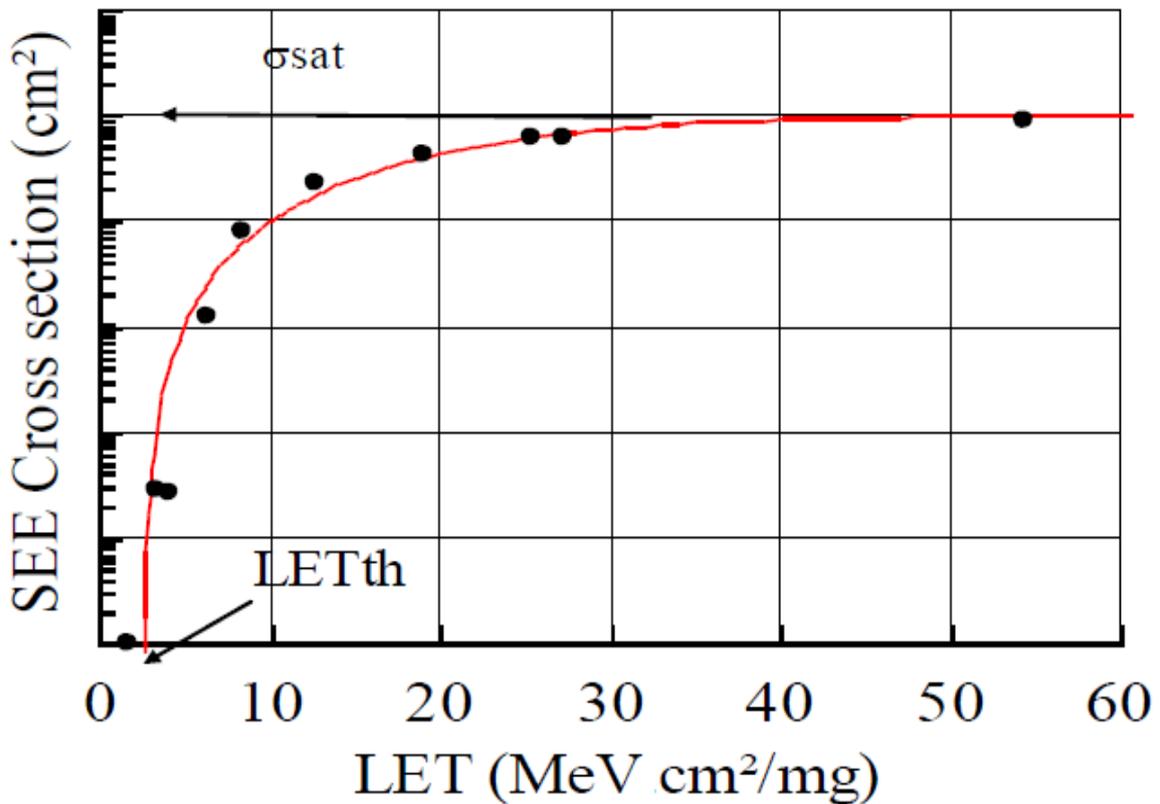


Abb. 2.5 Beispiel für den Zusammenhang von Wirkungsquerschnitt und LET als Messung (schwarze Punkte) und Weibull-Fit (rot) /POL 17/

Hier erkennt man, dass ab einem bestimmten Wert des LET die Reaktionswahrscheinlichkeit bzw. der Wirkungsquerschnitt stark ansteigt.

Beim Wert LET_{th} handelt es sich um den LET-Schwellenwert.

Die kritische Ladung Q_{krit} berechnet sich mit LET_{th} als LET-Schwellenwert:

$$Q_{krit} = \frac{LET_{th} T d e}{X} \quad (2.9)$$

T : Bauteildicke

d : Materialdichte (2,32 g/cm³ für Si; 5,32 g/cm³ für GaAs)

e : Elementarladung (1.602x10⁻⁷pC)

X : Energie, die benötigt wird, um ein Elektronen – Loch – Paar zu erzeugen (3,6 eV in Si)

2.2.4 Zusammenhang zwischen den charakterisierenden Größen und der Soft-Error-Rate

In Abb. 2.5 werden die zuvor beschriebenen Größen mit Berücksichtigung ihrer Abhängigkeiten untereinander zusammengefasst und mit der Soft-Error-Rate (SER) in Bezug gesetzt. Eintreffender Primärstrahlung können somit die Größen Masse m , Ladung q , Energie E und die Flussdichte Φ zugeordnet werden. Tritt diese so charakterisierte Strahlung auf ein Halbleiterbauteil, treten abhängig von den charakterisierenden Größen des Bauteils weitere Effekte, die gegebenenfalls Sekundärteilchen erzeugen, auf. Zu den charakterisierenden Größen zählt in erster Linie der Gesamtwirkungsquerschnitt bezüglich der eintreffenden Strahlung. Dieser wird durch die Art des bestrahlten Materials, die Dichte des Materials ρ , die Bauart der Halbleiterkomponente, die kritische Ladung Q_{krit} sowie Umgebungsbedingungen wie aufgeprägter Spannung U_{dev} und Temperatur T bestimmt. Bestimmend für die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit mit Sekundärstrahlung ist dann der sich aus den gleichen Größen definierende SEE-Wirkungsquerschnitt. Beschränkt man seine Betrachtung auf die Wirkung auf ein bestimmtes Material, gilt der LET als charakterisierende Größe für die Kombination aus Materialwahl und wirkendem Sekundärteilchen (siehe Kapitel 4).

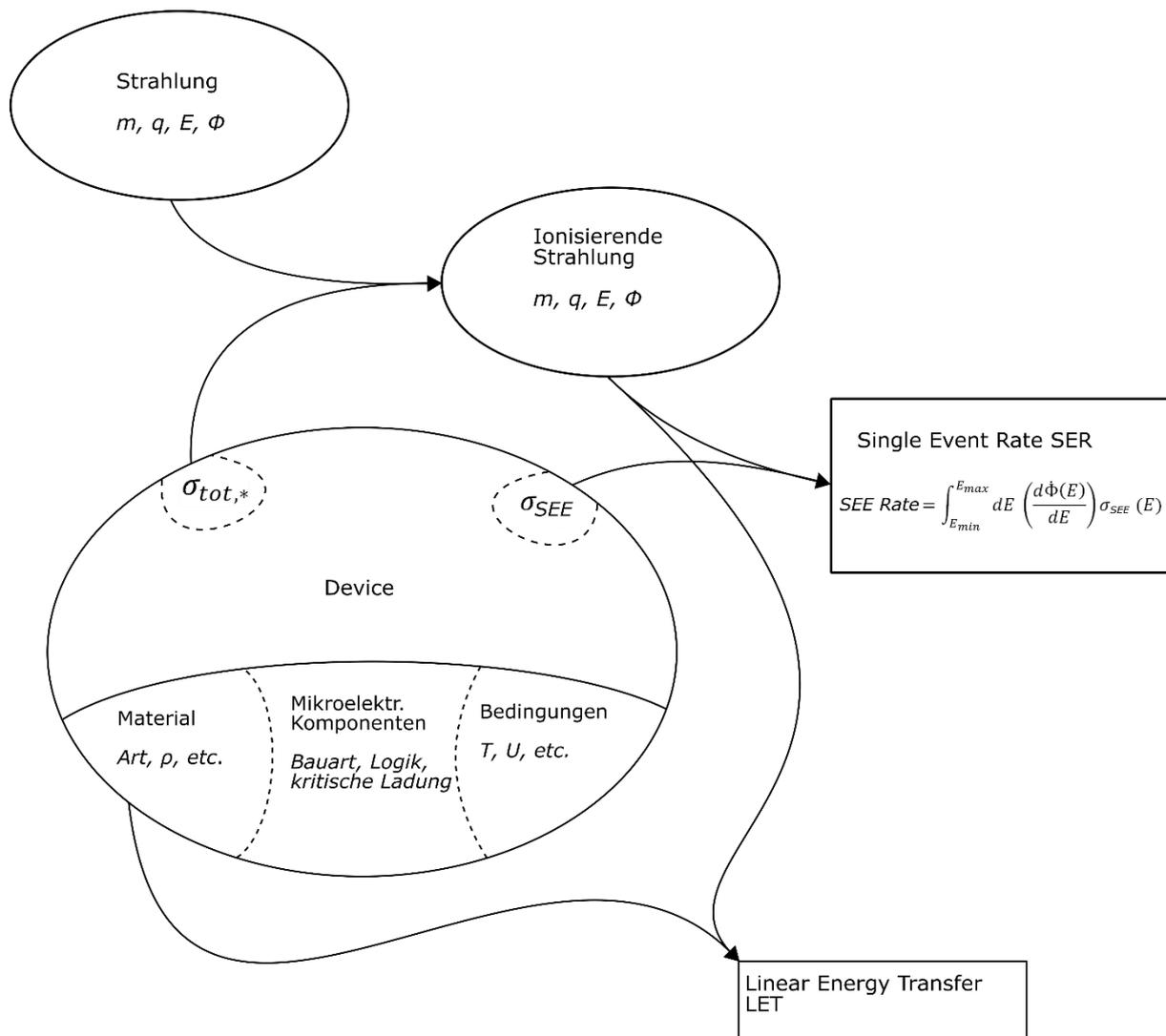


Abb. 2.6 Veranschaulichung der Abhängigkeit verschiedener charakterisierender Größen, die die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines SEE beeinflussen

3 Aufbau und Funktion verschiedener Halbleiterbauteile

In diesem Kapitel werden die meist verwendeten Halbleiterbauteile beschrieben und deren Funktionsweise erklärt. Zunächst erfolgt eine Übersicht über die Metall-Oxid-Halbleiter-Transistortechnologie (engl. Metal-Oxid-Semiconductor, kurz MOS), die in vielen Bauteilen ihre Anwendung findet. Anschließend werden die gängigen Halbleiterbauteile beschrieben.

3.1 Grundlagen zum MOS-Transistor

Die MOS-Transistortechnologie zählt zu den meist verwendeten Bauelementen mit digitalen integrierten Schaltungen (ICs). Sie findet in fast sämtlichen modernen Logikschaltungen wie CPU⁸s oder ASIC⁹s sowie in SRAM¹⁰-Speichern, wie sie für den Cache-Speicher¹¹ genutzt werden, oder in DRAM¹²-Speichern ihre Anwendung. MOS-Transistoren zählen zu der Familie der Feldeffekttransistoren (FET), die im Gegensatz zu den Bipolartransistoren eine Spannungssteuer- statt einer Stromsteuerkennlinie aufweisen. Sie werden daher auch als Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (engl. Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor, kurz MOSFET) bezeichnet. Die formale Einordnung der MOSFET innerhalb der Familie der Feldeffekttransistoren zeigt Abb. 3.1.

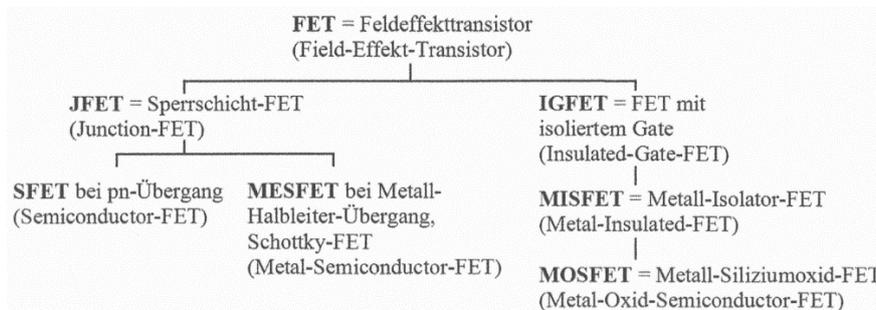


Abb. 3.1 Einteilung von Feldeffekttransistoren /STI 16/

⁸ CPU = Central processing unit.

⁹ ASIC = Application-specific integrated circuit. Integrierte Schaltung (IC), die für einen bestimmten Zweck angepasst ist.

¹⁰ SRAM = Static random-access memory. Speicherbaustein aus der Gruppe der flüchtigen Speicher.

¹¹ Pufferspeicher.

¹² DRAM = Dynamic random access memory, elektronischer Speicherbaustein mit flüchtigem Speicherinhalt.

MOSFET sind im Allgemeinen folgendermaßen aufgebaut. Ein metallischer Leiter ist auf einem Dielektrikum, dem Gateoxid bestehend aus SiO_2 , angebracht und durch dieses vom Substrat, in dem die Feldeffekte durch die Gateelektrode initiiert werden, isoliert. Abb. 3.2 zeigt den vereinfachten Aufbau eines MOSFET mit n-leitendem Kanal.

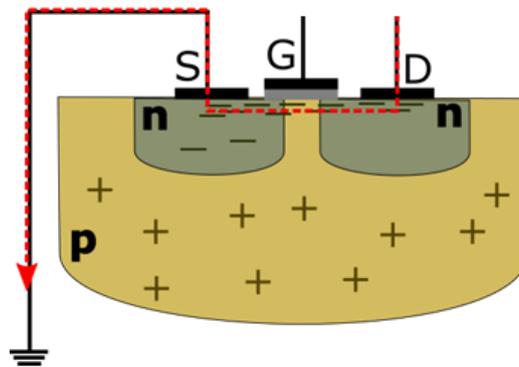


Abb. 3.2 Aufbau eines MOSFET mit n-leitendem Kanal (NMOS) mit den Anschlüssen S (Source), D (Drain) und G (Gate)

Durch das Anlegen einer ausreichend hohen, positiven Spannung U_{th} zwischen der Gate- und Sourceelektrode werden negativ geladenen Elektronen im p-dotiertem Substrat durch Influenz an das Gateoxid geleitet, ohne dieses zu durchqueren. Hierdurch bildet sich eine Inversionsschicht zwischen den beiden n^+ -dotierten Gebieten aus (Abb. 3.3). Sofern zwischen Source und Drain eine Spannung U_{SD} anliegt, kann durch den sich gebildeten Inversionskanal ein von der Steuerspannung U_{GS} abhängiger Strom fließen. Diese Eigenschaft ermöglicht ein verlustarmes Betreiben von Logik- oder Speicherschaltungen, also die Verwendung des Transistors als Schalter.

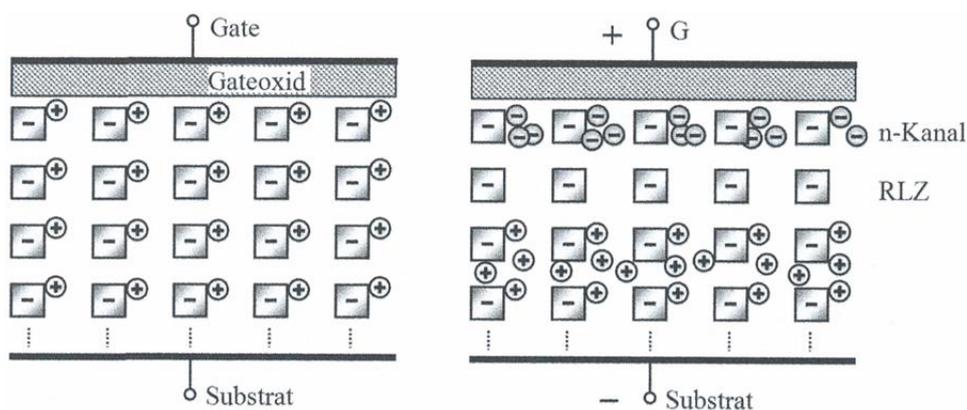


Abb. 3.3 Ausbildung des n-Kanals in der Nähe der Grenzschicht zwischen Substrat und Gateoxid /STI 16/

Zu den wesentlichen Eigenschaften des MOSFET zählen die sehr kleine statische Verlustleistung im Bereich von wenigen Nanowatt je Gatter¹³, eine hohe Störsicherheit, ein großer Speisespannungsbereich von 3 bis 15 Volt und damit verbunden die Kompatibilität zur Bipolartechnologie TTL¹⁴, bei der eine Speisespannung von 5 Volt erforderlich ist. Tab. 3.1 zeigt eine Übersicht über die wichtigsten Vor- und Nachteile der MOS-Transistortechnologie:

Tab. 3.1 Vor- und Nachteile der MOS-Transistor-Technologie

Vorteile	Nachteile
<ol style="list-style-type: none"> 1. Hochohmiger als bipolare Transistoren, dadurch sehr geringe Verlustleistung. 2. Wegen der hohen Impedanz lassen sich MOS-Transistoren unmittelbar zusammenschalten, daher sehr einfache Struktur. 3. MOS-Transistoren können mit sehr kleinen Abmessungen hergestellt werden (1/10 kleiner als Bipolartransistoren). 4. Große Vorteile gegenüber TTL-Technik sind der einfachere technologische Prozessablauf und der geringere Platzbedarf. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Im dynamischen Bereich steigt die Verlustleistung linear. 2. Wegen Hochohmigkeit können MOS-ICs die Schaltungs- und Leistungskapazität nur langsam auf- und entladen, dadurch geringere Arbeitsgeschwindigkeit. 3. Wegen Hochohmigkeit können MOS-ICs nur relativ kleine Ausgangsströme liefern, daher nur geringe Ausgangsleistung.

¹³ Logikgatter (kurz Gatter), dienen zur Realisierung einer Booleschen Funktion. Die Grundfunktionen sind AND, OR und NOT.

¹⁴ TTL=Transistor-Transistor-Logic; Bipolare Schaltkreisfamilie, wird neben CMOS als Standard in zahlreichen Anwendungen eingesetzt. Schaltgeschwindigkeiten ursprünglich im 10 ns Bereich, Störsicherheit im 1 V-Bereich. /STI 16/

Ein wichtiges Bauelement, in dem der MOSFET verwendet wird, ist der CMOS¹⁵-Transistor. Dieser wird aus dem Zusammenschalten eines NMOS¹⁶- und eines PMOS¹⁷-Transistors erzeugt (Abb. 3.4). Der CMOS-Transistor zeichnet sich durch eine sehr geringe Verlustleistung aus und ist dadurch für statische Speicher wie SRAMs oder als Logikgatter geeignet. Typischerweise werden SRAM Speicherzellen aus sechs CMOS-Transistoren aufgebaut. Dabei bilden zwei n-Kanal- und zwei p-Kanal-Transistoren einen Flipflopspeicher (Speicher auf Basis einer bistabilen Kippstufe), während zwei weitere n-Kanal-Transistoren als Steuerelemente der Wort- und Bitleitungen dienen.

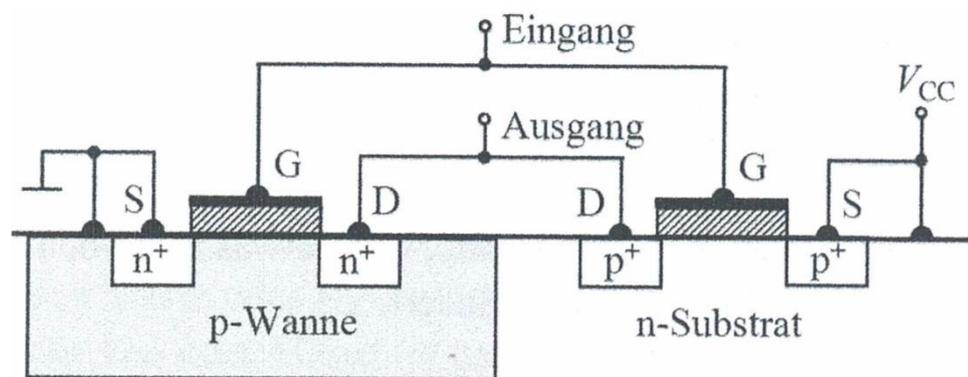


Abb. 3.4 Vereinfachter Querschnitt eines CMOS-Inverters mit p-Wanne /STI 16/

Ein dynamischer Speicher wird durch eine Verbindung eines NMOS und eines Kondensators realisiert. Lese- und Schreibvorgänge werden durch den Transistor gesteuert, während die Ladung durch den Kondensator gespeichert wird, siehe Abb. 3.5. Der Vorteil dieses Bauelements sind die sehr schnellen Zugriffszeiten von etwa 10 ns, dabei ist es aber notwendig, die gespeicherte Information / Ladung durch einen Taktgeber vor dem Entladen des Kondensators über Schleichströme zu erneuern. Damit liegt die Leistungsaufnahme der DRAM-Speicher über denen der SRAM-Speicher. Ein weiterer Vorteil liegt jedoch in der sehr viel kleineren

¹⁵ CMOS = Complementary metal-oxide-semiconductor, Halbleiterbauelement mit p-Kanal und n-Kanal MOSFET auf einem gemeinsamen Substrat.

¹⁶ NMOS = n-type metal-oxide semiconductor. Aktives Bauelement mit min. drei Anschlüssen (G Gate, D Drain, S Source). In einem schwach p-dotierten Siliziumkristall (Substrat) sind zwei stark n-dotierte Gebiete eingelassen (Source- und Drainanschluss) womit eine npn-Struktur entsteht.

¹⁷ PMOS = p-type metal-oxide semiconductor. Aktives Bauelement mit min. drei Anschlüssen (G Gate, D Drain, S Source). In einem schwach n-dotierten Siliziumkristall (Substrat) sind zwei stark p-dotierte Gebiete eingelassen (Source- und Drainanschluss) womit eine pnp-Struktur entsteht.

Bauweise. Während SRAM-Einheiten eine Fläche von $140 F^2$ benötigen, liegt diese für DRAM-Einheiten bei lediglich $10 F^2$.¹⁸

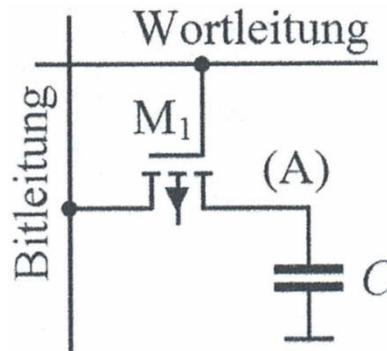


Abb. 3.5 Ein-Transistor DRAM-Zelle /STI 16/

Darüber hinaus ist der CMOS-Inverter eine Grundsaltung der CMOS-Schaltungstechnik, aus der sämtliche weiteren Logikfunktionen abgeleitet werden. Durch die Kombination mehrerer Transistoren können unterschiedliche Gatterfunktionen realisiert werden. Dabei entstehen durch eine Parallelschaltung die NOR¹⁹-Funktion und durch eine Reihenschaltung die NAND²⁰-Funktion (Abb. 3.6).

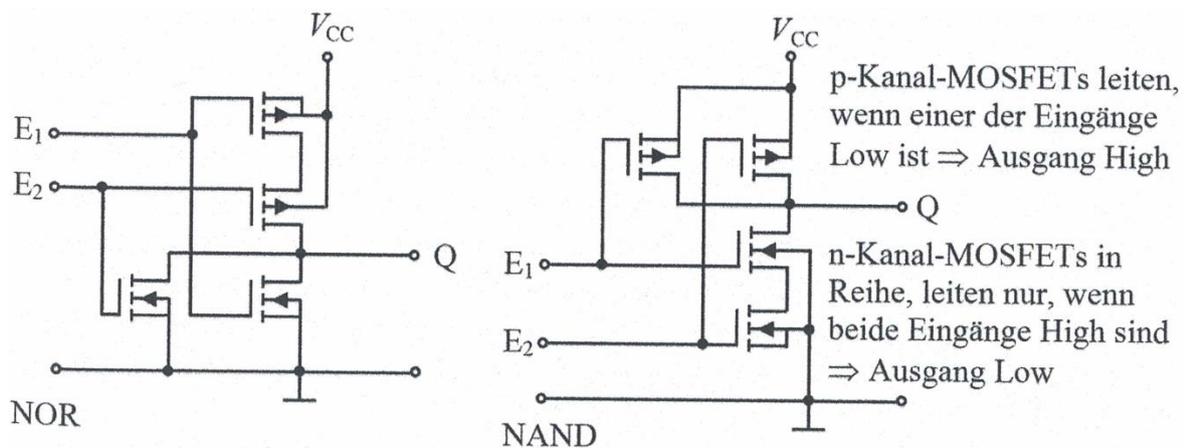


Abb. 3.6 Statische CMOS-Gatter mit jeweils zwei Eingängen /STI 16/

¹⁸ F =Minimale Strukturgröße; bezeichnet den Wert der kleinsten Struktur, die zuverlässig fotolithografisch hergestellt werden kann.

¹⁹ NOR = NICHT ODER. Bei diesem Logikgatter besteht zwischen den Eingängen und dem Ausgang die logische Verknüpfung NICHT ODER. Der Ausgang ist 1, wenn alle Eingänge 0 sind und am Ausgang wird eine 0 ausgegeben, wenn mindestens ein Eingang 1 ist.

²⁰ NAND = NICHT UND. Bei diesem Logikgatter besteht zwischen den Eingängen und dem Ausgang die logische Verknüpfung NICHT UND. Der Ausgang ist 0, wenn alle Eingänge 1 sind und am Ausgang wird eine 1 ausgegeben, wenn mindestens ein Eingang 0 ist.

3.2 Random Access Memory (RAM)

Bei einem RAM (Random Access Memory) handelt es sich um einen Speicher mit wahlfreiem / direktem Zugriff. Die Bezeichnung „wahlfrei“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass jede Speicherzelle über ihre Speicheradresse direkt angesprochen werden kann. Der Speicher muss also nicht sequenziell oder in Blöcken ausgelesen werden. Bei großen Speicherbausteinen erfolgt die Adressierung jedoch nicht über die einzelnen Zellen, sondern über ein Wort, dessen Breite von der Speicherarchitektur abhängt. Das unterscheidet das RAM von blockweise zu beschreibenden Speichern, den Flash-Speichern. /STI 16/

Man unterscheidet zwischen flüchtigen und nichtflüchtigen RAMs. Zu den flüchtigen RAMs zählen SRAM und DRAM, zu nichtflüchtigen RAMs zählen ferroelektrische oder magnetische RAMs (FRAM, MRAM). /STI 16/

Im Folgenden wird der Aufbau von SRAM, DRAM und Flash-Speichern dargestellt. Da diese Beschreibungen im Wesentlichen auf der Funktionsweise von Transistoren und Flipflops basieren, wird zunächst der Aufbau eines Flipflops, wie er in SRAM-Speichern Anwendung findet, beschrieben. /STI 16/

3.3 Bistabile Kippstufe (Flipflop)

Eine einfache Speicherschaltung ist die bistabile Kippstufe. Bistabil bedeutet hier, dass beide Kippwerte 0 und 1 stabil sind, wobei die monostabile Kippstufe, auch Monoflop genannt, nur einen stabilen Zustand besitzt und der instabile Zustand nach einer Verzögerungszeit in den stabilen Zustand übergeht. In Bipolartechnik besteht die bistabile Kippstufe (oder Flipflop) aus zwei Transistoren, wobei der Ausgang des zweiten Transistors über einen Widerstand an den Eingang des ersten Transistors geführt wird. Diese Rückkopplung bestimmt das Verhalten der Schaltung. /NEU 75/



Abb. 3.7 Aufbau einer bistabilen Kippstufe (Flipflop) aus Logikgattern links, zugehörige Wahrheitstabelle rechts (H: High, L: Low) /ELV 19/

Der „Set-Reset“ SR-Flipflop ist eine der grundlegendsten sequentiellen Logikschaltungen. Dieser Flipflop besitzt zwei Eingänge: Einer wird als „SET“ (S) bezeichnet, da er den Ausgang auf „1“ oder „High“ setzt und einer wird als „RESET“ (R) bezeichnet, der den Ausgang auf „0“ oder „Low“ setzt.

Eine grundlegende NAND-Gate SR-Flipflop-Schaltung mit Wahrheitstabelle ist in Abb. 3.7 dargestellt und liefert die Rückmeldung von beiden Ausgängen zurück zu ihren gegenüberliegenden Eingängen. Diese Speicherschaltungen werden verwendet, um ein einzelnes Datenbit zu speichern. /ELV 19/, /GUS 17/

3.4 Inverter

Der Aufbau einer Inverterschaltung mittels Bipolartransistors (npn) ist in Abb. 3.8 dargestellt. /HOC 08/

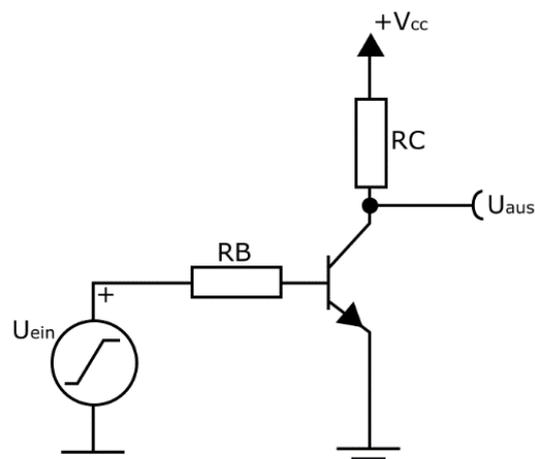


Abb. 3.8 Inverterschaltung mit npn-Bipolartransistor /HOC 08/

Ist der Transistor (Emitterschaltung) eingeschaltet, wird der Ausgang auf Masse (logisch „0“) gelegt. Ist er ausgeschaltet, ist die Masseverbindung unterbrochen und der Ausgang liegt durch den Kollektorwiderstand auf Pluspotential (Logisch „1“).

In CMOS-Technik entsteht ein Inverter durch Verschaltung eines PMOSFET und eines NMOSFET (siehe Abb. 3.9) /KES 13/. Für das Eingangssignal wird über die Transistoren der Ausgang des Inverters an $U_a = U_{dd}$ gelegt. Dabei ist jeweils nur ein Transistor geöffnet, während der andere geschlossen ist, so dass im Ruhezustand kein Strom fließt. Lediglich beim Schalten fließt ein Strom durch beide Transistoren. /CLE 01/

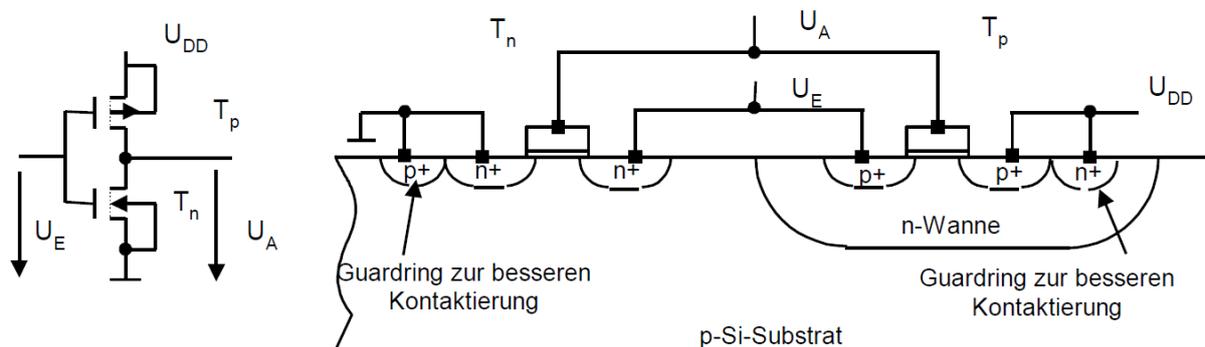


Abb. 3.9 Schematische Darstellung (links) und Schichtaufbau eines CMOS-Inverters (rechts) /CLE 01/

3.5 Static Random-Access Memory (SRAM)

SRAMs werden heutzutage meist als 6-Transistorzellen in CMOS-Technik hergestellt. Im Folgenden wird die Funktion des SRAM anhand der Abb. 3.10 erläutert. Prinzipiell wird jedes Bit in der SRAM-Zelle in vier Transistoren gespeichert, die zwei gegeneinander verschaltete Inverter bilden. Diese werden aus dem PMOS-Transistor T_2 und dem NMOS-Transistor T_3 bzw. dem PMOS-Transistor T_4 und dem NMOS-Transistor T_5 gebildet. Durch die Kopplung der Inverter sind die beiden Knoten S und SB komplementär zueinander. Liegt der Knoten S auf Erdpotential V_{ss} (logisch „0“), liegt der Knoten SB auf der Versorgungsspannung V_{dd} (logisch „1“). Wenn nun S auf „0“ und SB auf „1“ liegt, so sind T_2 und T_5 nichtleitend sowie T_3 und T_4 leitend. /GAW 14/

Die beiden zusätzlichen Zugriffstransistoren T_1 und T_6 werden benutzt, um den Zugriff auf die Speicherzelle während Lese- und Schreibzugriffs mittels der Wortleitung (engl. Wordline, kurz WL) zu steuern. /GAW 14/

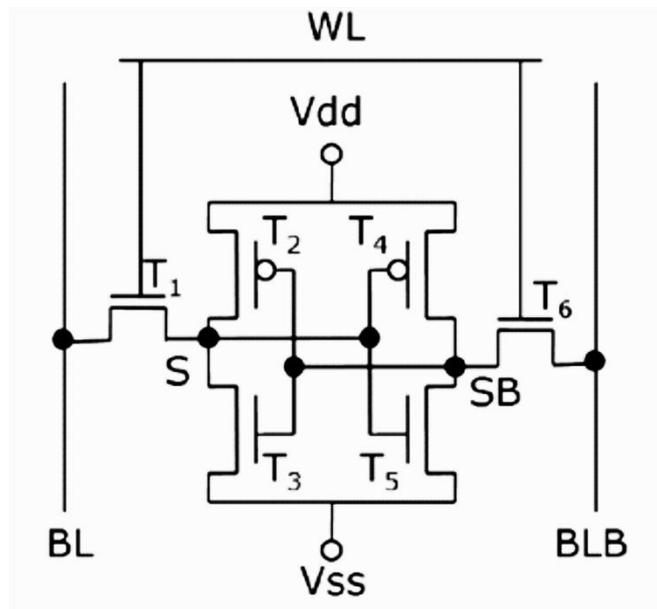


Abb. 3.10 6-Transistor-SRAM /GAW 14/

Das SRAM speichert die vorhandene Information, so lange die Versorgungsspannung V_{dd} angelegt bleibt. Die Zugriffstransistoren T_1 und T_6 sind zu diesem Zeitpunkt gesperrt. /GAW 14/ Im Gegensatz zum DRAM (siehe Abschnitt 3.6) benötigt der SRAM also kein periodisches Auffrischen der Information / der Ladung zur Vermeidung von Datenverlust.

Um die Speicherzelle auszulesen, werden zunächst beide Bitleitungen (engl. Bitlines, kurz BL) BL und BLB, mit einer „1“ vorgeladen. Anschließend wird die WL mit einer „1“ angesteuert und somit werden die Zugriffstransistoren T_1 und T_6 leitend. Steht S auf „0“ und SB auf „1“, wird BL über T_3 entladen. Der Knoten SB behält sein Potential. Ein mit den Bitlines verbundener Senseamplifier (Komparator) wertet die Potentialdifferenz aus und gibt die gelesene Information verstärkt zur Verarbeitung weiter. Ist der Lesevorgang abgeschlossen, werden die Zugriffstransistoren über WL wieder gesperrt. /GAW 14/

Um eine SRAM-Zelle zu beschreiben, werden die beiden Bitlines, auf komplementäre Potentiale gelegt, z. B. BL auf „1“ und BLB auf „0“. Der Knoten S liegt auf „0“, Knoten SB auf „1“. Durch Ansteuern von WL werden anschließend T_1 und T_6 geöffnet. Der Knoten SB wird über

BLB entladen und der Knoten S wird auf das Potential von BL gezogen. Da die Knoten komplementär zueinander sind, reicht es aus, wenn ein Knoten die Schaltschwelle überschreitet. Die SRAM-Zelle wird dann in ihren neuen Zustand kippen. Dies funktioniert, da die Zugriffstransistoren größer dimensioniert sind und mehr Strom liefern als die Transistoren der beiden Inverter, die versuchen, die Information stabil zu halten. /GAW 14/

Eine SRAM-Zelle besitzt demnach drei unterschiedliche Zustände /WIK 19b/:

- Standby: Wenn die Wordline nicht geschaltet ist, trennen die Zugriffstransistoren die Speicherzelle von den Bitlines. Die beiden gegeneinander verschalteten Inverter ($T_1 - T_4$) verstärken ihren aktuellen Zustand jeweils gegenseitig (solange die Betriebsspannung anliegt).
- Lesezugriff: Ist der Speicherzustand bei SB logisch auf 1 gesetzt, startet der Lesezugriff mit dem Aufladen der beiden Bitlines auf die Hälfte der Betriebsspannung, gefolgt von einem Schalten der Wordline, um beide Zugriffstransistoren durchzuschalten. Als zweiten Schritt werden dann die jeweiligen Werte S und SB auf die beiden Bitlines übertragen, d. h. BL bleibt aufgeladen, BL wird über T_3 und T_1 zu logischer „0“ entladen. BL wird durch T_4 und T_6 über die Versorgungsspannung auf logisch 1 geladen.
- Schreibzugriff: beginnt damit, dass der zu schreibende Wert auf die Bitlines gelegt wird. Wenn eine „0“ geschrieben werden soll, wird BLB auf „0“ und BL auf „1“ gesetzt. Beim Schreiben einer „1“ werden die beiden Werte vertauscht. In der Folge wird dann die Wordline geschaltet, so dass der Wert in die Speicherzelle geschrieben wird. Dies funktioniert, weil die relativ schwachen Transistoren, die die Inverter bilden, durch die relativ starken Bitlines überschrieben werden können. Eine entsprechende Größenauslegung der Transistoren ist bei der Herstellung notwendig, damit das Überschreiben einwandfrei funktioniert.

3.6 Dynamic Random Access Memory (DRAM)

Der Aufbau einer DRAM-Speicherzelle besteht nur aus einem Kondensator und einem Transistor (MOSFET). Bei DRAMs werden Informationen in Form des elektrischen Ladezustands eines Kondensators gespeichert. Ein aufgeladener Kondensator entspricht der logischen „1“, ein entladener Kondensator der logischen „0“. Jede Speicherzelle speichert ein Bit. Dieser

sehr einfache Aufbau macht die Speicherzelle zwar sehr klein, allerdings entlädt sich der Kondensator bei den kleinen möglichen Kapazitäten durch die auftretenden Leckströme schnell, und der Informationsinhalt geht verloren. /STI 16/

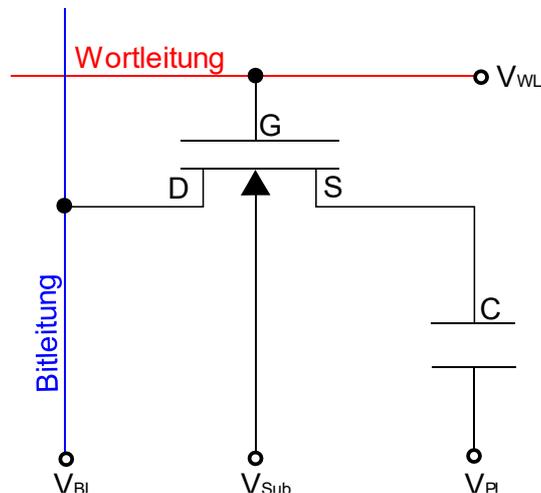


Abb. 3.11 Aufbau DRAM-Zelle, nach /WIK 19a/

DRAMs sind somit flüchtige Speicher, da auch bei aufrechterhaltener Betriebsspannung die gespeicherte Information verloren geht. Sie müssen daher regelmäßig wiederaufgefrischt werden (Refresh). Dies ist normalerweise in Abständen von einigen Millisekunden erforderlich. /STI 16/

Der Transistor dient als Schalter zum Lesen und Schreiben der Information aus der Zelle. Dazu wird über die Wortleitung an den Gateanschluss des NMOS-Transistors eine positive Spannung angelegt. Dadurch wird eine leitende Verbindung zwischen Source- und Draingebieten hergestellt, welche den Zellkondensator mit der Bitleitung verbindet.

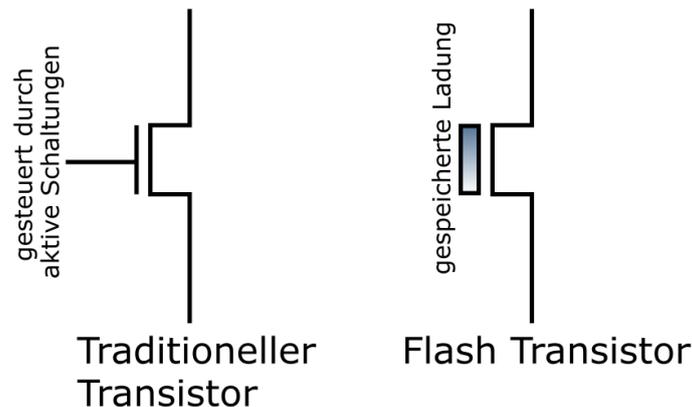
Im Vergleich zum SRAM ist DRAM wesentlich preiswerter pro Bit. Es findet deswegen vor allem dort Verwendung, wo große Speichermengen bei mittleren Zugriffszeiten (verglichen mit SRAM) zur Verfügung gestellt werden müssen. /STI 16/, /WIK 19a/

3.7 Flash-Speicher

Flash-Speicher sind nichtflüchtige Speicher, d. h. sie können Informationen auch bei ausgeschalteter Stromversorgung speichern. Der Flash-Speicher wurde Anfang der 80er Jahre von Toshiba entwickelt und wird heute in vielen Bereichen eingesetzt. Im traditionellen Halbleiterspeicher wirken Transistoren wie Schalter, wobei das Gate des Transistors den Schalter je

nach angelegter Spannung ein- oder ausschaltet. Der Flash-Speicher verwendet eine nicht angeschlossene Steuerelektrode (engl. floating gate), das programmierbar ist, um die Ladung (Spannung) zu speichern, die bestimmt, ob der Transistor ein- oder ausgeschaltet ist, wie in Abb. 3.12 dargestellt. /CRI 08/, /NOE 10/

Abb. 3.12 Traditioneller Transistor und Floating Gate des Flash-Speichers, nach /NOE 10/



Der Flash-Speicher ist ein EEPROM (engl. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory), welcher ähnlich wie ein EPROM²¹ aufgebaut ist, nur wird hier durch eine Änderung der Schaltung nicht mehr jede Speicherzelle einzeln löscherbar. Die Speicherzellen werden zu „Seiten“ (engl. Pages) zusammengefasst. Je nach Typ ist eine solche Page meist einige Kilobyte groß. /NOE 10/

Beim Programmieren von EEPROM wird eine erhöhte Spannung angelegt. Dadurch kommt es zu einem Lawinendurchbruch, wodurch die Elektronen die dünne Isolierschicht überwinden und sich im Floating Gate sammeln. Das Programmieren kann jederzeit wiederholt bzw. fortgesetzt werden. /SEM 17/

Es gibt zwei Hauptarten von Flash-Speicher, die nach dem logischen Gate benannt sind, das zum Aufbau einer Basisspeicherzelle verwendet wird: NOR-Flash und NAND-Flash. /NOE 10/

Der NOR-Flash-Speicher zeigt bei Lesevorgängen eine gute Leselatenz, daher wird diese Art von Speicher in einem Kontext verwendet, in dem die Leseleistung entscheidend ist, d. h. für die Speicherung von Code, der für die direkte Ausführung vor Ort im Flash-Speicher bestimmt

²¹ EPROM = Erasable Programmable Read-Only Memory. Nichtflüchtiger Speicherbaustein basierend auf MOSFET Transistoren, welcher mittels UV-Licht löscherbar ist.

ist. In Bezug auf NOR-Flash ist die Speicherdichte eines NAND-Flashs höher und sein Preis pro Bit ist geringer. NAND-Flash haben allerdings eine höhere Leselatenz als ein NOR-Flash. /NOE 10/

Unter den NAND-Flash-Speichern unterscheidet man SLC²² und MLC²³ Speicherzellen. SLC-Zellen können ein Bit pro Zelle speichern. Wenn die Spannung den Schwellenwert überschreitet, kann eine Zelle als programmiert („0“) oder als gelöscht („1“) gelesen werden. Ein MLC-Gate kann verwendet werden, um mehrere Werte unter Verwendung zusätzlicher Schwellenwerte zu speichern. Auf dem gleichen Stück Silizium ermöglicht MLC somit eine viel höhere Integrationsdichte. /FUC 15/

Ein Problem von Flash-Speichern ist, dass die Anzahl der Schreibvorgänge einer Anwendung auf einen bestimmten Speicherplatz begrenzt ist. Mit Erreichen einer bestimmten Anzahl von Schreibvorgängen können die Transistoren die Daten nicht mehr zuverlässig speichern. Flash-Speicher besitzen somit eine Lebensdauerbegrenzung durch die Anzahl der Schreibzyklen. /CRI 08/

3.8 Field Programmable Gate Array (FPGA)

Bei FPGAs handelt es sich um digitale integrierte Schaltungen, welche typischerweise auf Basis eines Chipdesigns mit Hilfe von Masken für Fotolithographie gefertigt werden. Der Aufbau eines FPGAs ist schematisch in Abb. 3.13 dargestellt /IAEA 16/.

Er besteht aus:

- konfigurierbaren Logikblöcken (CLB),
- Verbindungen zwischen den Logikblöcken,
- Ein- und Ausgangsblöcken (I/O-Blöcken) und
- Speicherblöcken (RAM-Blöcken).

²² SCL = Single-Level-Cell. NAND-Flash-Speicher, der genau ein Bit pro Zelle speichert.

²³ MCL = Multi-Level-Cell. NAND-Flash-Speicher, der mehr als ein Bit pro Zelle abspeichert. Hierbei wird die Lese- und Schreibgeschwindigkeit reduziert und bei einem Ausfall der Zelle die Bitfehlerrate erhöht.

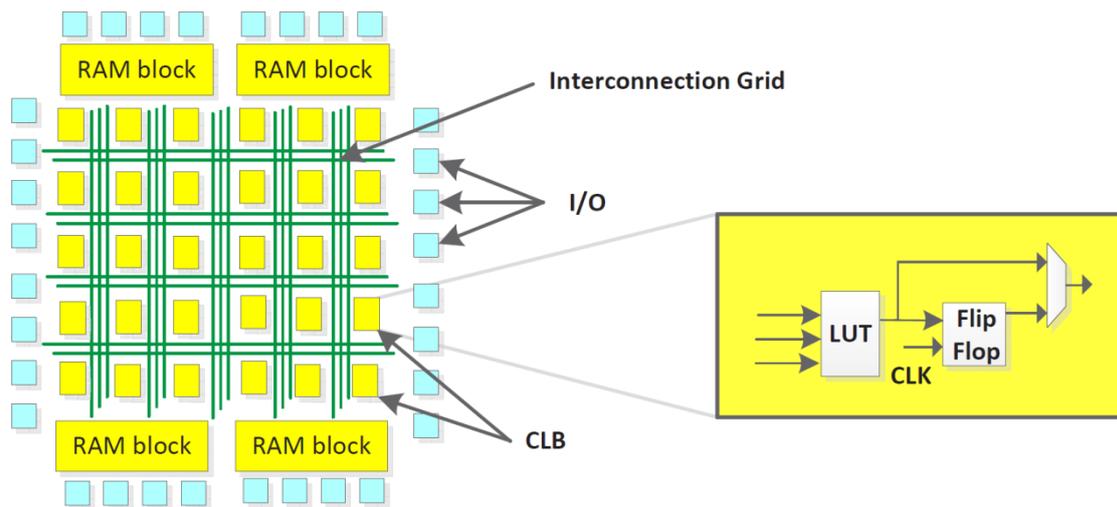


Abb. 3.13 Aufbau eines FPGA /IAEA 16/

Sowohl die Logikblöcke als auch die Verbindungen zwischen diesen können abhängig von der vorgesehenen Aufgabe der zu realisierenden logischen Schaltung anwendungsspezifisch programmiert werden. Abhängig vom FPGA-Typ sind mehrere Tausende bis zu mehrere Millionen Logikblöcke und Verbindungen vorhanden. Die Eingangs- und Ausgangsblöcke (I/O-Blöcke) dienen der Kommunikation des FPGAs mit anderen Elementen. Jeder Logikblock wird so konfiguriert, dass er einen Teil der zu realisierenden Schaltung implementiert. Diese Schaltungsteile werden dann durch ein programmierbares Netzwerk von Verbindungen (Routing) untereinander und mit den I/O-Blöcken verbunden. /FRI 09/

Die logischen Funktionen sind in den Logikblöcken gespeichert, welche wiederum aus Flipflops und Lookup-Tabellen (LUT) bestehen. In Abb. 3.13 rechts sind die Hauptbestandteile eines einfachen programmierbaren Logikblocks dargestellt. Er besteht im Wesentlichen aus einer Lookup-Tabelle (LUT), einem Multiplexer, einem Flipflop und einem Taktgeber (Clock CLK).

Um in einem Logikblock beispielsweise die Funktion $y = (a \& b) | c$ darzustellen, geht man wie in Abb. 3.14 gezeigt vor. Für die gewünschte Funktion wird zunächst eine Wahrheitstabelle erstellt, welche dann in der LUT entsprechend definiert und in der Speicherzelle der LUT abgelegt wird. Die gewünschte Funktion wird dann durch Auslesen der durch die Eingänge bestimmten Speicheradresse berechnet. Der Multiplexer dient als Selektionsschaltung und kann derart konfiguriert werden, dass er entweder das Ausgangssignal der LUT oder ein separates Eingangssignal weiterleitet. /MAX 04/

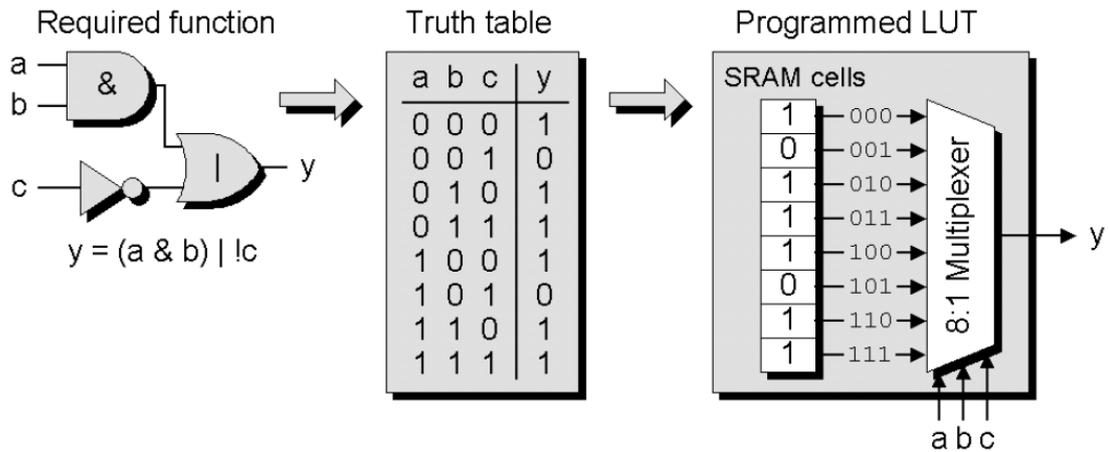


Abb. 3.14 Darstellung der Funktion $y = (a \& b) | !c$ in einem Logikblock eines FPGAs /MAX 04/

3.9 Zusammenfassung

Die beschriebenen Halbleiterbauteile zeichnen sich durch ihre unterschiedlichen Bau- und Funktionsweisen aus. Dies führt dazu, dass es notwendig ist jedes Halbleiterbauteil auf seine Suszeptibilität gegenüber SEE und Langzeiteffekten zu testen, auch sind die unterschiedlichen Bauteile nicht für alle SEE oder die Langzeiteffekte anfällig. Für die Bewertung der Strahlungstoleranz von Halbleiterbauteilen ist daher eine genaue Kenntnis des verwendeten Bauteils essenziell. Dies gilt ebenso für die Bedingungen am Einsatzort oder die zu erwartenden Bedingungen beispielsweise bei einer störfallfesten Auslegung des Bauteils. Näher wird auf die Ausfall- und Mitigationsmechanismen der einzelnen Bauteile in Kapitel 4.6 eingegangen.

4 Strahlungsinduzierte Effekte auf Halbleiterbauteile

4.1 Einleitung

Die Schadensmechanismen an Halbleiterbauteilen durch die Einwirkung von Strahlung in Form von Teilchen oder Photonen lassen sich in drei große Kategorien einteilen. Man unterscheidet zwei Typen von Single Event Effects: *Hard Errors*, die permanenten Schaden hervorrufen und *Soft Errors*, die temporäre Fehlfunktionen hervorrufen. Des Weiteren treten Versetzungsschäden im Atomgitter des bestrahlten Materials (typischerweise Silizium) auf. Dies geschieht aufgrund von Kernwechselwirkungen und betrifft vor allem schnelle und ungeladene Teilchen wie Neutronen. Als dritter Fall sind Gesamtdosiseffekte (TID) zu nennen. Die Effekte treten erst bei Bestrahlungen über einen gewissen Zeitraum und einer Akkumulation von Strahlung auf. Abb. 4.1 fasst die Schadensmechanismen zusammen:

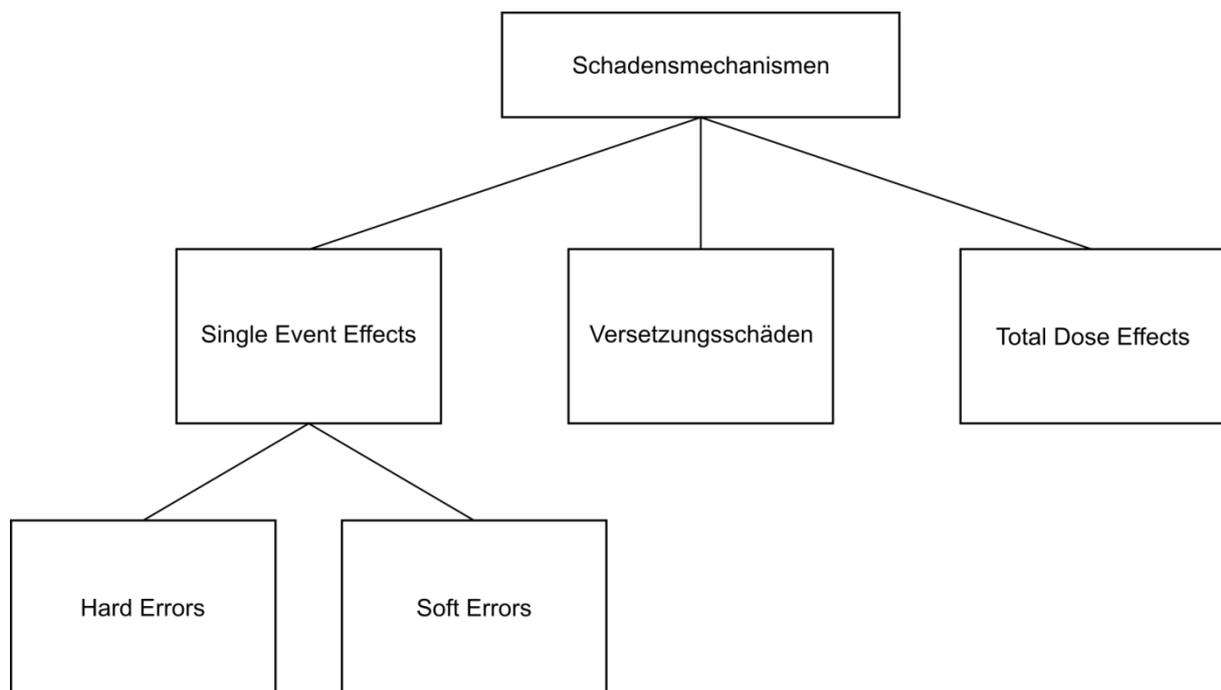


Abb. 4.1 Schadensmechanismen durch die Einwirkung von Strahlung

4.2 Single Event Effects (SEE)

Single Event Effect (SEE) ist der Oberbegriff für Effekte, die in Halbleiterbauteilen durch den Einschlag bzw. das Durchqueren eines ionisierenden Teilchens ausgelöst werden können.

Durch sie kommt es zu Einwirkungen auf elektronische Komponenten, die entweder eine dauerhafte Schädigung oder Zerstörung des Bauteils hervorrufen (oder den Zustand des Bauteils temporär beeinflussen, dies aber meist durch ein Zurücksetzen behoben werden kann).

4.2.1 Permanente Fehlermodi (Hard Errors)

Dauerhafte Zustandsänderungen des Bauteils, werden z.B. verursacht, wenn ein ionisierendes Teilchen ein Halbleiterbauteil durchtritt und durch die Wechselwirkung mit den Halbleiteratomen das Durchschalten parasitärer Transistoren verursacht, was zu einem Kurzschluss im Bauteil und damit zu Hochstromzuständen führt, die potenziell zerstörerisch sind. Die ionisierenden Teilchen können direkt durch radioaktive Materialien im Bauteil selbst, aus natürlicher Umgebungsstrahlung (zumeist kosmisch) oder durch erhöhte Umgebungsstrahlung wie im Kernkraftwerk hervorgerufen werden. /JOH 00/, /HUG 16/ Es werden bauteilspezifische Hard Errors unterschieden, von denen im Folgenden die Begriffe „Single Event Burnout (SEB), Single Event Latch-up (SEL) und Single Event Gate Rupture (SEGR) näher erläutert werden.

4.2.1.1 Single Event Burnout (SEB)

Single Event Burnout-Effekte (SEB) werden beim Passieren eines ionisierenden Teilchens (z. B. schweren Ions) durch Bipolartransistoren oder n-Kanal Leistungs-MOSFETs beobachtet, die sich im nichtleitenden Zustand befinden und daher eine hohe Spannung zwischen dem Drain- und Sourceanschluss halten. Ein durch die Ionisierung resultierender hoher Stromfluss führt zur thermischen Zerstörung des Bauteils, sofern nicht zuvor die Stromversorgung unterbrochen wird. /EDM 00/

Das Passieren der Sourcereion durch ein schweres Ion erzeugt ein dichtes Plasma aus Elektronen und Löchern entlang des Teilchenpfades. Liegt eine Spannung zwischen Drain und Source $U_{DS} < 0$ an, fließen die Elektronen über den Drainanschluss ab, während die Löcher in die p-Region mit erhöhtem Ausbreitungswiderstand gelangen. Ein Spannungsabfall aktiviert den vorgespannten npn-Bipolartransistor. Durch die in Durchlassrichtung gerichtete Spannung gelangen die Elektronen vom Source- zum Drainanschluss. Die hohen elektrischen Feldstärken in einem Leistungs-MOSFET beschleunigen die Elektronen, sodass es durch Stoßwechselwirkungen mit den Valenzelektronen zur lawinenartigen Erzeugung neuer Elektron-Loch-Paare kommt, die die Aufrechterhaltung des parasitären Transistors ermöglichen. Der Strom

in der Epitaxieschicht²⁴ wird soweit regenerativ erhöht, bis es zum zweiten Durchbruch und der lokalen thermischen Zerstörung des Bauteils kommt. /SEX 03/, /SHO 15/

Ein Ansatz zur Verringerung der SEB-Sensitivität in Leistungs-MOSFETs besteht aus Maßnahmen zur Unterdrückung des Anschaltens des parasitären npn-Bipolartransistors, der Verringerung des Maximums des auftretenden elektrischen Feldes und der Verringerung der elektrischen Feldtransiente entlang der Gateoxid Schnittstelle. Mit diesen Maßnahmen konnte experimentell gezeigt werden, dass es möglich ist, Leistungs-MOSFETs selbst für die Einwirkung von Ionen von bis $63 \text{ MeVcm}^2/\text{mg}$ gegen SEB zu immunisieren. /SEX 03/

4.2.1.2 Single Event Latch-Up (SEL)

Single Event Latch-Up-Effekte (SEL) werden in CMOS-Schaltungen beobachtet, siehe Abb. 4.2.

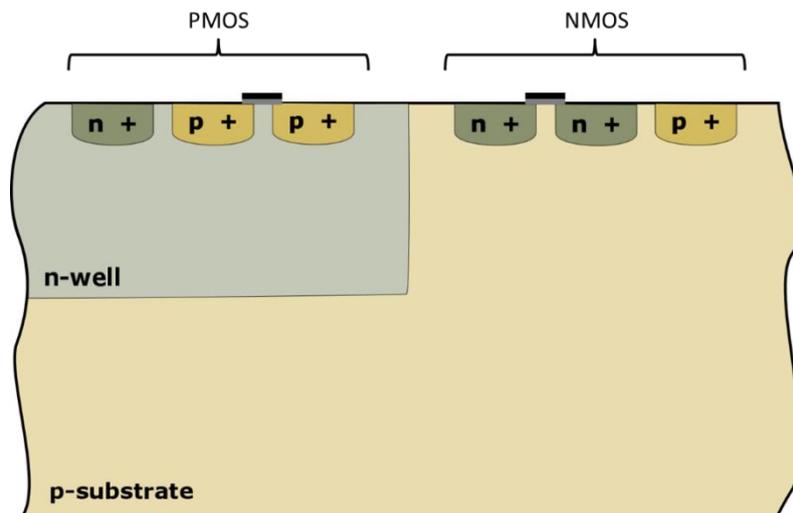


Abb. 4.2 PMOS und NMOS Aufbau des CMOS aus p- und n-dotierten Bereichen

Durch den technologiebedingten Aufbau der pnpn-Struktur bilden sich an den Übergängen parasitäre Transistoren. Die zwei gekoppelten bipolaren Transistoren sind in Abb. 4.3 und das Ersatzschaltbild ist in Abb. 4.4 dargestellt. /JOH 00/

²⁴ Kristalline, dünne Schicht, welche auf einer Stützstruktur aufgewachsen wird und das Substrat des Halbleiters bildet. Auf der Oberseite der Epitaxieschicht werden n- und p-well beispielsweise für den CMOS aufgetragen.

Ein Latch-Up kann auftreten, da sich der parasitäre pnp-Transistor, der durch das p+-Source/n-Well/p-Substrat gebildet wird, und der parasitäre npn-Transistor, der durch das n+-Source/p--substrat/n-well gebildet wird, in einer Rückkopplungsschleife befinden, so dass der Ausgang (Kollektor) jedes Transistors mit dem Eingang (Basis) des anderen verbunden ist, wie in der Ersatzschaltung dargestellt. Der Durchtritt eines ionisierenden Teilchens und die dabei erzeugten Ladungsträger können das Durchschalten der parasitären Transistoren zur Folge haben und dabei zu einem selbsterhaltenden Stromfluss (Kurzschluss) im Bauteil führen. /JOH 00/, /EDM 00/, /HUG 16/

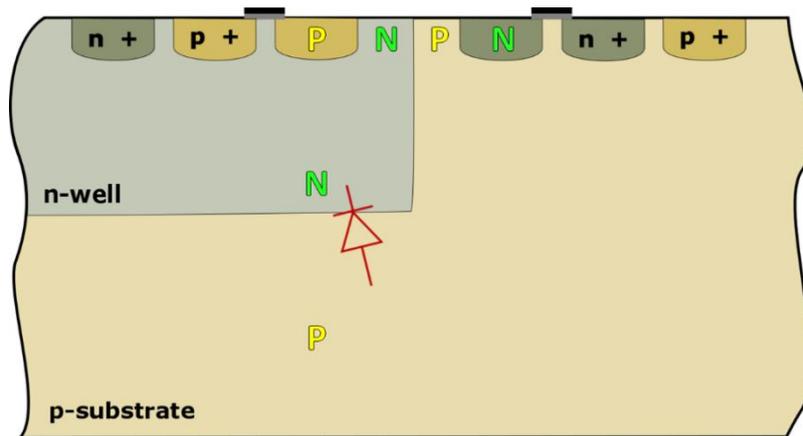


Abb. 4.4 Die zwei gekoppelten parasitären Transistoren npn und pnp entstehen durch den natürlichen Aufbau der CMOS Struktur

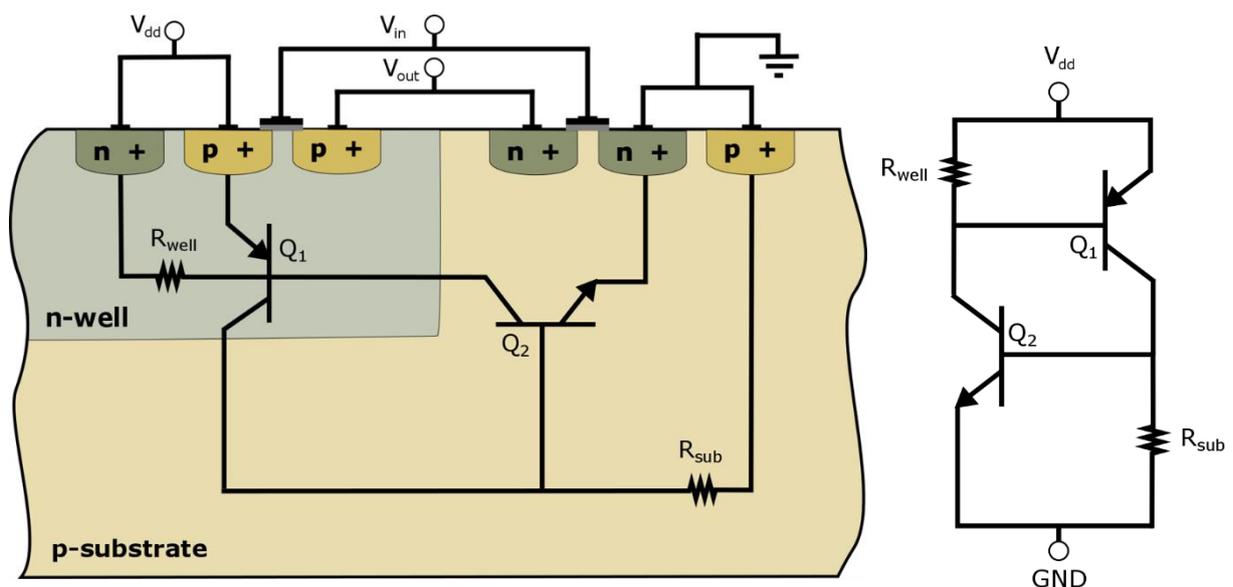


Abb. 4.3 Ersatzschaltbild in der CMOS-Struktur, nach /POL 17/

Um die Empfindlichkeit gegenüber SEE zu reduzieren bzw. immun gegen SEL zu machen wird die sog. Silicon-on-Insulator-Technik angewandt. SOI bezeichnet spezielle Isolierschichtfeld-effekttransistor bei denen eine isolierende Schicht eine dünne Siliziumschicht vom Substrat trennt und damit die Region in der Ladungen gesammelt werden können erheblich reduziert. Hiermit erreicht man eine Immunität gegen SEL. /HOL 07/

4.2.1.3 Single Event Gate Rupture (SEGR)

Beim Single Event Gate Rupture-Effekt führt das Auftreffen eines Ions zum Aufbrechen des Dielektrikums und kann zum Schmelzen der Gateelektrode und dem Vermischen des Dielektrikums mit der leitenden Schicht führen, was entweder einen Kurzschluss verursacht oder einen gleichrichtenden Kontakt herstellt. Zum ersten Mal entdeckte man Schädigungen durch SEGR in MNOS²⁵-Transistoren, die die Basis für lösch- und veränderbare Speicher vom Typ EAROM²⁶ sind /SEX 03/. Betroffen sind daneben Leistungs-MOSFETs, die sich im nichtleitenden Zustand befinden und somit eine hohe Spannung halten. Versuche zeigen jedoch, dass auch in gewöhnlichen MOS-Strukturen SEGR-Effekte auftreten können. In diesem Zustand kann zwischen der Gate- und der Sourceelektrode eine kleine und zwischen der Source- und der Drainelektrode eine große Potenzialdifferenz entstehen.

Ob ein SEGR-Effekt eintreten kann, hängt im Wesentlichen von zwei Größen ab. Dies sind zum einen das notwendige elektrische Feld, um das Oxid aufzubrechen, das sogenannte kritische elektrische Feld, und zum anderen das vorherrschende elektrische Feld im Oxid. Übersteigt das vorherrschende elektrische Feld das kritische Feld oder sinkt letzteres unterhalb ersteres, kann ein SEGR-Ereignis auftreten.

Beim kompletten Durchtreten des Gateoxids und der Epitaxieschicht durch ein Ion werden entlang der Teilchentrajektorie Elektron-Loch-Paare im Halbleiter gebildet. Der Vorgang wird durch Abb. 4.5 veranschaulicht. Bei den in der Abbildung vorherrschenden Verhältnissen wer-

²⁵ MNOS = metal-nitride-oxide semiconductor oder metal-nitride-oxide-silicon. Der Metallnitrid-Oxid-Halbleiter- oder Metallnitrid-Oxid-Silizium (MNOS)-Transistor ist eine Alternative und Ergänzung zur bestehenden MOS-Technologie, wobei als Isolation eine Nitrid-Oxidschicht verwendet wird. Er wird in nichtflüchtigen Computerspeichern verwendet.

²⁶ EAROM = erasable alterable read only memories.

den die Elektronen in das Substrat abgezogen, während die Löcher in Richtung des Übergangs zwischen Epitaxieschicht und Gateoxid gelangen. Dies hat zur Folge, dass sich in der Gateelektrode eine Spiegelladung bildet. Die positive Löcherladung sowie die negative Spiegelladung rekombinieren mit freien Elektronen bzw. Löchern des Oxids, die sich beim Durchgang des Ions gebildet haben. Durch das in die Oxidschicht fortschreitende Rekombinieren und das Nachfließen freier Ladungsträger kann ein leitender Kanal durch die Oxidschicht entstehen. Dieser führt zum Aufschmelzen der Oxidschicht und zum Vermischen mit der Siliziumschicht.

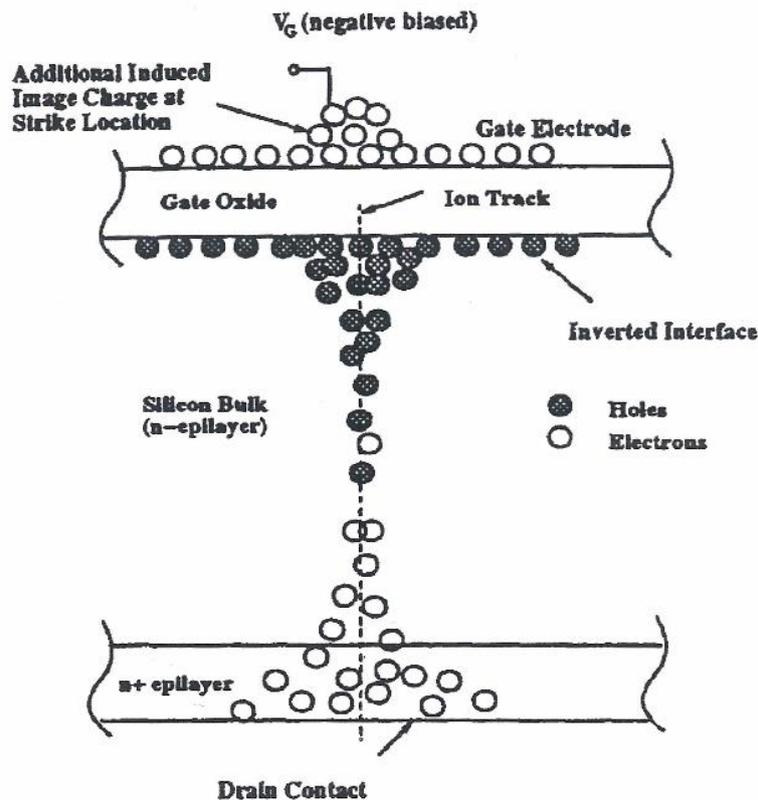


Abb. 4.5 Verteilung der Elektronen und Löcher nach einem Durchgang eines schweren Ions /SEX 03/

Einfluss auf die Sensitivität der Halbleiterkomponente bezüglich SEGR haben insbesondere der Eintrittswinkel des Ions und der Ort, an dem die Bildung der Elektron-Loch-Paare stattfindet. Mit größer werdendem Eintrittswinkel relativ zur Flächennormalen sinkt die Sensitivität, da sich dadurch die Löcher über einen größeren Bereich unterhalb des Oxids verteilen und die notwendige Feldstärke zum Durchbruch nicht aufgebaut werden kann. Wie bereits erwähnt, hat zudem das Verhältnis der Spannung zwischen Gate und Source U_{GS} und der zwischen Drain und Source U_{DS} einen entscheidenden Einfluss darauf, ob ein SEGR eintreten

kann. Abb. 4.6 zeigt, für welche Spannungen U_{GS} und U_{DS} für verschiedene chemische Elemente, die sich durch ihren jeweiligen LET unterscheiden, SEGR-Ereignisse auftreten. Die LET-Werte reichen hier von 3,4 MeV·cm²/mg bei F über 18,8 MeV cm²/mg bei Ti bis zu 82,2 MeV cm²/mg bei Au. In den Bereichen rechts unterhalb der jeweiligen Geraden tritt SEGR auf. Man erkennt hier die Zunahme der Sensitivität mit Erhöhung des LET-Wertes von Fluor zu Gold.

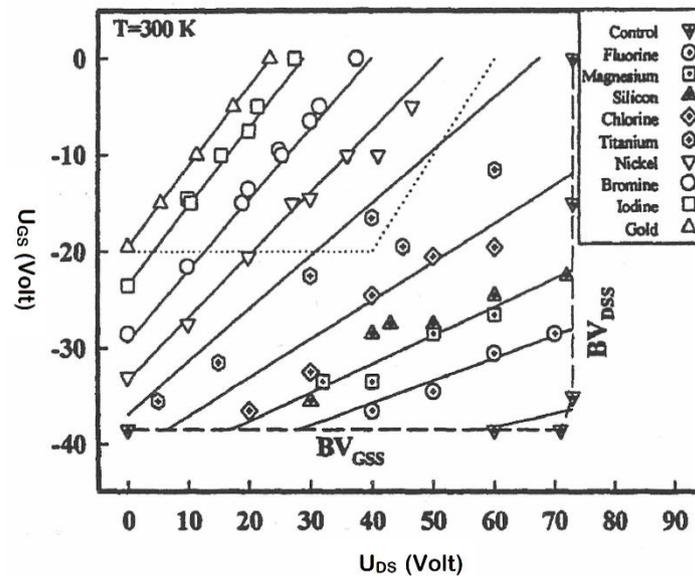


Abb. 4.6 Abhängigkeit des SEGR von der Gate- und Drain-Spannung für verschiedene chemische Elemente /SEX 03/

Härtungsmöglichkeiten gegen SEGR können ähnlich zu SOI bei SEL realisiert werden. Hierbei handelt es sich um sog. double stagger partial silicon-on-insulator (DPSOI) Schichten, welche das Bauteil weniger anfällig gegenüber SEGR macht. Diese Methode wird bei SEGR anfälligen Leistungs-MOSFETS verwendet. /TAN 17/

4.2.2 Temporäre Fehlermodi (Soft Errors)

Temporäre Zustandsänderungen, werden verursacht, wenn ein ionisierendes Teilchen auf ein Halbleiterbauteil trifft und durch die Wechselwirkung mit den Halbleiteratomen Elektron-Loch-Paare erzeugt, welche z. B. die in der Speicherzelle gespeicherten Informationen verändern. Die ionisierenden Teilchen können direkt aus radioaktiven Materialien im Bauteil selbst kommen, aus natürlicher Umgebungsstrahlung (zumeist kosmisch) oder aus erhöhter Umgebungsstrahlung wie im Kernkraftwerk stammen. /HUG 16/

Beispiele für Soft Errors sind:

- Single Event Upset (SEU):
Modifikation des elektronischen Zustandes in einer Speicherzelle (bspw. Bit-Flip).
/HUG 16/
- Multiple Cell Upset (MCU):
Die Zustandsänderung von zwei oder mehr Speicherzellen, die durch den Durchgang eines einzelnen Iones induziert wird. Die beschädigten Zellen sind in der Regel physikalisch benachbart. /ESCC 14/
- Multiple Bit Upset (MBU):
Modifikation in zwei oder mehr Bits im gleichen Wort. Es gibt drei Hauptkriterien für die Entstehung von Multi Bit Upsets:
(1) ein Auftreffwinkel des Teilchens, der es dem Partikel ermöglicht, mehrere Speicherzellen zu passieren;
(2) einen Durchmesser des Zylinders, in dem die Ladung erzeugt wird, der mehr Speicherzellen durchquert, so dass dort SEUs auftreten können;
(3) Speicherzellen, die durch die Produkte von Spallationsreaktionen²⁷vom Primärteilchen im Chip gestört werden. /HUG 16/, /JED 19/, /ESCC 14/
- Single-event Transient (SET):
Spannungsexkursion in einer integrierten Schaltung, die zu einer Fehlfunktion führt.
/HUG 16/
- Single Event Functional Interrupt (SEFI):
Der Verlust der Funktionalität in komplexen integrierten Schaltungen durch Störung von Steuerregistern oder Taktgebern wird als SEFI bezeichnet. Ein SEFI kann einen Fehlerschwall oder einen dauerhaften Verlust der Funktionalität verursachen. Im Allgemeinen ist ein SEFI nicht von einem Hochstromfall begleitet, der mit einem einzelnen Ereignis Latch-Up (SEL) verbunden ist. /HUG 16/

²⁷ Nichtelastische Wechselwirkung eines Atomkerns unter Beschuss mit hochenergetischen Teilchen (z. B. Protonen).

4.2.3 SEE-Abhängigkeit vom Schaltkreistyp und beeinflussende Größen

Eine Übersicht über die vorgestellten Single Event Effects und die jeweils anfälligen Bauteile sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Die Abhängigkeiten der Anfälligkeit bei Änderung von Bauteileigenschaften oder Umgebungseinflüssen sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tab. 4.1 Anfälligkeit für SEE in Abhängigkeit des Schaltkreistyps /HUG 16/

	Nicht destruktive SEE					Destruktive SEE		
	SEU	MBU	MCU	SEFI	SET	SEL	SEB	SEGR
Speicher	✓	✓	✓	✓	✓			
Logik (Latches ²⁸)	✓	✓	✓					
Kombinatorische Logik ²⁹				✓	✓	✓		
Mikroprozessoren	✓	✓	✓	✓				
Controller				✓				
Analoge und ge-					✓		✓	
Photonik-Komponente					✓			
FPGA	✓	✓	✓	✓		✓		
ASIC	✓	✓	✓			✓		
Power MOSFET				✓			✓	✓
Stromversorgung der Komponente					✓	✓		
Konverter	✓				✓	✓	✓	✓

²⁸ Elektronischer 1-Bit-Datenspeicher, z. B. ein zustandsgesteuertes Flipflop.

²⁹ Kombinatorische Schaltung aus einfachen Grundgattern wie z. B. UND, ODER, Inverter.

Tab. 4.2 Anfälligkeit für SEE nach Änderungen von Bauteileigenschaften oder Umgebungseinflüssen /HUG 16/

	Tendenz	Nicht destruktive SEE					Destruktive SEE		
		SEU	MBU	MCU	SEFI	SET	SEL	SEB	SEGR
Bauteilgröße	↘	↗				↗		↗	
Zelldichte	↗	↗	↗	↗					
Versorgungsspannung	↘	↗	↗					↗	
Schaltgeschwindigkeit	↗	↗							
Taktfrequenz	↗		↗						
Pulsweite der Transiente	↗					↗			
Unerwünschte Kopplung (Crosstalk)	↗		↗						
Temperatur	↘						↘	↗	
Geographische Höhe	↗							↗	

4.3 Total Ionizing Dose (TID)

Die Total Ionizing Dose (TID) ist die akkumulierte Energiedosis, die bei dem Durchgang ionisierender Strahlung durch ein Material von diesem absorbiert wird. Beim Durchgang von ionisierenden Teilchen werden im Halbleitermaterial und dem Gateoxid bei Feldeffekttransistoren, wie bei der MOS-Transistor-Technologie, entlang der Trajektorie des Teilchens Elektron-Loch-Paare gebildet. Die Menge der erzeugten Elektron-Loch-Paare hängt dabei von mehreren Material- und Teilcheneigenschaften ab. Durch die sich anschließenden Reaktionen der Elektronen und Löcher können im Gateoxid fixe Ladungen entstehen, die die Bandstruktur soweit beeinflussen, dass die elektronischen Eigenschaften wie Schaltzeiten, Rauschabstand oder Schaltspannung geändert werden und das Bauteil seine Funktion verliert.

Beim Erzeugen der Elektron-Loch-Paare überwinden die Elektronen die Bandlücke und treten aus dem Valenzband in das Leitungsband. Für Siliziumdioxid (SiO_2) beträgt dieser Abstand beispielsweise 18 eV. Dies ist im Vergleich zur insgesamt übertragenen Energie eines eintreffenden ionisierenden Teilchens sehr gering und führt daher zu einer hohen Anzahl an freierwandelnden Ladungsträgern im Gateoxid. Sofern keine Rekombinationen der Elektronen und Löcher stattfinden, werden die Elektronen bei Anlegen einer externen Spannung aus dem Gateoxid bewegt. Zurück bleiben die positiv geladenen Löcher, die im Gegensatz zu den Elektronen eine weitaus geringere Mobilität aufweisen. /HOL 02/

Die Bestrahlung des Gateoxids, das u. a. als Isolator zwischen der Elektrode und dem Halbleitermaterial dient, kann dabei zu folgenden Problemen führen:

- temporäre Absenkung der Barriereigenschaften,
- Wanderung der erzeugten Ladung und „Einfrieren“ beeinflusst die Leitfähigkeit,
- Störung von labilen Bindungen, oft an Übergängen, insbesondere Halbleiterübergängen.

Die Entwicklung eines beschreibenden Modells all dieser Phänomene stellt aufgrund der Diversität der Effekte, dem Einsatz verschiedener Materialien, vor allem bei Isolatoren, eine besondere Herausforderung dar und ist Gegenstand aktueller Forschung. /HOL 02/

4.3.1 TID-Effekte in MOS-Transistoren

Konsequenz einer fortschreitenden Bestrahlung in MOS-Transistoren ist ein zunehmender Verlust der Funktionalität des Bauteils, der bis zum Ausfall führen kann. Erkennbar ist dieser Funktionalitätsverlust durch Messung der Schwellspannung V_T . Diese gibt an, ab welchem Spannungswert am Gate U_{Gate} ein Strom I_{D-S} zwischen Drain und Source fließt. Mit zunehmender Bestrahlung des Transistors durch ionisierende Strahlung, bei der die oben beschriebenen TID-Effekte auftreten, verschiebt sich der Wert der Schwellspannung wie in Abb. 4.7 dargestellt in Richtung kleinerer Werte. Diese Verschiebung kann so weit reichen, dass ein Schalten des Transistors nicht mehr möglich ist und dieser ausfällt. Je nach Funktion des betroffenen Transistors oder der Anzahl der betroffenen Transistoren im Halbleiterbauteil führt dies zum Funktionsverlust. Aber auch vorher zeigen sich schon Leistungseinbußen in Abhängigkeit der Dosislevel (Schädigungsstufe) wie in Tabelle 4.3 dargestellt. Typische Werte, ab denen ein bestimmter Schädigungseffekt zu erwarten ist, stehen in der entsprechenden Spalte.

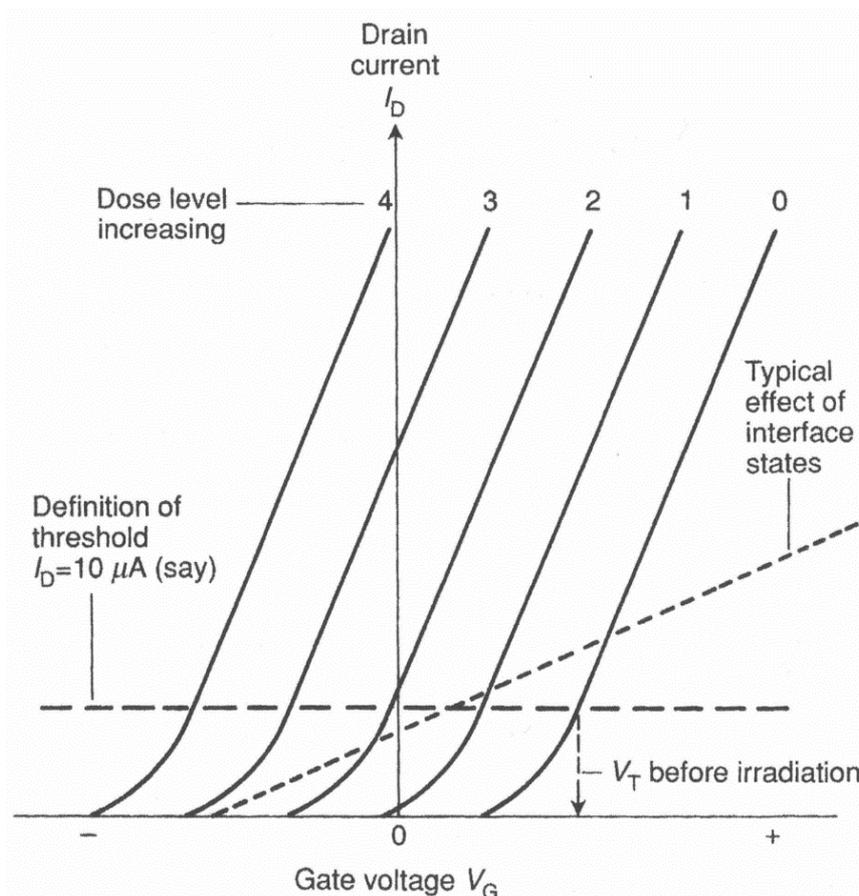


Abb. 4.7 NMOS: Fortschreitende Verschiebung der Schwellspannung durch Erhöhung des Dosislevels /HOL 02/

Tab. 4.3 Schädigungseffekte durch TID-Effekte /HOL 02/

Dosislevel in Abb. 4.7	Hauptschädigungseffekt	Typische Werte eines CMOS LSI ³⁰ in Silizium	
		Dosis in rad	$-\Delta V_T(V)$
1	Verminderte Rauschunterdrückung, mögliche Verringerung der Schaltgeschwindigkeit, Bauteil außerhalb der Spezifikationen	8×10^2	0,2
2	Leichter Anstieg des Ruhestroms	5×10^3	1
3	Verringerung der Schaltgeschwindigkeit	1×10^4	2
4	Wechsel des Logikwertes nicht mehr möglich	3×10^4	4

4.4 Versetzungsschäden

Bei Versetzungsschäden handelt es sich um Langzeiteffekte im Kristallgitter durch Strahlungseinfluss, insbesondere durch Protonen, Neutronen, Elektronen und schwere Ionen. Energetische Teilchen können in Halbleitermaterialien Schäden verursachen, indem sie Atome im Kristallgitter als Folge von elastischen und inelastischen Stößen versetzen. Hierbei erfolgt der

³⁰ LSI = Large-Scale Integration. Integrationsdichte mit einigen tausend Transistoren pro Chip.

Energieverlust durch Coulomb- (elastische), nukleare elastische und nukleare inelastische Wechselwirkung, wodurch Versetzungsschäden und Phononen (Gitterschwingungen) entstehen. Defekte in der Periodizität der Kristallstruktur verursachen Veränderungen der Energieniveaus in der Bandlücke von Halbleitern, was wiederum die optischen und elektrischen Eigenschaften verändert. /NSR 15/

Sogenannte Frenkeldefekte sind Punktfehler im Kristallgitter, welche in Abb. 4.8 dargestellt sind. Aus dem Kristallgitter (grüne und graue Atome) schlägt das energetische Teilchen ein Atom heraus. Dieses Atom kann einen freien Platz im Atomgitter einnehmen (Leerstelle, leerer grauer Kasten), als Zwischengitteratom im Kristall verbleiben (graueres Atom mit Kasten) oder auch bei ausreichender Energie den Kristall komplett verlassen. Das Paar aus entstandener Leerstelle im Kristall und dem von dort herausgeschlagenem Atom, welches als Zwischengitteratom verblieben ist, nennt man Frenkelpaar.

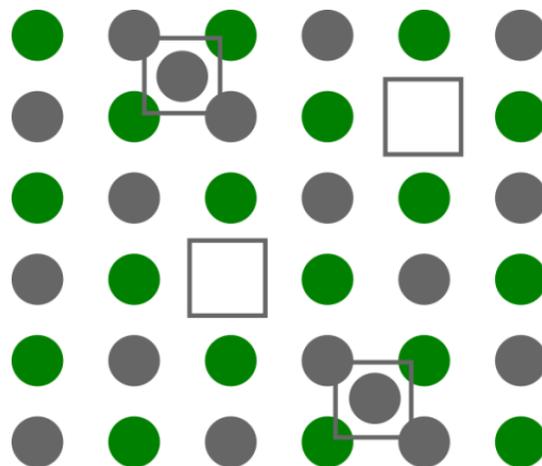


Abb. 4.8 Frenkeldefekte im Kristallgitter. Zweidimensionales Atomgitter bestehend aus grünen und grauen Atomen. Zwischengitterplätze (grauer Kasten mit Atom) und verbleibende Leerstellen (leerer grauer Kasten) entstehen nach Energieübertrag von energiereichem Teilchen auf ein Atom des Kristallgitters, welches von seinem Platz gestoßen wurde

Besonders bei höheren Teilchenenergien kommt es beim Teilchendurchtritt zu sog. Schadensclustern im Kristall. Die herausgeschlagenen Atome haben dann ausreichend Energie, um auf ihrem Weg durch den Kristall weitere Atome herauszuschlagen, die wiederum zu Schäden im Kristallgitter führen. Auf diese Weise entsteht eine räumliche Anhäufung von Versetzungsdefekten. /NSR 15/

Effekte durch Versetzungsschäden in Halbleitern sind u. a.

- verminderte Lebenszeit der Minoritätsladungsträger³¹,
- erhöhter Leckstrom durch Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren,
- verringerte Stromverstärkung in Bipolartransistoren durch Rekombinationszentren für Elektron-Loch-Paare,
- Erhöhung des Sperrstroms am pn-Übergang durch das Tunneln von Elektronen aufgrund der Zwischenenergieniveaus,
- Verringerung der Mobilität der Ladungsträger aufgrund der Erzeugung von Streuzentren,
- Beeinflussung der Ladungsträgerdichte und -mobilität.

4.5 Total Non-Ionizing Dose (TNID)

TNID (Total Non-Ionizing Dose, auch Displacement Damage Dose (DDD)) ist die deponierte Energie pro Masse, die Versetzungsschäden verursacht. Ein Großteil der einfallenden kinetischen Energie verursacht Ionisation und damit SEE und TID in Halbleiterbauteilen. Nur ein kleiner Teil (weniger als 0,1 %) der Energie bewirkt, dass Atome aus ihren Gitterstellen geschlagen werden und verursacht somit Versetzungsschäden. Besonders anfällig für die Beeinträchtigung durch Versetzungsschäden sind optoelektronische Komponenten wie CCDs³² und Optokoppler³³. /YAN 09/, /FRAU 19/

Die Berechnung der TNID erfolgt über den sog. NIEL (non-ionizing energy loss). Der NIEL wird durch den Anteil der deponierten Energie gegeben, der in Versetzungsprozesse eingeht. NIEL wird in Energie pro Weglänge ausgedrückt, normalerweise in MeV/cm oder in MeVcm²/g, wenn er durch die Massendichte ρ des Materials dividiert wird. /YAN 09/, /FRA 19/

³¹ Minoritätsladungsträger kommen bei einem dotierten Halbleiter seltener vor als Majoritätsladungsträger. Bei einer n-Dotierung sind die Elektronen die Majoritätsladungsträger und die Löcher (Defektelektronen) die Minoritätsladungsträger.

³² CCD = Charge-coupled device.

³³ Bei einem Optokoppler handelt es sich um ein optoelektronisches Bauteil, um Signale galvanisch getrennt zu übertragen (Lichtsender, Lichtempfänger).

Für den einfachsten Fall, für den man NIEL als konstant über das Halbleitermaterial annehmen kann und Φ der Teilchenfluss ist, ergibt sich die Relation

$$TNID = \frac{\Phi \cdot NIEL}{\rho}. \quad (4.1)$$

4.6 Strahlungseffekte bei Speicherbausteinen und Mitigationsmöglichkeiten

Nachdem in den Unterkapiteln 4.1 bis 4.5 die Grundprinzipien strahlungsinduzierter Effekte bei Halbleiterbauteilen allgemein erläutert wurden, sollen in diesem Kapitel die Auswirkungen dieser strahlungsinduzierten Effekte auf Speicherbausteine im Speziellen dargestellt werden.

4.6.1 Strahlungseffekte bei SRAM- und DRAM-Speichern

In den späten 70er Jahren kam es zu unerwarteten Ausfällen in 16 kB großen DRAMs. Dabei ging gespeicherte Information einzelner Bits verloren, obwohl die Zellen an sich nicht physikalisch zerstört wurden. Die Zellen ließen sich nach einem Fehler wieder normal beschreiben und behielten ihre vorgesehene Information. Diese Ausfälle wurden daher als Soft Errors bezeichnet. /GAW 14/

May et al. /MAY 79/ konnten nachweisen, dass Alphateilchen und die durch sie verursachten Ladungen im Bauelement für diese Ausfälle verantwortlich waren. Dabei stammten die Alphateilchen aus radioaktiven Verunreinigungen in Gehäuse- und Prozessmaterialien, welche bei ihrem Zerfall die Alphastrahlung freisetzen. /BAU 05/, /GAW 14/

4.6.2 Strahlungseffekte bei Flash-Speichern

Im Vergleich zu SRAMs oder DRAMs reagieren Flash-Speicher nicht so empfindlich auf SEEs mit Datenverlust oder Bit-Störungen. Je nach Betriebsart wurden während der Strahlenexposition unterschiedliche Funktionsstörungen festgestellt. Beispielsweise können bei Weltraummissionen direkte Stöße von galaktischen kosmischen Strahlen (GCR) und Protonen von einer Sonneneruption interne Schaltungen stören. Diese Störungen können zu einer fehlerhaften Lese- oder Schreiboperation führen oder sogar dazu, dass das Gerät erst nach einem Aus- und Wiedereinschalten wieder funktioniert. /FAR 08/

Aufgrund eines sich verschiebenden Spannungsschwellenwerts in Floating-Gate-Zellen, der durch die TID verursacht wird, sind MLC-Flash-Speicher anfälliger für Bit-Fehler als SLC. Solche hochskalierten Flash-Speicher sind auch eher anfällig für Single-Event-Upsets, die Verschiebungen im Schwellenspannungsprofil einer oder mehrerer Speicherzellen verursachen (Mehrbit-Störung). Abhängig von der Bit-Anzahl, die innerhalb einer Zelle dargestellt werden, kann so eine variierende Datenmenge durch eine SEU beschädigt werden. Maßnahmen müssen daher mehr als einzelne Bitverfälschungen innerhalb eines gegebenen Wortes ausgleichen. Eine höhere Umgebungstemperatur erhöht auch den Leckstrom des Siliziums und entlädt das Floating-Gate des SLC- und des MLC-Flashs mit der Zeit. Somit müssen zusätzlich zu Maßnahmen zur Behandlung einer strahlungsbedingten Degradation von Flashspeichern geeignete Gegenmaßnahmen gegen Effekte durch die Umgebungstemperatur vorgesehen werden. /FUC 15/

4.6.3 Fehlerkorrektur bei Speicherelementen

In strahlungstoleranten Speicherbausteinen können Daten bis zu einem gewissen Grad korrigiert werden.

Redundante Speicherzellen erlauben den Einsatz einer Fehlerkorrektur mit Hilfe von sog. Error Correction Codes (ECC). Typische ECC können Ein-Bit-Ausfälle in einem Datenwort korrigieren und Doppelfehler erkennen, aber nicht mehr beheben. Verwendete Codes sind z. B. der Reed Solomon Blockcode oder der Hamming Code. /DIE 07/ Bei einer nutzbaren Datenbusbreite von 64 Bit werden hierfür 8 zusätzliche Bits benötigt. Dies entspräche einem Flächenanteil von 12,5 %. Da bei den üblichen ECCs nur Einzelfehler korrigiert werden, sind Mehrfachfehler in einem Datenwort auf jeden Fall zu vermeiden. Eine einfache Methode, um Multi-Bit-Upsets, also Mehrfachfehler in einem Datenwort, zu vermeiden, ist das Verschränken (Interleaving). Benachbarte Bits werden durch eine entsprechende Verdrahtung logisch voneinander getrennt. Physikalisch benachbarte Bits liegen damit nicht mehr im gleichen Datenwort /GEO 08/, /GAW 14/

Beim Memory Scrubbing werden periodisch alle Speicherzellen unter Verwendung der Fehlerkorrektur gelesen und sofort wieder zurückgeschrieben. Es ist das Ziel, in einem Datenwort einen Fehler zu korrigieren, bevor sich dieser mit einem neuen Ereignis zu einem nicht korrigierbaren Fehler akkumuliert. /DIE 07/

Sind die Zugriffe auf den jeweiligen Speicher selten und ihre Zugriffsgeschwindigkeit von geringer Bedeutung, kann die Fehlerkorrektur auch in der Software durchgeführt werden. Dieses ist häufig bei nichtflüchtigen Programm- oder Parameterspeichern z. B. bei PROM, EEPROM oder Flash-Speichern der Fall. Auch hier basiert die Fehlerkorrektur auf der Ausnutzung der gespeicherten Redundanz. Es ist üblich, selten verwendeten Speicher mit einem Schalter zu versehen und bei Nichtbenutzung von der Versorgungsspannung abzutrennen, was die SEE-Suszeptibilität verringert. /DIE 07/

4.6.4 Strahlungseffekte bei FPGAs

2005 bestätigte eine unabhängige Studie /EET 05/ die Immunität von FPGAs des Herstellers Actel³⁴ gegen Alphastrahlung. Im Rahmen dieser Studie wurden mehrere FPGA-Typen mit flüchtigen und nichtflüchtigen Speichertechnologien einem Beschuss mit Alphastrahlung ausgesetzt und die dabei entstandenen Fehler gemessen. Die Testergebnisse zeigten, dass bei nichtflüchtigen Flash- und Antifuse³⁵-FPGAs von Actel keine Ausfälle festgestellt wurden, während es bei flüchtigen FPGAs mit SRAM-Zellen von der Hersteller Altera und Xilinx zu Konfigurationsupsets kam. Untersucht wurden FPGAs der Serie Virtex-II und Spartan-3 in SRAM-Technologie von Altera und flashbasierte FPGAs der Serie ProASIC-Plus und Axcelerator in Antifuse-Technologie des Herstellers Actel. Die Tests zeigten, dass beim Beschuss von Antifuse- und Flash-FPGAs mit Alphastrahlung keine Konfigurationsdaten beschädigt wurden, während bei den SRAM-FPGAs pro 1 Million Gatter bis zu 260 Funktionsausfälle (FIT = 1 Ausfall in 10^9 Stunden) entstanden. /EET 05/

2012 brachte der Hersteller Microsemi eine RT-ProASIC3 FPGA-Serie mit einem Keramikgehäuse vom Typ CQFP auf den Markt. Dieses Gehäuse sorgt bei Raumfahrtanwendungen für Strahlungstoleranz und eignet sich zudem für extreme thermische Belastungen. Gegenüber SRAM-basierten FPGAs und ASICs nutzt die RT-ProASIC3-Serie Flashzellen, um Konfigurationsinformationen zu speichern. Flashzellen zeigen bei Strahlungseinwirkung keine SEEs. /ELE 12/

³⁴ Actel wurde 2010 von Microsemi übernommen.

³⁵ Bei Antifuses wird die Isolationsschicht irreversibel durchgebrannt, wobei eine niederohmige Verbindung entsteht. Dies ist die inverse Arbeitsweise zu Fuses (Sicherungen).

Vom Hersteller Xilinx werden in Abhängigkeit vom zu schützenden Element (Konfigurationspeicher, BlockRAM, ...) verschiedene Wege zur Minimierung strahlungsbedingter Fehler empfohlen. Die dort angegebenen Maßnahmen zur Reduzierung der Strahlungsempfindlichkeit basieren bei Logik im Wesentlichen auf TMR³⁶-Konzepten. Um Fehler in der Konfiguration abzufangen, wird ein Modul dreifach parallel ausgeführt und dessen Ausgänge mit einem Entscheider (Voter) verbunden. Dieser Voter kann selbst dreifach aufgebaut sein und liefert das richtige Ergebnis, solange nur einer der drei Teilmodule von einem Fehler betroffen ist. Das TMR-Design zusammen mit einem periodischen Auffrischen der Konfiguration (Scrubbing), soll gewährleisten, dass ein sicheres System aufgebaut werden kann. Die Nachteile dieser Maßnahmen sind ein möglicher Anstieg des Ressourcenverbrauchs auf mehr als das Dreifache, ein starker Anstieg des Leistungsverbrauchs sowie eine geringere Performanz aufgrund längerer Signallaufzeiten. /DIE 07/

4.6.5 Zusammenfassung

Insbesondere flüchtige Speicher sind anfällig für Speicheränderungen verursacht durch Single Event Effects und den zur Zerstörung des Speichers führende Single Event Latch-Up. Flash-Speicher hingegen sind weniger anfällig für Single Event Effects, allerdings hat die Total Ionizing Dose als Langzeiteffekt, aufgrund des verwendeten Floating Gates, einen erheblichen Einfluss auf den Flashes.

Traditionell werden Einzelbitfehlerkorrektur, Abschirmung, spezialisierte Herstellungstechniken, grobe Strukturbreite und Redundanz kombiniert. /FUC 15/ Beispielsweise werden beim beschriebenen Memory Scrubbing Redundanz und Fehlerkorrekturcodes kombiniert.

Bei den Langzeitschäden ist die Total Ionizing Dose deutlich dominierend gegenüber den Versetzungsschäden, weshalb die Versetzungsschäden hier nicht gesondert erwähnt werden.

Welche Speichertechnologie und welches Fehlerkorrekturverfahren eingesetzt werden soll hängt stark von den herrschenden oder zu erwartenden Bedingungen ab sowie von dem vor-

³⁶ TMR = Triple Modular Redundancy.

handenen Platz und den Anforderungen an das Bauteil bzw. System selbst. Die Einsatzbedingungen, auch über längere Zeit, müssen bekannt sein. Dies gilt insbesondere bei TID anfälligen Speichern wie dem Flash-Speicher.

5 Laboruntersuchungen und Simulationen

In diesem Kapitel sollen wesentliche, international angewandte Testmethoden, die Auswertung von Daten aus Datenbanken sowie Simulationsmethoden zur Untersuchung von Strahlungseffekten an Halbleiterbauteilen vorgestellt werden.

5.1 Laboruntersuchungen und Testmethoden

5.1.1 Bestrahlungsexperimente mit Schwerionen, Protonen und Neutronen

In Beschleunigerexperimenten werden Tests mit Schwerionen, Protonen und Neutronen am Bauteil durchgeführt. Hierzu werden die zu testenden Bauteile auf Boards angebracht und unter Einsatzbedingungen bestrahlt. Die Einsatzbedingungen des Bauteils können durch spezielle Experimentieraufbauten am Messplatz selbst simuliert werden. Hierbei kann die Temperaturabhängigkeit des SEL beispielsweise dadurch gemessen werden, dass Heißluftgeräte die Bauteile auf eine definierte Temperatur erwärmen. Es stehen weltweit verschiedene Testeinrichtungen zur Verfügung. Die passende Einrichtung muss nach den späteren Einsatzbedingungen des Bauteils gewählt werden. /LAN 19/

Als Beispiel wird hier die Bestrahlungsmöglichkeiten am Los Alamos National Laboratory, USA beschrieben. Diese bietet Neutronen- und Protonenstrahlen für die Grundlagen-, Industrie- und Verteidigungsforschung. Am Linearbeschleuniger des Los Alamos Neutron Science Center (LANSCE) werden Neutronenstrahlen mit Energien im Bereich von ca. 0,1 MeV bis mehr als 600 MeV erzeugt, indem ein Protonenstrahl mit einer Energie bis 800 MeV auf eine unmoderierete Wolframpallationsquelle gerichtet wird. An einer anderen Stelle können Proben dem Protonenstrahl direkt ausgesetzt werden. An drei weiteren Bestrahlungsplätzen reicht die Energie der erzeugten Neutronen von subthermal bis etwa 500 keV. /LAN 19/, /NAP 18/

5.1.2 Messungen mit fokussierten, gepulste Laserstrahlen

Ein Laserpuls verursacht die Entstehung von Elektron-Loch-Paaren und damit von Störströmen im Halbleiter. Mit dieser Methode erhält man eine orts aufgelöste Information über die SEE-Sensitivität, da das Bauteil mit dem Laser Stück für Stück gescannt werden kann. /NAV 19/, /NAS 17/

Hierbei wird ein auf das Bauteil fokussierter gepulster Laserstrahl, mit Pulslängen im Piko- oder Femtosekundenbereich verwendet, um SEE-Wirkungsquerschnitte als Funktion der linearen Energieübertragung (LET) zu messen. Übertragungsfunktionen wandeln die LET-basierten Wirkungsquerschnitte in SEE-Raten um. Bei SEE-Tests im Naval Research Laboratory³⁷ werden beispielsweise Laser mit einer Wellenlänge von 590 nm und Pulsen von 1 ps eingesetzt. Durch die kontinuierliche Variation der Energie können äquivalente LET von weniger als 1 MeV cm²/mg bis über 500 MeV cm²/mg erreicht werden. /NAV 19/, /NAS 17/

Der Ansatz kann als kostengünstigere Alternative zur Bestrahlung am Beschleuniger eingesetzt werden, besonders die hohe Ortsauflösung ist ein Vorteil dieser Messmethode. Probleme dieser Methode sind u. a. die deutlich geringere Eindringtiefe als z. B. beim Test mit Teilchenbestrahlung. /NAV 19/

5.1.3 Fehlerinjektionsverfahren

In Fehlerinjektionsverfahren werden künstlich erzeugte Bit-Flips injiziert. Die Bit-Flips werden gleichzeitig mit der Ausführung eines bestimmten Programms durch Soft- und / oder Hardwaresysteme injiziert. Damit lässt sich t_{inj} ableiten, welches sich aus der Anzahl der erkannten Fehler im ausgeführten Programm dividiert durch die Anzahl der injizierten Bit-Flips ergibt:

$$t_{inj} = \frac{\# \text{ erkannte Fehler}}{\# \text{ injizierte Bit Flips}} \quad (5.1)$$

t_{inj} kann interpretiert werden als die durchschnittliche Anzahl von Bit-Flips, die benötigt werden um einen solchen Fehler zu verursachen. Man erhält die Wahrscheinlichkeit der Single Event Upsets, indem man den Wirkungsquerschnitt σ_{SEU} mit t_{inj} multipliziert:

$$t_{SEU} = \sigma_{SEU} \cdot t_{inj} \quad (5.2)$$

³⁷ Das Naval Research Laboratory ist ein Forschungslabor der United States Navy und des United States Marine Corps. Der Hauptcampus befindet sich in Washington D.C., U.S.A.

Die Aussagekraft des Verfahrens hängt jedoch mit seiner Fähigkeit zusammen, alle kritischen Knoten der Schaltung zu erreichen und einen Fehler präzise zu injizieren. /NAS 10/, /HUG 16/

5.1.4 Internationale Datenbanken

International werden eine große Anzahl und Vielfalt an Experimenten durchgeführt. Beispielfähig wird hier die öffentlich zugängliche Radiation Data Base des NASA Goddard Space Flight Center vorgestellt, welche viele Laboruntersuchungen von Bauteilen zu SEE und TID enthält.

Radiation Effects & Analysis

RADHOME RADIATION PHYSICS OFFICE GSFC RADIATION EFFECTS FACILITY

OVERVIEW BACKGROUND TEST DATA PUBLICATIONS FLIGHT DATA OTHER LINKS

GSFC Radiation Data Base

This data base contains only NASA Goddard Space Flight Center radiation test data. Links to other sources for data are listed below.

To use this data base, enter search term(s) in the fields below each column in the table, otherwise all documents will be shown by default. To view the test report(s), double click on any row displayed in the table.

Results may be sorted by one column at a time but search terms can be present in any or all columns. All searches are treated as case-insensitive.

Part Number	Function	Manufacturer	Date(s)	File(s)	Test Type	Category
ISC 9803	Standard 640 and custom QW...	Indigo Systems (9803) and NA...	UCD08NOV	D111908_TIRS-QWIP_Indigo-... nsrec09_W12_SEE.pdf	SEE	CMOS
G FLX L9A0443	0.11 µm CMOS	LSI Logic	11/2005	nsrec06_W2.pdf	TID	Research Test Vehicle
G FLX Logic Chip Test Vehicle	0.11 µm CMOS, Bulk & Epi Log...	LSI Logic	8/8/2005	T080805_Gfix_Qchip.pdf nsrec06_W4.pdf	SEE	CMOS
G FLX SRAM Test Chip	0.11µm CMOS; Bulk & Epi 4Mb...	LSI Logic	8/8/2005	T080805_Gfix_SRAM.pdf nsrec06_W4.pdf	SEE	CMOS
Test Parts - Shift Register	0.13µm CMOS bulk shift register	IBM	6/16/2005	B061605_RHBD.pdf nsrec06_W4.pdf	SEE	CMOS
RTAX-S	0.15µm CMOS FPGA	Actel	11/4/2005	T110405_RTAX.pdf nsrec06_W4.pdf T110405_RTAX_V2.pdf nsrec07_W27_SEE.pdf	SEE	FPGA
Eclipse FPGA	0.25µm CMOS shift register	Aeroflex	2/22/2005	T022205_Aeroflex_Eclipse.pdf nsrec06_W4.pdf T022205_Aeroflex_Eclipse_V2.pdf nsrec08_W3_SEE.pdf	SEE	FPGA
RTXSU	0.25µm CMOS FPGA	Actel	11/3/2005	T110305_RTXSU.pdf nsrec06_W4.pdf	SEE	FPGA
Unknown 0.5 µm CMOS ROIC	0.5 µm CMOS ReadOut Integra...	Manufacturer unavailable	VdG2008SEP	nsrec2010_W22_TID.pdf	TID	CMOS
NAND01GW3B2ANGE	1 Gb Micro Flash	ST Microelectronics	7/27/2006;7/27/2007;5/2006	I072706_NAND01GW3B2ANGE... L012707_AND01GW3B2ANGE.pc nsrec07_W27_SEE.pdf G06MAY_NAND01GW3B2ANGE_N nsrec07_W26_TID.pdf	SEE;TID	Memory

Abb. 5.1 Strahlungsdatenbank für Bauteile des NASA Goddard Space Flight Center. /RDB 19/

Über die Datenbank können verschiedene Testberichte aufgerufen werden, dort sind Details über die Tests, Testparameter, Bauteile, Hersteller sowie die Testergebnisse vermerkt. Die verschiedenen aufgetretenen Fehler werden diskutiert und es sind detaillierte Informationen über die Parameter beim Auftreten der Fehler vorhanden (z. B. LET). /RDB 19/

Auf internationalen Konferenzen wie z. B. der U.S. amerikanischen IEEE³⁸ NSREC³⁹ werden jährlich neue Bauteiltests vorgestellt und neue Testmethoden diskutiert, welche auch teilweise in den Datenbanken oder online zur Verfügung stehen.

5.2 Simulationen

Nach ersten Beobachtungen von Single Event Effects waren Simulationen von Single Event Effects entscheidend für das Verständnis der Mechanismen von SEE und für die Entwicklung von Mitigationmethoden. Vollständige 3D-Simulatoren wurden erstmals 1980 in der Literatur erwähnt, und einige der frühen Arbeiten zur 3D-Simulation wurden durch Probleme der Zuverlässigkeit von Halbleiterbauteilen aufgrund der Einflüsse von Alphateilchen motiviert. Heute stehen verschiedene, sehr umfangreiche Simulationsprogramme basierend auf Monte-Carlo-Simulationen zur Verfügung. Hier ist beispielhaft das Toolkit Geant zu nennen Geant (**Geometry and Tracking**) ist ein komplexes Toolkit zur Simulation des Durchgangs von Teilchen durch Materie mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen. Zu den Anwendungsgebieten gehören die Hochenergie-, Kern- und Beschleunigerphysik sowie Studien in der Medizin und Weltraumforschung. Das Toolkit wird in internationaler Zusammenarbeit, die aus einer Reihe von kooperierenden Instituten und Universitäten besteht, weiterentwickelt und gepflegt. Geant findet u. a. bei vielen Experimenten des CERN oder Fermilab Anwendung.

Weiterhin existiert die viel verwendete Programmgruppe „Stopping and Range of Ions in Matter“, welche nachfolgend beispielhaft beschrieben wird.

5.3 Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) und Transport of Ions in Matter (TRIM)

Die Programmgruppe **Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM)** wurde erstmals 1983 von J. F. Ziegler und J. P. Biersack entwickelt. Für die Simulation wird das Teilprogramm **Transport of Ions in Matter (TRIM)** verwendet. Beispielhaft werden Simulationen mit dieser Software im Folgenden vorgestellt.

³⁸ IEEE = Institute of Electrical and Electronics Engineers. Weltweiter Berufsverband von Ingenieuren zumeist aus der Elektrotechnik.

³⁹ NSREC = Nuclear and Space Radiation Effects Conference.

SRIM verwendet quantenmechanische Ansätze zur Berechnung von Kollisionen zwischen Ionen und Atomen unter der Annahme linearer Stoßkaskaden. Hierbei werden auch Korrelationswechselwirkungen zwischen überlappenden Elektronenhüllen und Anregungen von Elektronen durch das Ion berücksichtigt. TRIM kann die Berechnung der Monte-Carlo-Stoßkaskaden mit bis zu 8-schichtigen, verschiedenen Targets durchführen. Es wird nicht nur die finale 3D-Verteilung der Ionen berechnet, sondern auch kinetische Phänomene während des Energieübertrags wie Targetschädigung, -zerstäubung, -ionisierung und die Erzeugung von Phononen. Das Target wird dabei als amorph betrachtet, eine Beeinflussung der Berechnung durch Effekte einer geordneten Kristallstruktur wie z. B. das Channeling⁴⁰ kommen nicht vor. /SRI 19/

Zur Abschätzung der Fehlstellenzahl wird im vorliegenden Simulationsprogramm das sog. Kinchin-Pease-Modell verwendet, siehe Formel 5.3 und Abb. 5.2. Die Energie des einfallenden Ions, die zur möglichen Hervorrufung von Versetzungsschäden zur Verfügung steht wird als primary knock-on atom-Energie T (PKA-Energie) bezeichnet. Ist T kleiner als die Energie E_d , die ein Ion benötigt, um ein Gitteratom von seinem Platz zu schlagen, so erfolgt kein Versetzungsschaden. Ist die Energie $E_d < T < 2E_d$ kommt es zu genau einem Versetzungsschaden, da die verbleibende Energie nicht für ein weiteres Herausschlagen eines Gitteratoms ausreicht. Bei Energiewerten $T > 2E_d$ kommt es zu einem Anwachsen der Anzahl herausgeschlagener Gitteratome $v(T)$, siehe Abb. 5.2. /OECD 15/

$$v(T) = \begin{cases} 0, & T < E_d \\ 1, & E_d < T < 2E_d \\ \frac{T}{2E_d}, & 2E_d < T < \infty \end{cases} \quad (5.3)$$

⁴⁰ Channelling ist der Prozess, der den Weg eines geladenen Teilchens in einem kristallinen Feststoff einschränkt. Wenn die Richtung eines geladenen Teilchens, das auf die Oberfläche eines Einkristalls trifft, nahe an einer Hauptkristallrichtung liegt, wird das Teilchen mit hoher Wahrscheinlichkeit nur einer Kleinwinkelstreuung unterliegen, wenn es durch den Kristall hindurchgeht und somit im gleichen Kristallkanal verbleibt. Wenn sie sich nicht in einer Hauptkristallrichtung oder -ebene befindet, ist die Wahrscheinlichkeit einer Großwinkelstreuung viel höher, und daher ist ihre endgültige mittlere Eindringtiefe wahrscheinlich deutlich kürzer.

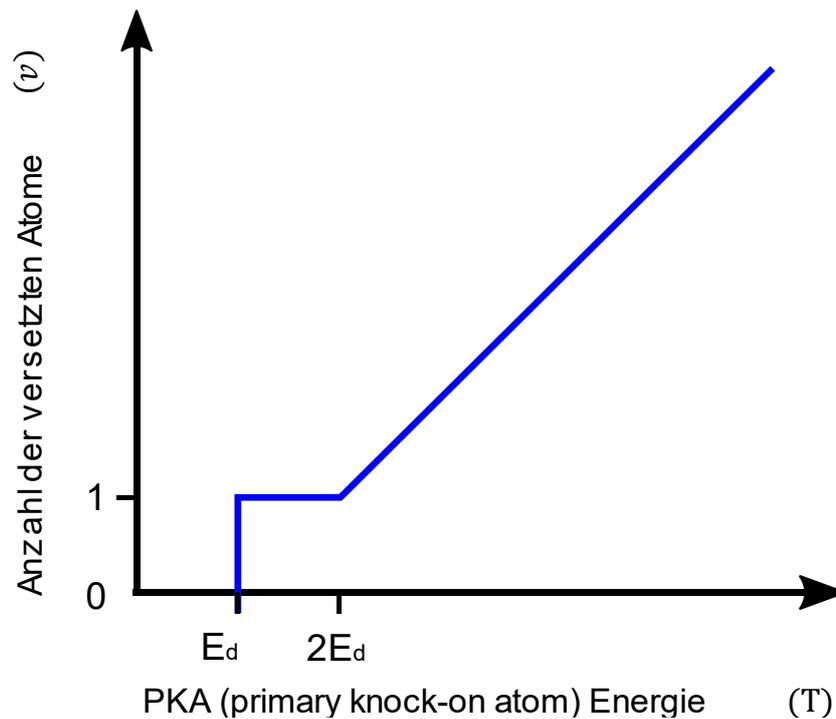


Abb. 5.2 Anzahl der versetzten Atome in Abhängigkeit der sog. PKA (primary knock-on atom) Energie T nach dem Kinchin-Pease-Modell /OECD 15/

In TRIM können zunächst verschiedene Eingaben zu den Ionen gemacht werden, mit denen das Target anschließend beschossen werden soll. Auch hier kann man aus einer Vielzahl von hinterlegten Daten wählen oder eigene Werte für die Parameter eintragen. Bei der Berechnung des Schadens können auch Neutronen oder Photonen als Beschussteilchen gewählt werden, allerdings müssen diverse Daten hierfür erst hinterlegt werden, um die Berechnung durchführen zu können. Diese sind in TRIM standardmäßig nicht enthalten. /SRI 19/

Die Schichten des Targets werden nachfolgend definiert. Auch hier stellt TRIM bereits viele Daten zur Verfügung, welche u. a. die Werte für gängige Materialien enthalten. Auf diese Weise können Schichten aus z. B. Polymeren oder Gasen erstellt werden. Ein Teil der hinterlegten Materialien ist in Abb. 5.4 dargestellt. Das Programm enthält auch eine Möglichkeit, Tabellen zur Reichweite der Ionen im gewählten Targetmaterial bei gewünschten Energien auszugeben. Dies ist für die Ionenimplantation notwendig. Diverse Materialparameter sind dabei bereits im Programm hinterlegt. Aus einem Periodensystem können die Materialien gewählt werden, siehe Abb. 5.3.

Die Darstellung ist nach verschiedenen Ebenen in 2D und 3D möglich. Eine Übersicht der laufenden Simulation ist in Abb. 5.5 dargestellt.

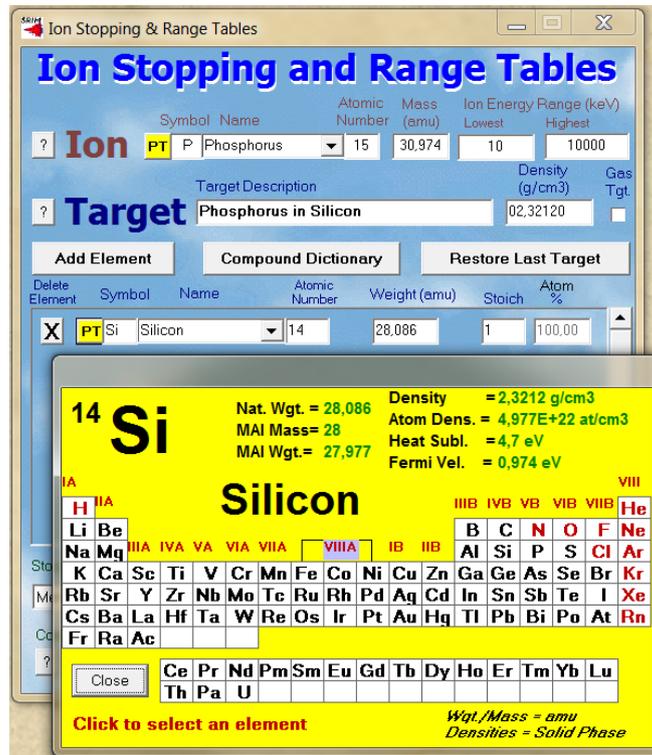


Abb. 5.3 SRIM/TRIM 2013, Auswahl des Targetmaterials aus dem Periodensystem

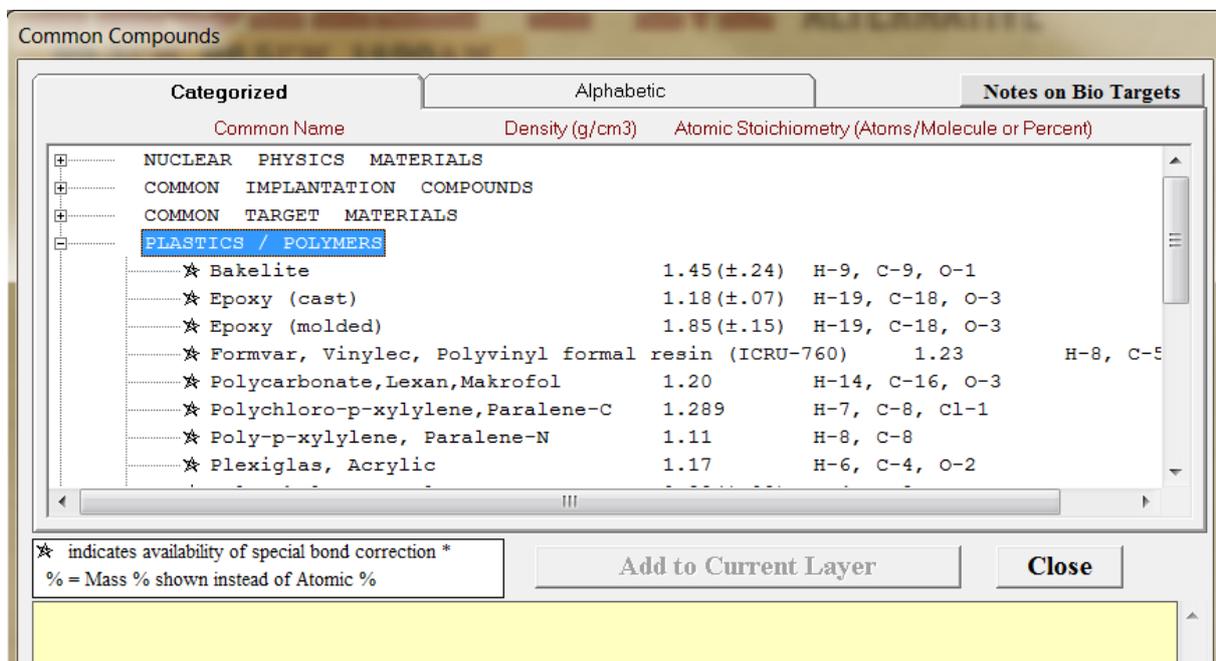


Abb. 5.4 SRIM/TRIM 2013, Auswahl gängiger Verbindungen für das Targetmaterial

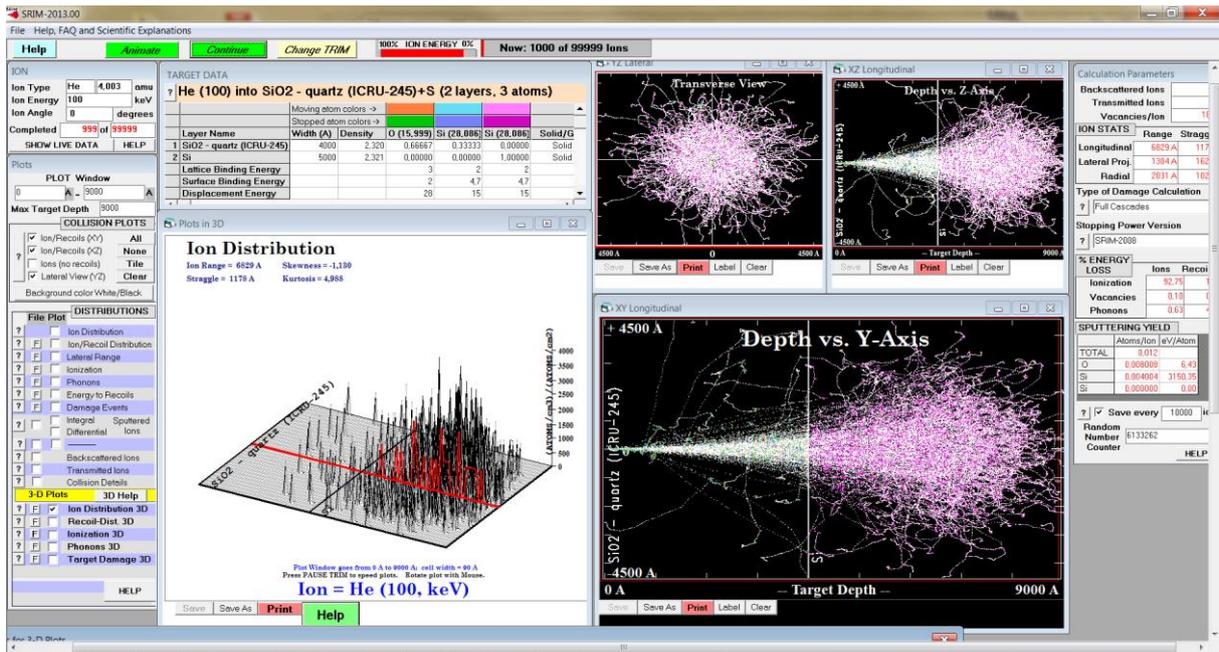


Abb. 5.5 SRIM/TRIM 2013, Simulationsübersicht

5.4 Zusammenfassung

Die beschriebenen Laboruntersuchungen bilden die Grundlage der zur Verfügung stehenden Datenbanken, deren Informationen bei der Auswahl der Bauteile eine wichtige Rolle spielen. Simulationstools wie SRIM/TRIM helfen dabei, die Prozesse im Halbleitermaterial zu verstehen. Durch die im Folgenden beschriebenen Standards wird der Rahmen gebildet, der die in den Tests ermittelten Parameter untereinander vergleichbar machen soll.

6 Standards

Im Folgenden werden nationale Standards mit Bezug auf Strahlungstests für kerntechnische Anwendungen sowie international häufig verwendete Standards mit Bezug zu Strahlungstests aus verschiedenen Anwendungsbereichen, insbesondere der Luft- und Raumfahrt und der Medizintechnik aufgelistet und kurz beschrieben. Ein Standard der DIN war während der Laufzeit des Projekts noch in der Erarbeitung und wurde deshalb nicht betrachtet. Die Veröffentlichung einer DIN-Norm erfolgte im April 2019. Diese nimmt Bezug auf MIL-STD883. Eine vollständige Recherche von Anforderungen in Regelwerken anderer Länder und internationaler Institutionen wurde hier nicht vorgenommen.

6.1 Deutsches Regelwerk

Im deutschen Regelwerk werden allgemeine Anforderungen an die Leittechnik durch die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ formuliert, aus denen sich allerdings keine detaillierten Anforderungen bezüglich der Strahlenresistenz einzelner Bauteile ableiten lassen. Diese finden sich in der KTA-Regel 3505, die mit relevanten Textpassagen im Folgenden aufgeführt ist. Diese Regel bezieht sich auf Sicherheitsleittechnik für Einrichtungen, die leittechnische Funktionen der Kategorie A und B ausführen.

6.1.1 Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke

In den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf), Stand 03/15, werden allgemeine Anforderungen für die Strahlungs- und Störfallfestigkeit an Komponenten gestellt.

In Abschnitt 3.2 der SiAnf „Festlegungen zu Anfangs- und Randbedingungen sowie zum Umfang der Nachweisführung“ ist die Strahlung explizit zu berücksichtigen:

„3.2.1 (2) Für Nachweise zur Integrität und Standsicherheit von Komponenten sind die relevanten mechanischen, chemischen, thermischen und durch Strahlung hervorgerufenen Einwirkungen zu berücksichtigen.“ /BMU 15/

In Abschnitt 3.7 „Anforderungen an die Leittechnik“ werden Forderungen an die Instrumentierung bei Ereignisabläufen und Anlagenzuständen der Sicherheitsebenen 3 und 4 sowie bei Einwirkungen von innen oder außen sowie aus Notstandsfällen gestellt.

„Die Einrichtungen zur Erfassung und Aufzeichnung der jeweils erforderlichen Informationen sollen diversitär und störfallfest aufgebaut sein.“ /BMU 15/

6.1.2 Detailliertere Anforderungen hierzu finden sich in den Regeln des KTA.KTA-Regel 3505 „Typprüfung von Messwertgebern und Messumformern der Sicherheitsleittechnik“

Die KTA-Regel 3505 „Typprüfung von Messwertgebern und Messumformern der Sicherheitsleittechnik“ von November 2015 enthält in den Nummern 5.10 und 5.11 Vorgaben zur Prüfung auf Strahlenbeständigkeit. Unterschieden wird zwischen dem bestimmungsgemäßen Betrieb (5.10) und dem Betrieb unter Störfallbedingungen (5.11). Im Folgenden werden diese Vorgaben aufgeführt.

KTA 3505 (5.10) Prüfung auf Strahlenbeständigkeit für den bestimmungsgemäßen Betrieb

„Für Geräte, die während des bestimmungsgemäßen Betriebs für den Einsatz unter Strahlenbeanspruchung vorgesehen sind, ist die spezifizierte Strahlenbeständigkeit nachzuweisen. Hierzu ist eine Bestrahlungsprüfung durchzuführen oder ein theoretischer Nachweis zu erbringen. Energie und Art der im Nachweisschritt angewendeten ionisierenden Strahlung können sich an der im bestimmungsgemäßen Betrieb auftretenden Strahlung orientieren.“ /KTA 15/

KTA 3505 (5.11) Prüfungen unter Störfallbedingungen

Wichtige Unterkapitel, die im Zusammenhang mit der Strahlenbeanspruchung stehen sind:

- **5.11.1 (2) Allgemeine Anforderungen**
- **5.11.2.2 Vorbeanspruchung durch Strahlung**
- **5.11.4 Verhalten bei Strahlenbeanspruchung**

Der folgende Abschnitt gibt den Inhalt dieser drei Unterkapitel wieder:

KTA 3505 (5.11.1 (2)) Allgemeine Anforderungen

(2) Für Geräte, die unter Störfallbedingungen für den Einsatz unter Strahlenbeanspruchung vorgesehen sind, ist die Strahlenbeständigkeit nachzuweisen. Hierzu ist eine Bestrahlungsprüfung durchzuführen oder ein theoretischer Nachweis zu erbringen.

KTA 3505 (5.11.2.2) Vorbeanspruchung durch Strahlung

(1) Für Geräte, die für den Einsatz unter Strahlenbeanspruchung vorgesehen sind und nach 5.11.1 (2) einer Bestrahlungsprüfung zu unterziehen sind, sind die Strahlenart sowie die Prüfwerte für die Energiedosis und Energiedosisleistung in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen festzulegen.

(2) Für Geräte, die im Sicherheitsbehälter eines Kernkraftwerks mit Druckwasserreaktor der Leistungsklasse 1300 MW (elektrisch) eingesetzt werden sollen, ist eine Vorbeanspruchung durch Strahlung mit einer Energiedosisleistung von kleiner als oder gleich $5 \cdot 10^2$ Gy/h so lange durchzuführen, bis der Prüfling eine Energiedosis von größer als oder gleich $5 \cdot 10^4$ Gy akkumuliert hat. Die genannten Dosis- und Dosisleistungswerte beziehen sich auf Luft und eine Photonenenergie im Bereich von 0,8 MeV bis 2 MeV. In diesem Prüfschritt kann zusätzlich ein Teil der Störfalldosis nach 5.11.4 vorgezogen werden.

Hinweis: Für DWR der Leistungsklasse 1300 MW beträgt die zu applizierende Summendosis ca. 10 kGy für das Intervall von 24 h.

(3) Der Prüfling ist hierbei in Betrieb und funktionsüberwacht. Innerhalb der ersten zwei Stunden und vor Abschluss der Bestrahlung ist eine Funktionszwischenprüfung durchzuführen.

(4) Die Prüfung muss unter Erfüllung nachstehender Anforderungen erfolgen:

- a. Die Bestrahlung des Prüflings darf mit Gamma-Strahlen unter atmosphärischen Bedingungen (Sauerstoffgehalt der Luft) erfolgen.*

- b. Das anzuwendende dosimetrische Messverfahren muss eine Messunsicherheit von kleiner als oder gleich $\pm 30\%$ (bezogen auf den Messwert) sicherstellen. Die Wahl des Messverfahrens darf der prüfenden Stelle überlassen bleiben.
- c. Der Prüfling soll einem Umgebungsklima ausgesetzt werden mit einer konstanten Temperatur im Bereich von 18 °C bis 28 °C (Schwankungsbreite $\pm 2\text{ K}$) und einer relativen Feuchte von kleiner als oder gleich 75% . Kann die geforderte Temperaturkonstanz nicht sichergestellt werden, so muss die Umgebungstemperatur während der Bestrahlung registriert werden.

KTA 3505 (5.11.4) Verhalten bei Strahlenbeanspruchung

- (1) Für Geräte, die für den Einsatz unter Strahlenbeanspruchung vorgesehen sind und nach 5.11.1 (2) einer Bestrahlungsprüfung zu unterziehen sind, sind die Strahlenart sowie die Prüfwerte für die Energiedosis und Energiedosisleistung in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen festzulegen.
- (2) Für Geräte, die im Sicherheitsbehälter eines Kernkraftwerks mit Druckwasserreaktor der Leistungsklasse 1300 MW (elektrisch) eingesetzt werden sollen, ist zusätzlich zur Vorbeanspruchung nach 5.11.2.2 eine Beanspruchung mit einer Energiedosisleistung von kleiner als oder gleich $5 \cdot 10^2\text{ Gy/h}$ so lange durchzuführen, bis der Prüfling eine Energiedosis von größer als oder gleich $2 \cdot 10^5\text{ Gy}$ akkumuliert hat. Die genannten Dosis- und Dosisleistungswerte beziehen sich auf Luft und eine Photonenenergie im Bereich von $0,8\text{ MeV}$ bis 2 MeV . Für andere Einsatzbedingungen sind die nach (1) festzulegenden Werte anzusetzen.
- (3) Der Prüfling ist hierbei in Betrieb und funktionsüberwacht. Nach ca. 10 h , 50 h und 100 h sind Funktionszwischenprüfungen durchzuführen.
- (4) Die Prüfung muss unter Erfüllung nachstehender Anforderungen erfolgen:
 - a. Die Bestrahlung des Prüflings darf mit Gamma-Strahlen unter atmosphärischen Bedingungen (Sauerstoffgehalt der Luft) erfolgen.
 - b. Das anzuwendende dosimetrische Messverfahren muss eine Messunsicherheit von kleiner als oder gleich $\pm 30\%$ (bezogen auf den Messwert) sicherstellen. Die Wahl des Messverfahrens darf der prüfenden Stelle überlassen bleiben.

- c. *Der Prüfling soll einem Umgebungsklima ausgesetzt werden mit einer konstanten Temperatur von 18 °C bis 28 °C (Schwankungsbreite ± 2 K) und einer relativen Feuchte von kleiner als oder gleich 75 %. Kann die geforderte Temperaturkonstanz nicht sichergestellt werden, so muss die Umgebungstemperatur während der Bestrahlung registriert werden.*

Abschließend lässt sich bemerken, dass ein nach der Vorgabe 5.10 der KTA 3505 qualifiziertes Betriebsmittel im Betrieb anderen Strahlungsarten, zum Beispiel Neutronenstrahlung, als bei der Durchführung der Prüfung ausgesetzt sein kann. Um realitätsnahe Prüfungen durchzuführen, sollte sich die bei der Prüfung verwendete Strahlung an der im Betrieb auftretenden orientieren.

6.2 Internationale Standards

Da im deutschen Regelwerk bislang nur die Anforderungen in der KTA 3505 bezüglich der Prüfung der Strahlenbeständigkeit von bestimmten Baugruppen vorliegen, wurde das internationale Regelwerk bezüglich weitergehender Anforderungen an diese Prüfungen untersucht. Anforderungen an die Prüfung der Strahlenbeständigkeit wurden in internationalen Standards aus den Bereichen Industrie, Militär sowie Luft- und Raumfahrt identifiziert, ein konkreter Safety Standard der IAEA liegt hierzu nicht vor. International häufig angewendete Standards werden im Folgenden kurz aufgeführt. Bei diesen handelt es sich um eine Auswahl der Standards, die auf den im Rahmen des Projekts besuchten internationalen Konferenzen (z. B. NSREC oder RADECS) häufig im Zuge von Strahlungstests referenziert wurden.

6.2.1 ECSS-Standards im Rahmen der Europäische Kooperation für Raumfahrtnormung

Die Europäische Kooperation für Raumfahrtnormung (engl. European Co-operation for Space Standardization, kurz ECSS) erarbeitet Standards, die alle Aspekte der Durchführung von Raumfahrtmissionen abdeckt. Die ECSS besteht aus einer Kooperation der europäischen Weltraumorganisation ESA, nationaler Raumfahrtagenturen verschiedener Länder und des europäischen Industrieverbandes EUROSPACE. /DLR 19/

Die Mitglieder bzw. Partner im Rahmen des Entwicklungsprozesses von Standards der ECSS sind:

- Agenzia Spaziale Italiana (ASI),
- Belgian Office for Scientific, Technical and Cultural Affairs (OSTC),
- British National Space Centre (BNSC),
- Centre National d'Etudes Spatiales (CNES),
- Canadian Space Agency (CSA),
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),
- European Space Agency (ESA),
- Norwegian Space Agency (NSA) und
- Eurospace (Vertreter der europäischen Industrie).

Wichtige Standards sind hierbei:

- ECSS-Q-ST-60-15C „Radiation Hardness Assurance - EEE Components“, Strahlungshärteprüfungen für elektrische, elektronische und elektromechanische Komponenten;
- ECSS-E-HB-10-12A „Calculation of radiation and its effects and margin policy handbook“, Handbuch zur Berechnung der Strahlung und ihrer Auswirkungen sowie Sicherheitsmargen;
- ECSS-Q-HB-60-02A „Techniques for Radiation Effects Mitigation in ASICs and FPGAs handbook“, Techniken zur Mitigation von Strahlungseffekten in ASICs und FPGAs.
- ESCC-25100 „Single Event Effects Test Method and Guidelines“ zu SEE-Testmethoden und -Richtlinien und
- ESCC-22900 „Total Dose Steady-State Irradiation Test Method“ zu TID-Testmethoden. /ESCC 19/

6.2.2 Standards der Vereinigung für Festkörpertechnologie (JEDEC-Standards)

Die Vereinigung für Festkörpertechnologie (ursprünglich gemeinsamer Entwicklungsrat für elektronische Geräte, engl. Joint Electron Device Engineering Council, kurz JEDEC) ist eine U.S.-amerikanische Organisation zur Standardisierung von Produkten der Halbleiterindustrie. Mitglieder sind ca. 300 Unternehmen der Halbleiterindustrie.

Ziel von JEDEC ist eine globale Akzeptanz für Standards in der Halbleiterindustrie zu schaffen. Diese Standards regeln die Herstellung integrierter Schaltungen sowie Halbleiter und sollen die Kompatibilität der Produkte gewährleisten. In JEDEC-Komitees, die sich aus mehr als 3.000 Freiwilligen aus fast 300 Unternehmen der Halbleiterindustrie zusammensetzen, werden für eine breite Palette von Technologien Standards entwickelt und überarbeitet. /JED 02/, /JED 19/

Relevante JEDEC Standards für den Einfluss von Strahlung auf Halbleiter, welche international auf Konferenzen referenziert wurden, sind /JED 02/, /JED 19/:

- 1 JESD57 „Test Procedures for the Measurement of Single Event Effects in Semiconductor Devices from Heavy Ion Irradiation“,
Prüfverfahren zur Messung von SEE durch Schwerionen in Halbleiterbauteilen;
- 2 JESD89 „Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices“,
Messung von Alpha-Partikeln und terrestrischen kosmischen Strahlen induzierten Soft-Errors in Halbleiterbauteilen und
- 3 JESD234 „Test Standard for the Measurement of Proton Radiation Single Event Effects in Electronic Devices“,
Teststandard für die Messung von protoneninduzierten SEE-Effekten in elektronischen Bauteilen.

6.2.3 Amerikanische Militärstandards (MIL)

Vom U.S. Verteidigungsministerium (U.S. Department of Defense) werden militärische Spezifikationen, Standards und Handbücher entwickelt, um spezifische Leistungs- und Herstellungsanforderungen für alle Arten von Geräten bzw. Ausrüstung zu definieren.

Der Standard MIL-STD-750 „Test methods for semiconductor devices“ legt einheitliche Verfahren für die Prüfung von Halbleiterbauelementen fest. Diese beinhalten grundlegende Umweltprüfungen zur Bestimmung der Beständigkeit gegen schädliche Einflüsse durch natürliche Faktoren und Bedingungen im Zusammenhang mit militärischen Operationen sowie physikalische und elektrische Prüfungen. /MIL 95/

MIL-STD-750-1 enthält beispielsweise die folgenden Testmethoden für Halbleiterbauteile:

- Testmethode 1017: Neutronenbestrahlungstests,
- Testmethode 1019: Verfahren zur stationären Bestrahlung mit Gesamtdosismenge und
- Testmethode 1080: Testmethoden zu SEB and SEGR.

Der Standard MIL-STD-883 „Microcircuits“ enthält Testmethoden für Mikroschaltkreise:

- TM 1017: Neutron irradiation und
- TM 1019: Ionizing radiation (total dose) test procedure.

Weiterhin zu nennen sind das Handbuch MIL-HDBK-814 „Ionizing Dose and Neutron Hardness Assurance Guidelines for Microcircuits and Semiconductor Devices“ und die Spezifikationen MIL-M-38510 „General Specifications for Microcircuits“ /EVR 19/, /MIL 95/. Diese Standards beschreiben die Gesamtdosiseffekte und Härtungsmöglichkeiten gegenüber Neutronenstrahlung.

6.2.4 Standards der Amerikanischen Gesellschaft für Prüfung und Materialien (ASTM International Standards)

Die international tätige Amerikanische Gesellschaft für Prüfung und Materialien (ursprünglich engl. American Society for Testing and Materials, kurz ASTM, heute ASTM International) ist eine gemeinnützige Organisation, die ein Forum für die Entwicklung und Veröffentlichung internationaler freiwilliger Standards für Materialien, Produkte, Systeme und Dienstleistungen bietet. Mit mehr als 30.000 Mitgliedern aus über 140 Ländern zählt die ASTM zu den größten internationalen Normungsorganisationen. /AST 19/

Für die Anwendung bzgl. Strahlungseinfluss auf Halbleiterbauteile häufig referenziert werden
/AST 19/:

- 1 ASTM F1192 „Standard Guide for the Measurement of Single Event Phenomena (SEP) Induced by Heavy Ion Irradiation of Semiconductor Devices“,
Leitfaden für die Messung von SEE durch Schwerionen in Halbleiterbauteilen;
- 2 ASTM F1892 „Standard Guide for Ionizing Radiation (Total Dose) Effects Testing of Semiconductor Devices“,
Leitfaden für die Prüfung von Auswirkungen ionisierender Strahlung (Gesamtdosis) auf Halbleiterbauteile und
- 3 ASTM F1190 „Practice for the Neutron Irradiation of Unbiased Electronic Components“,
Testmethoden für Neutronenbestrahlung von spannungslosen elektronischen Bauelementen.

6.2.5 Vergleich internationaler Standards

Tests für die Sensitivität von Bauteilen gegenüber Strahlungseffekten wie SEE und TID und Leitlinien für diese Tests wurden maßgeblich in den USA entwickelt. Hierbei handelt es sich um die schon erwähnten Standards JESD57 und JESD234. Weiterhin sind der militärische Standard MIL-STD-750, Methode 1080 oder ASTM F1192-90 zu nennen. /NSR 18/

Um die Unterschiede der Standards zu veranschaulichen, werden in Tabelle 6.1 die Hauptangaben der Standards MIL-STD-750 Methode 1080, ESCC 25100 und JEDEC JESD57 beispielhaft für die SEB- und SEGR-Prüfung von POWER MOSFETs gegenübergestellt. /NSR 18/

Tab. 6.1 Vergleichende Tabelle von drei Teststandards für die SEB/SEGR-Prüfung von Leistungs-MOSFETs /NSR 18/

	MIL-STD-750 Methode 1080; 2014 “Single Event Burn-out (SEB) und Single Event Gate Rupture (SEGR)”	ESCC 25100 Issue 2; 2014 “Single Event Effects test methods and guidelines”	JESD57; 2017 “Test procedures for the measurement of Single-Event Effects in semiconductor devices from heavy ion irradiation”
Reichweite	> Epitaxieschichtdicke	> Epitaxieschichtdicke	> Tiefe der Ladungssammlung
Teilchenfluss [#Ionen/cm ² /s]	$10^3 \leq Fluss \leq 10^5$	$10^2 \leq Fluss \leq 10^5$	$10^3 \leq Fluss \leq 10^5$
Fluenz [#Ionen/cm ²]	10^5 bis 10^7	10^5 bis 10^7	10^5 bis 10^7
Vorgegebener LET [MeV/mg/cm ²]	Nicht spezifiziert	LET bis 60	Nicht als einzelne Kenngröße zu verwenden
Anzahl der notwendigen Tests	3 Proben für destruktive Tests	Minimum 3 Proben pro Test	Minimum 4 Proben pro Test
Ionenarten	Keine spezifischen Ionenarten empfohlen	Nicht spezifiziert	Nicht spezifiziert

	MIL-STD-750 Methode 1080; 2014 “Single Event Burn-out (SEB) und Single Event Gate Rupture (SEGR)”	ESCC 25100 Issue 2; 2014 “Single Event Effects test methods and guidelines”	JESD57; 2017 “Test procedures for the measurement of Single-Event Effects in semiconductor devices from heavy ion irradiation”
Einfallswinkel	Hängt von der Technologie ab	Nicht nötig für planare Technologien, andere Technologien: Neigungs- und Rollwinkel	Hängt von der Technologie ab
Temperatur	Hängt von der Technologie ab, höhere Temperatur ist schädlicher	Raumtemperatur normal akzeptabel	Für SEGR: Kein primärer Faktor, für SEB kleine Einflüsse
Messungen	Für SEB und SEGR während Bestrahlung: I_{DS} und I_{GS}	Für SEB und SEGR während Bestrahlung: I_{DS} und I_{GS}	Für SEB und SEGR während Bestrahlung: I_{DS} und I_{GS}

6.3 Zusammenfassung

Im nationalen Regelwerk finden sich Anforderung bezüglich der Strahlenresistenz in der KTA-Regel 3505. Diese richten sich an Einrichtungen der Sicherheitsleittechnik (leittechnischen Funktionen der Kategorie A und B). Die Veröffentlichung einer DIN-Norm erfolgte im April 2019. Diese nimmt Bezug auf den Standard MIL-STD883 „Microcircuits“, welcher Testmethoden für Mikroschaltkreise enthält.

Die GRS sieht Anhaltspunkte dafür, dass außer Gammastrahlung auch andere Strahlungsarten, zum Beispiel Neutronenstrahlung, bei der Qualifizierung von Betriebsmitteln im nationalen Regelwerk, ähnlich den internationalen Standards berücksichtigt werden sollten. Eine genauere Beurteilung kann Gegenstand weiterer Forschung sein.

7 Auswertung der Betriebserfahrung

Im ersten Teil dieses Kapitels wird die durchgeführte Auswertung der nationalen Betriebserfahrung deutscher KKW auf Basis gesammelter Daten aus Vorgängervorhaben dargestellt, sowie Betriebserfahrung eines deutschen Herstellers von kerntechnischen Komponenten mit Strahlungseinflüssen auf Halbleiterbauelementen ausgewertet. Im zweiten Teil des Kapitels erfolgt die Auswertung internationaler Betriebserfahrung aus anderen Anwendungsbereichen u. a. aus der Luft- und Raumfahrttechnik sowie der Medizin und Chipherstellung.

7.1 Auswertung der nationalen Betriebserfahrung

In der deutschen Betriebserfahrung sind keine meldepflichtigen Ereignisse bekannt, bei denen programmierbare oder rechnerbasierte Komponenten aufgrund von Strahlungseinfluss in ihrer Funktion beeinträchtigt wurden oder ausgefallen sind. Nationale Betriebserfahrung liegt der GRS somit einerseits aus GRS-Forschungsvorhaben vor, in denen Ereignisse mit programmierbaren oder rechnerbasierten Komponenten ermittelt und untersucht worden sind, die nicht meldepflichtig sind und andererseits aufgrund von Informationen eines deutschen Herstellers von kerntechnischen Komponenten,

7.1.1 Auswertung der Daten aus den Vorläuferprojekten

Auf Grundlage der vorliegenden Daten aus den Vorgängerprojekten 3610R01361 und 3610R01363 liegen hinsichtlich des Einflusses von Strahlung auf programmierbare oder rechnerbasierte Komponenten 13 Ausfälle mit der Ursache „Strahlung“ aus einem deutschen Kernkraftwerk vor. Da diese nicht meldepflichtig waren, stehen der GRS nur begrenzte Informationen zu den Ausfällen zur Verfügung. Im Folgenden wird eine Auswertung der Daten vorgenommen und die betroffenen Komponenten werden vorgestellt.

Bei den Ausfällen aufgrund von Strahlungseinfluss handelt es sich um 5 Ereignisse an Zählern in den Lüftungsanlagen des Kontrollbereiches und um 8 Ereignisse an zwei Druckmessumformertypen direkt am Reaktordruckbehälter.

Zeitlich gesehen gab es keine signifikante Häufung von Ausfällen, die Ausfälle verteilen sich über den gesamten Betrachtungszeitraum von 2002 – 2010, siehe Abb. 7.1. Alle Ausfälle unterlagen nicht der Meldepflicht. Als Abhilfemaßnahme wurden die betroffenen Messumformer

gegen die zuvor eingesetzten Messumformertypen ausgetauscht, in einem Fall wurde aufgrund einer zu hohen örtlichen Strahlenbelastung der physische Einbauplatz des Messumformers geändert. Detaillierte Informationen liegen der GRS nicht vor.

Zu den Ausfällen an Zählern in den Lüftungsanlagen liegen der GRS keine Informationen vor. Auf die betroffenen Messumformer wird nachfolgend weitergehend eingegangen.

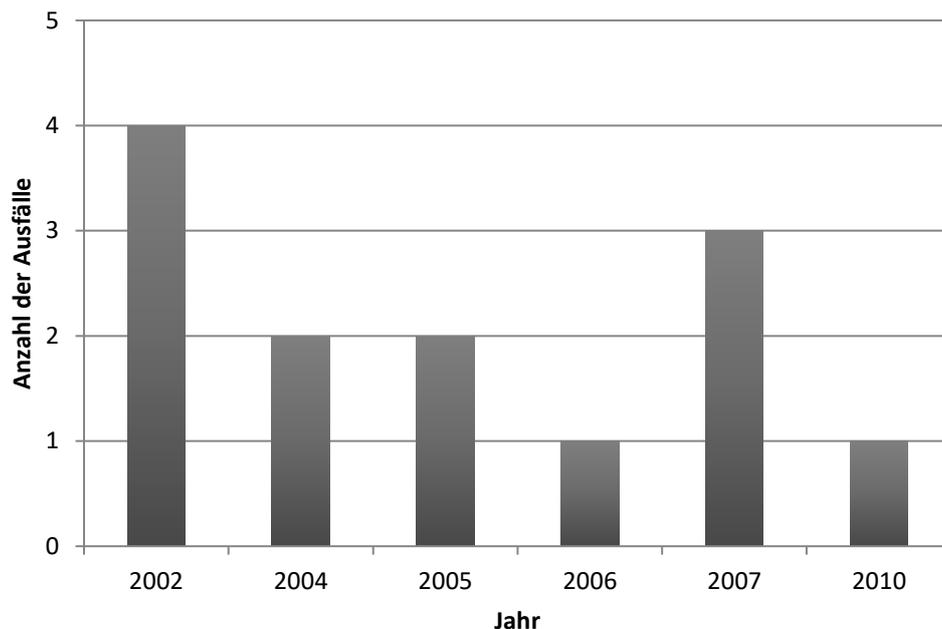


Abb. 7.1 Verteilung der Ausfälle auf die betrachteten Jahre

7.1.1.1 Betroffene Messumformer

Bei den betroffenen Messumformern handelte es sich um Messumformer ASD 800 und ASK 800 von Hartmann & Braun/ABB. Die Messumformer wurden für betriebliche Anwendungen eingesetzt, somit waren ihre Ausfälle nicht meldepflichtig. Der Messumformer ASK 800 besitzt eine metallische Messmembran zur Messung von Differenzdrücken, Durchflüssen und Füllständen. Zudem besitzt er einen Mikroprozessor und verwendet das HART⁴¹-Protokoll zur Kommunikation. Die Parametrierung und Konfigurierung können mit einem PC durchgeführt

⁴¹ HART = Highway Addressable Remote Transducer: Kommunikationsprotokoll, dass von programmierbaren oder rechnerbasierten Messumformern sowie von komplexen elektrotechnischen Komponenten zur Kommunikation in Bussystemen verwendet wird.

werden, die parallel an die 2-Drahtleitung angeschlossen werden. Darüber hinaus besitzt der Messumformer ASK 800 eine digitale Anzeige. /H&B 00/, /GRS 15/

Den prinzipiellen Aufbau des Messumformers zeigt Abb. 7.2.

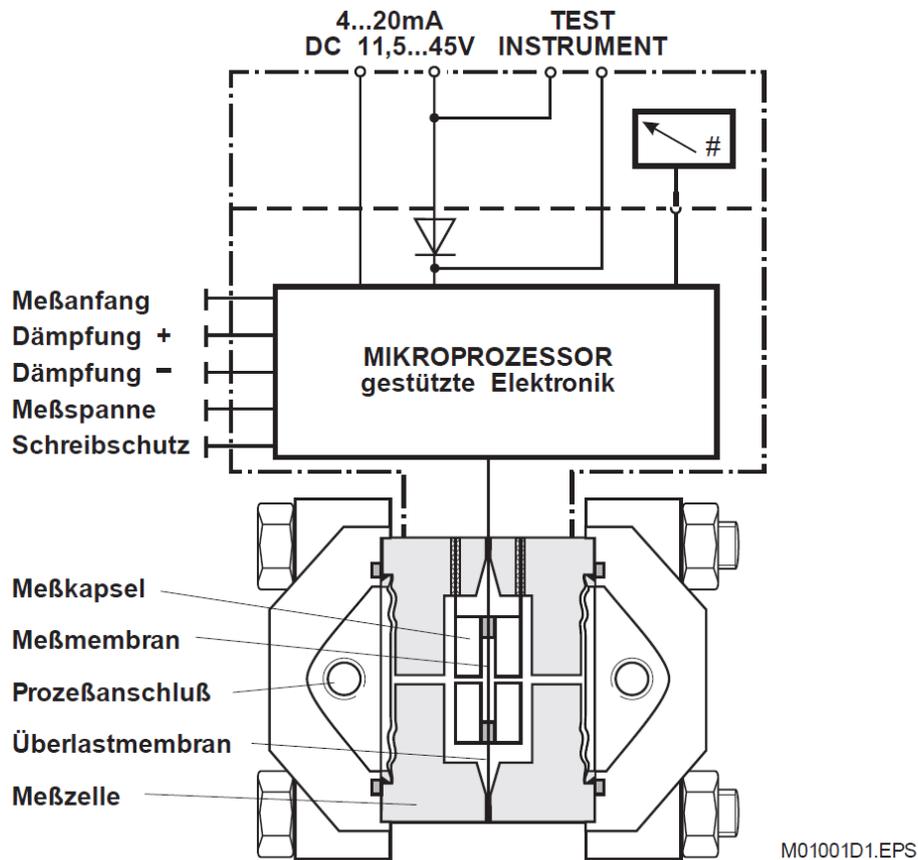


Abb. 7.2 Funktionsschema ASK800 /ABB 00b/

Die Messumformer ASD 800 aus der Contrans P-Familie (ABB, ehemals Hartmann & Braun) haben alle eine keramische Messmembrane. Sie besitzen eine mikroprozessorgestützte Elektronik und können über das HART-Protokoll kommunizieren. Der Messumformer ASD 800 dient zur Überdruckmessung. /ABB 00/, /ABB 00a/, /GRS 15/

7.1.1.2 Räumliche Anordnung

Angaben zum Einsatzort finden sich zu den acht Messumformern ASD 800 und ASK 800. Der Raum, in dem die Messumformer eingesetzt worden waren, liegt innerhalb des Sicherheitsbehälters. Dort befinden sich die Druckerhöhungspumpen (siehe Abb. 7.3). Daten über die Strahlungsbelastung des Raumbereichs konnten von der GRS nicht ermittelt werden.

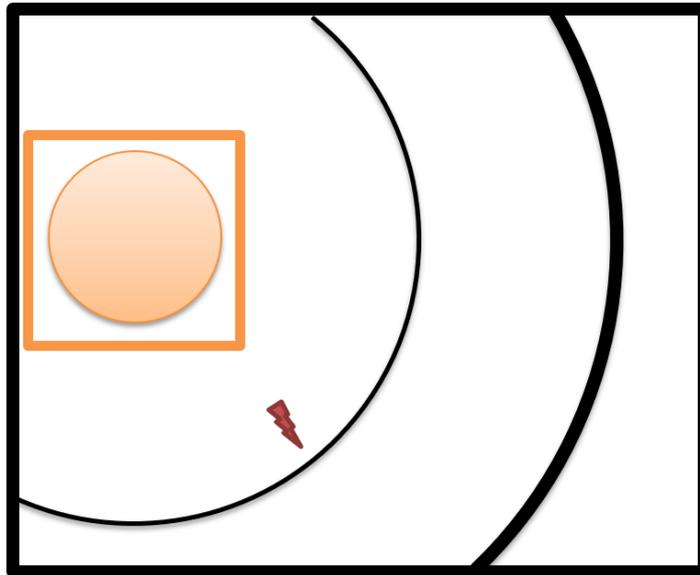


Abb. 7.3 Ausfallort der Messumformer ASD 800 und ASK 800 (roter Blitz: Raum mit ausgefallenen Messumformern, orangener Kreis: RDB, orangenes Quadrat: biologisches Schild; innerer Kreis: Containment, äußerer Kreis: Reaktorgebäude)

Da das Wissen über die genaue Strahlenbelastung am Einsatzort der Komponente und der Aufbau der Komponente selbst mit den entsprechenden Bauteilen ganz entscheidend für eine Aussage über die Einsatzdauer ist, können solche Auswertungen für diese Messumformer hier nicht vorgenommen werden. Es fehlen Informationen des Herstellers zur Strahlungsfestigkeit und detaillierte Informationen zu den eingebauten Halbleiterbauteilen selbst.

7.1.2 Erkenntnisse aus der Industrie

Aus dem Gespräch mit einem Anlagenhersteller ergab sich, dass in den Jahren 2008 bis 2014 leittechnische Einrichtungen, die sich bislang außerhalb des Containments im Ringraum befanden, für zukünftige Projekte in diesem installiert werden sollten. Ziel war es, die Anzahl der

üblichen Durchführungen durch das Containment zu reduzieren, um so wirtschaftlich und sicherheitstechnisch einen Gewinn zu erzielen. Bei der Sicherheitsleittechnik im Containment handelt es sich bisher um einige wenige Druckmessumformer. Die Belastung im Ringraum ist lt. Anlagenhersteller so gering, dass hier bislang keine Schwierigkeiten beim Einsatz von Auswerteelektronik bezüglich Strahlenschäden vorkamen.

Laut Aussage des Herstellers stand dieser vor der Herausforderung, keine weltweit anerkannten Testmethoden für die Qualifizierung von Halbleiterkomponenten zum Einsatz im KKW-Containment zu haben. Um Aussagen über die Durchführbarkeit des Vorhabens treffen zu können, wurden vom Hersteller eigene Testmethoden entwickelt. Bei den getesteten Bauteilen handelte es sich um sogenannte Commercial off-the-shelf⁴² (COTS)-Komponenten. Diese wurden über verschiedene Zeiträume und mit variablen Dosisleistungen bestrahlt. Als Strahlenquelle kam eine Co-60-Quelle zum Einsatz. Abb. 7.4 zeigt beispielhaft den Verlauf einer Dosisleistungskurve während der Versuchsdauer. Die Absicht war, die Bauteile zunächst mit einer geringen Dosis zu belasten, um dann Störfallbedingungen zu simulieren. Daneben wurde der Einfluss von Temperatur und Einfallswinkel getestet.

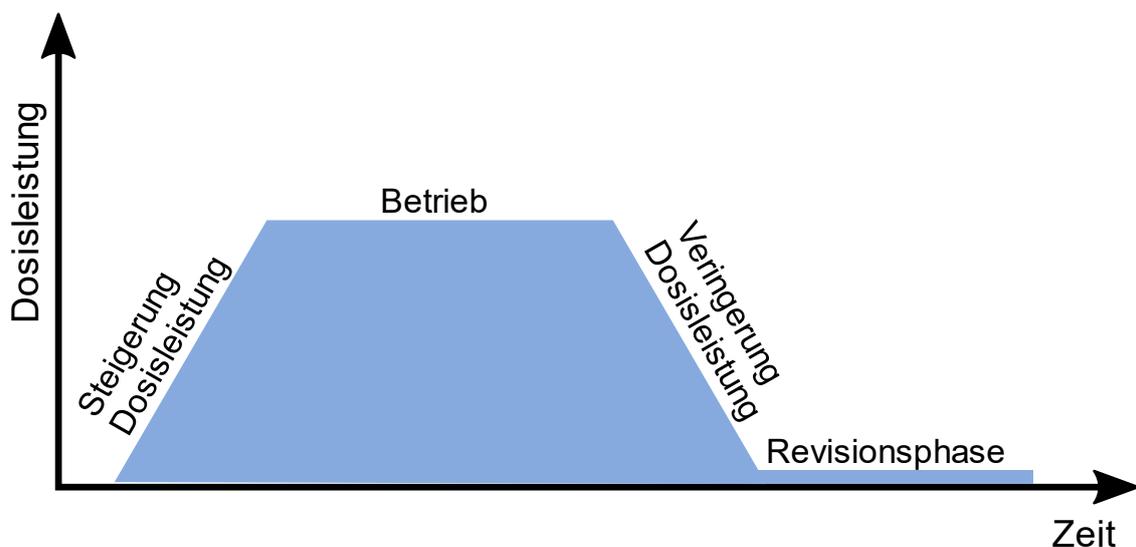


Abb. 7.4 Dosisleistungskurve während der Versuchsdauer und Korrelation mit dem KKW-Betrieb

⁴² Kommerzielle, in großer Stückzahl seriengefertigte Produkte.

Die Dauer einer Messung an einem Bauteil betrug zwischen 4 Wochen und 9 Monaten. Zu den wesentlichen Erkenntnissen des 5-jährigen Testzeitraums zählen:

- Gleiche Bauteile versagen bei Einbau in unterschiedliche Komponenten, aber bei sonst gleichen Randbedingungen auf unterschiedliche Weise.
- Die Temperatur des Bauteils während der Tests hat einen großen Einfluss auf die Ausfallwahrscheinlichkeit. Ausfälle können teilweise sogar erst auftreten, wenn eine hohe Strahlenbelastung mit hohen Temperaturen kombiniert wird. Der Einfluss der Temperatur auf die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Latch-Up zeigt beispielhaft Abb. 7.5.
- Niedrige Dosisleistungen können sog. Annealing-Effekte bewirken. Dabei werden Defekte im Kristallgitter des Halbleiters „repariert“ und Rauschen verringert. Erst bei höheren Dosisleistungen treten wieder Nichtlinearitäten auf, die zerstörend wirken.

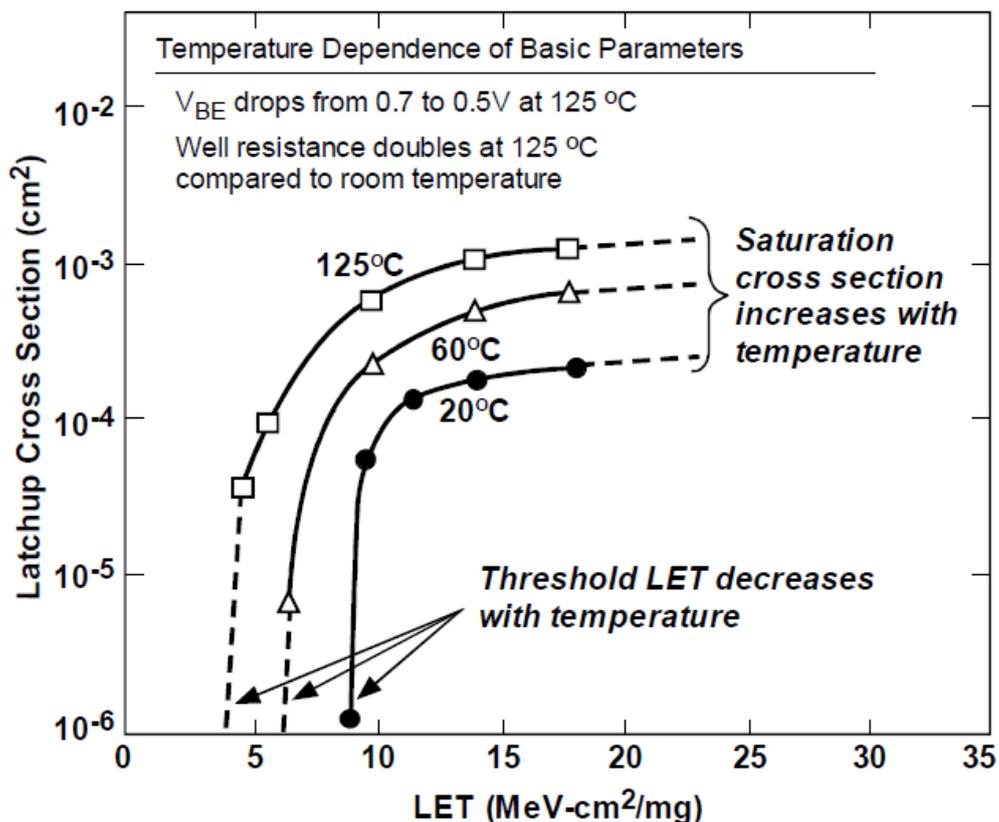


Abb. 7.5 Abhängigkeit des SEL-Wirkungsquerschnitts von LET bei verschiedenen Temperaturen /JOH 00/

Letztlich wurde die Forschung zum Einsatz von Sicherheitsleittechnik innerhalb des Containments beim Anlagenhersteller aus ökonomischen Gründen eingestellt. Die Vorteile, die eine Reduzierung von Durchführungen durch das Containment mit sich brächten, ständen nicht im Verhältnis zu den finanziell notwendigen Aufwendungen, insbesondere was die Qualifizierung der Bauteile angehe. Des Weiteren sieht man bezüglich der Strahlenschädigung innerhalb des Containments eine höhere Relevanz beim Einfluss auf Dichtungen und Kabel.

7.1.3 Zusammenfassung

Aus der deutschen Betriebserfahrung sind keine meldepflichtigen Ereignisse bekannt, die durch den Einfluss von ionisierender Strahlung auf Halbleiterbauteile verursacht wurden. Auch im Rahmen der Auswertung von Ereignissen unterhalb der Meldeschwelle wurden einzelne Fälle festgestellt, es konnte jedoch keine signifikante Häufung gefunden werden. Es wurden Ausfälle von Messumformer beobachtet, bei denen als Ausfallursache der Einfluss von Strahlung angegeben wurde.

7.2 Auswertung der internationalen Betriebserfahrung außerhalb der Kerntechnik

Ausfälle oder Defekte von halbleiterbasierten Bauteilen durch Strahlungseinflüsse sind auch aus der Betriebserfahrung in den Bereichen Raumfahrt, Luftfahrt und Medizintechnik sowie von kommerziell erhältlichen Computern bekannt. In diesem Kapitel werden einige dieser Vorkommnisse näher betrachtet und analysiert.

7.2.1 Raumfahrt

In der Raumfahrt kommt es aufgrund der Einwirkung kosmischer Strahlung zu einer erhöhten Komponentenbelastung. Künstliche Raumflugkörper werden oft weit über ihre Auslegungslbensdauer hinaus betrieben. Somit konnten in der Vergangenheit bereits eine Reihe von verschiedenen strahlungsinduzierten Effekten und Beeinträchtigungen beobachtet werden. Ähnlich zu dem von der IAEA bekannten Incident Reporting System for Nuclear Installations⁴³ /IAEA 18/ existiert eine für die Öffentlichkeit zugängliche „NASA Lessons Learned“-Datenbank,

⁴³ Dokumentationssystem für die Betriebserfahrung mit Kernkraftwerken, Forschungsreaktoren und kerntechnischen Anlagen des Brennstoffzykluses.

die unter <https://llis.nasa.gov/> abgerufen werden kann /NAS 19/. Um einen Einblick in die thematische Relevanz und den Umfang der Datenbank in Bezug auf dieses Forschungsvorhaben zu gewinnen, wurden am 08.06.2018 gezielte Abfragen zu relevanten Suchbegriffen vorgenommen. Tab. 7.1 zeigt eine Übersicht und Einordnung einiger der genutzten Suchbegriffe und erhaltenen Ergebnisse.

Tab. 7.1 Auswertung der „NASA Lessons Learned“-Datenbank: ausgewählte Suchbegriffe, Anzahl der jeweils erhaltenen Treffer, Titel der angezeigten Dokumente (bei geringer Trefferzahl) und ggf. kurze Kommentare bezüglich des inhaltlichen Zusammenhangs zu diesem Forschungsvorhaben

Suchbegriffe	Anzahl Treffer	Titel	Kommentar
Latch-Up	2	„Design Considerations for Selection of Thick-Film Micro-electronic Circuits“	Latch-Ups ¹ werden in Tests zur Komponentenqualifizierung teilweise berücksichtigt.
		„Radiation Design Margin Requirement“	SSE-Margen werden durch Begrenzung der minimalen SEE-Sensitivität abgeleitet.
SEL	2	„Space Radiation Effects on Electronic Components in Low-Earth Orbit“	Erklärung der Auswirkung unterschiedlicher Strahlenexposition auf verschiedene elektronische Komponenten.
		„Radiation Design Margin Requirement“	s. o.
TID	2	„Radiation Design Margin Requirement“	s. o.
		„Space Radiation Effects on Electronic Components in Low-Earth Orbit“	s. o.
SEU	7	„Erroneous Onboard Status Reporting Disabled IMAGE's Radio“	Verlust des Satelliten „IMAGE“; vermutete Ursache: SEE.
		„Provide Adequate Overcurrent Circuit Protection for LEO“	Eventuell aufgetretener SEE.
		„Juno/MSL SDRAM Vulnerability“	Auftreten von SEFIs ² .
		„Anomalous Flight Conditions May Trigger Common-Mode Failures in Highly Redundant Systems“	Notwendigkeit besserer Vorkehrungen gegen gleichartige Fehler ³ durch SEEs.

Suchbegriffe	Anzahl Treffer	Titel	Kommentar
		„Solar Flare Proton and Heavy Ion Modeling for Single Event Effects“	Keine direkte Relevanz für dieses Vorhaben.
		„Radiation Design Margin Requirement“	s. o.
		„Space Radiation Effects on Electronic Components in Low-Earth Orbit“	s. o.
Snap-back	1	„Space Radiation Effects on Electronic Components in Low-Earth Orbit“	s. o.
Nuclear	15	u. a.: „Microchip Susceptibility to Ionizing Radiation Emitted by Environment, Materials Used in Production and Processing of Computer Hardware“, „Space Radiation Effects on Electronic Components in Low-Earth Orbit“	u. a.: - Testprogramme; - Checklisten; - Erklärungen strahlungsinduzierter leittechnischer Probleme.
FPGA ⁵	5	u. a.: „Commercial Off The Shelf (COTS) ⁴ Digital Signal Processor Experienced Destructive Events as a Result of Ionizing Radiation Testing“	u.a.: Durchführung von Strahlungstests an COTS-Equipment.

- 1 Übergang eines Halbleiterbauelementes in einen niederohmigen Zustand; kann zu einem Kurzschluss führen
- 2 single event functional interrupt: Völliges Versagen eines Systems (z. B. Computerabsturz) aufgrund eines SEUs.
- 3 Ausfall mehrerer gleichartiger Komponenten oder Betriebsmittel aufgrund einer gemeinsamen Ursache, deren Versagen zu einem Schadensereignis führen
- 4 Commercial off-the-shelf: seriengefertigtes Elektronik- oder Softwareprodukt
- 5 Field Programmable Gate Array: integrierter Schaltkreis der Digitaltechnik, in den eine logische Schaltung geladen werden kann

Tab. 7.2 zeigt Beispiele einiger Weltraummissionen und den dabei beobachteten strahlungsinduzierten Anomalien. Im weiteren Text wird auf einige dieser Vorfälle genauer eingegangen.

Tab. 7.2 Ausgewählte Beispiele von strahlungsbedingten Vorkommnissen während Weltraummissionen /PRI 02/

Mission	Start der Mission	Ziel der Mission	Strahlungsinduzierte Effekte
Galileo	18.10.1998	Raumsonde zur Planetenerforschung (Jupiter)	Safe-holds ¹ , vermutlich aufgrund von SEEs; Zerstörungsfreie Latch-Ups; Analogschalter können aufgrund der Gesamtdosis ausfallen (Designanforderung wurde bereits überschritten).
TOPEX-Poseidon	10.08.1992	Satellit zur Erdbeobachtung (ozeanographisch; 1336 km, 66°)	Dauerhaftes Versagen der Optokoppler ² ; Protoneninduzierte Versetzungsdefekte ³ .
Cassini	15.10.1997	Raumsonde zur Planetenerforschung (Saturn und sein Mond Titan)	Transienten in Komparatoren ⁴ ; Fehler im auf DRAM basierenden Massenspeicher.
Deep Space 1	24.10.1998	Technologiedemonstration; Ionenantrieb; interplanetare Erforschung (Komet)	Latch-Up in der stellaren Referenzeinheit; Störung in der Steuerelektronik des Solarpanels; Safe-Holds.
QuikScat	19.06.1999	Erdbeobachtung (Ozeanographie)	GPS-Empfängerausfall; Einfrieren von 1553 Bussen.
Mars Odyssey	07.04.2001	Kartographie von Chemikalien & Mineralien; Suche nach Wasserstoff/Wasser	In den abgesicherten Modus versetzt; Grund: Reset des Prozessors durch einen Latch-Up im DRAM.
GRACE	17.03.2002	Schwerkraft Kartographie (~485 km, 89°)	Resets; Neustarts; Doppelbitfehler in Speicherverwaltungseinheit-A; einige GPS-Fehler und Fehler einer Steuereinheit (Instrumentation Control Unit (ICU)) (möglich).

- 1 Strom- und thermosicherer Zustand von Raumflugkörpern, in dem keine wissenschaftlichen Daten gesammelt werden.
- 2 Optoelektronisches Bauelement zur Übertragung eines Signals zwischen zwei galvanisch getrennten Stromkreisen.
- 3 Durch nukleare Wechselwirkung (meist Streuung) verursachte Gitterfehler.
- 4 Elektronischer Schaltkreis zum Vergleich zweier Werte.

SEEs wurden während einer Reihe von Weltraummissionen beobachtet. Das potentielle Auftreten von SEE wurde deshalb beispielsweise in der Entwicklung der 1998 gestarteten Raumsonde Galileo berücksichtigt. Durch die Verwendung von strahlungsharten Komponenten, redundanter Systemauslegung und Fehlererkennung mit Hilfe von Paritätsbits⁴⁴ wurde Galileo gegen das Auftreten von SEE ausgelegt. Trotz dieser Maßnahmen wurden mehrere, vermutlich durch SEEs ausgelöste Safe-Holds beobachtet. Zudem kam es zu zerstörungsfreien Latch-Up-Effekten und möglichen Ausfällen von Analogschaltern aufgrund der absorbierten Gesamtdosis an Strahlung. Strahlungsinduzierte Effekte konnten somit trotz der Nutzung von strahlungsharter Elektronik nicht vollständig vermieden werden. Die beobachteten Anomalien hatten jedoch keine Auswirkungen auf die Mission. Die Sonde erwies sich als so funktionsfähig, dass ihre Mission verlängert wurde und sie insgesamt den vierfachen Wert ihrer Auslegungsdosis absorbierte. Dies zeigt, dass sich durch robustes Design von Komponenten und Software strahlungsresistente Bauteile und Geräte entwickeln lassen. /PRI 02/

Ein weiteres Beispiel gelungener strahlungsharter Auslegung ist der Erdbeobachtungssatellit TOPEX/Poseidon. Obwohl ursprünglich nur für eine drei- bis fünfjährige Mission ausgelegt, konnte der 1992 gestartete Satellit mehr als 13 Jahre erfolgreich betrieben werden. Während seiner Einsatzzeit kam es zu protoneninduzierten Versetzungsfehlern in einigen von Texas Instrument hergestellten Optokopplern. Zudem wurden mit der Protonenfluenz korrelierte Probleme in dem für Triebwerksbefehle zuständigen Schaltkreis beobachtet. /PRI 02/

Strahlungsinduzierte Effekte in Raumfahrtequipment können nicht nur durch Softwarelösungen korrigiert, sondern auch durch technische Lösungen verhindert oder verzögert werden. Als Beispiel sind durch den Forschungssatelliten Aqua (auch EOS-PM1) gewonnene Erkenntnisse zu nennen. Der 2002 gestartete und noch immer genutzte Satellit ist mit einem erweiterten Infrarot-Messgerät (AIRS) ausgerüstet. Im September 2016 trat am AIRS ein plötzlicher Stromverlust auf. Als Auslöser wird eine aufgrund eines Kurzschlusses oder Überstroms ausgelöste Sicherung vermutet. Ursächlich dafür könnte nach Aussage des Jet Propulsion Laboratory ein SEE sein. Um ähnliche Vorfälle bei zukünftigen Missionen in der niedrigen Erdumlaufbahn zu verhindern, sollen zum Schutz wichtiger Stromkreise sogenannte Klemmschaltungen implementiert werden. Bei Fehlern wie Überspannung oder Überstrom

⁴⁴ Ein Paritätsbit wird einer Folge von Bits hinzugefügt um die Gesamtzahl der mit „1“ belegten Bits auf eine gerade (oder ungerade) Zahl zu ergänzen. Paritätsbits können zur Erkennung von Übertragungsfehlern genutzt werden.

wird der Netzausgang einer Stromversorgung aufgrund der Klemmschaltung kurzgeschlossen, so dass eine Sicherung schneller auslösen kann. Empfindliche Bauteile können so vor zu hohen Spannungen oder Strömen geschützt werden. /JPL 17/

Auch das Hubble-Weltraumteleskop zeigt wiederkehrende Probleme durch SEEs. Aufgrund der erwarteten niedrigen Strahlenbelastung in dem von Hubble durchflogenen Orbit wurden Computerchips mit bekannter Anfälligkeit für SEEs verbaut. Dies führt jedoch während des Durchfliegens der südatlantischen Anomalie und ihrer erhöhter Protonenstrahlung zu regelmäßigen Datenverlusten in einem 1-kbit-Schwachstrom-RAM-Speicher. Eine Softwarelösung zur Korrektur der Fehler wurde entwickelt. /VAR 02/

Während der Cassini-Mission (1997-2017) wurden zum ersten Mal in der Raumfahrtgeschichte nicht Magnetbänder, sondern auf DRAM-Technologie basierende Massenspeicher (Solid State Recorder) genutzt. Hierbei zeigten sich zahlreiche strahlungsinduzierte Effekte. Zusätzlich zu den erwarteten Einzelbitfehlern kam es zu einer nicht korrigierbaren Doppelbitfehlerrate des Massenspeichers, die um mehrere Größenordnungen höher war als erwartet. Untersuchungen ergaben, dass der für den Massenspeicher genutzte, relativ dichte DRAM eine besondere Anfälligkeit für Mehrfach-Bit-Fehler aufweist. Als Grund für die Unkorrigierbarkeit erwies sich unzureichendes Design der genutzten Vorwärtsfehlerkorrektur⁴⁵ (Single-Error Correction and Double-Error Detection, SECDED⁴⁶). Zudem kam es zu durchschnittlich 1,5 Fehlern der 206 Halbleiterrelais pro Jahr.

Abb. 7.6 zeigt die beobachteten und die vorausgesagten Single-Event Transientes (SET) in den jeweiligen Jahren des Cassini Mission. /PRI 02/

⁴⁵ Fehlerkorrekturverfahren zum Senken der Fehlerrate beim Speichern oder Übertragen digitaler Daten.

⁴⁶ Ein Hamming-Code (linearer fehlerkorrigierender Blockcode) mit zusätzlicher Parität.

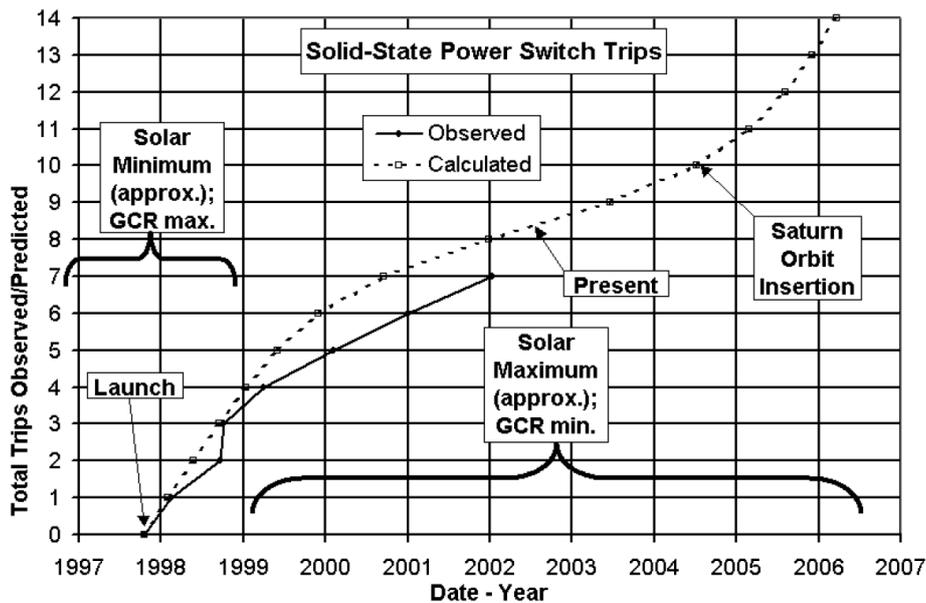


Abb. 7.6 Vergleich der erwarteten und beobachteten SET in den Halbleiterrelais der Cassini-Raumsonde von 1997 bis 2006. Das Solar Maximum⁴⁷ und GCR⁴⁸ Minimum (GCR min.), sowie das Solar Minimum⁴⁹ und GCR Maximum (GCR max.), sind hervorgehoben. Die erhöhte Doppelbitfehlerrate ist nicht dargestellt /PRI 02/

7.2.2 Luftfahrt

Flugzeuge sind während des Flugs abhängig von der Flugroute erhöhter kosmischer Strahlung ausgesetzt. Das Ausmaß der Strahlenexposition hängt u.a. von den folgenden generellen Gegebenheiten ab, wobei sich der hier genannte Neutronenfluss auf Neutronen mit einer Energie $> 10^7$ eV, dem Energiebereich, der am wahrscheinlichsten zu SEEs führt, bezieht /ATS 11/:

- Aufgrund des Erdmagnetfeldes ist der Teilchenfluss im Bereich der magnetischen Pole der Erde größer als in äquatorialen Breiten. Auf 40.000 ft Höhe in der tropischen Zone ist der Teilchenfluss kleiner als $2.100 \text{ cm}^{-2}\text{h}^{-1}$. Zwischen 60° Breite und den Polen beträgt er etwa $8.400 \text{ cm}^{-2}\text{h}^{-1}$.

⁴⁷ Zeit größter Sonnenaktivität während des elfjährigen Sonnenzyklus.

⁴⁸ Galactic Cosmic Ray, kosmische Strahlung galaktischen Ursprungs.

⁴⁹ Zeit geringster Sonnenaktivität während des elfjährigen Sonnenzyklus.

- Die natürlichen Schwankungen der Sonnenaktivität beeinflussen die SEE Rate nur geringfügig. Eine Ausnahme bilden hier die zwischen mehreren Stunden und Tagen andauernden Sonneneruptionen, die in seltenen Fällen zu einem 300-mal höheren Neutronenfluss in den Polarregionen führen können.
- Die Flussrate thermischer Neutronen ist aufgrund von Interaktionen mit der Flugzeugmaterie innerhalb des Flugzeuges höher als außerhalb.

Wie man aus diesen Überlegungen erkennt, ist die Bordelektronik von Flugzeugen im Vergleich zu dauerhaft am Boden befindlicher Elektronik besonders gefährdet für strahleninduzierte Effekte. 1993 wurde erstmals über das Auftreten von SEEs in Zusammenhang mit Flughöhen der kommerziellen Luftfahrt berichtet. Damals wurden 14 neutroneninduzierte SEEs in einem von der Firma DataFlightEurope entwickelten PERFORM Computer- und Softwaresystem des Cockpits beobachtet. /OLS 93/

Laut Olsen et al. /OLS 93/ wird angenommen, dass lediglich Neutronen einen großen Beitrag zum Vorkommen von SEEs an Bord von zivilen Flugzeugen haben. Diese Annahme beruht auf folgenden Überlegungen: Kosmische Strahlung besteht hauptsächlich aus Protonen und einem geringeren Anteil von Alphateilchen und Schwerionen. Zusätzlich entstehen Neutronen aufgrund von Teilchenschauern beim Eintreten der kosmischen Strahlung in die Erdatmosphäre.⁵⁰ Für jede dieser Teilchenarten wurde evaluiert, inwiefern sie einen Einfluss auf Halbleiterbauteile der zivilen Luftfahrt haben können /OLS 93/:

- Moderne Flugzeuge der zivilen Luftfahrt haben einen mehr als 1 mm dicken Aluminiumkörper, der das Flugzeuginnere vor Protonen mit einer Energie unter 10 MeV wirkungsvoll abschirmt.
- In einer Höhe von 10 km herrscht eine Atmosphärendichte von 270 g/cm², was zu häufigen Interaktionen zwischen Schwerionen und Atmosphärenteilchen führt. Daher wird angenommen, dass Schwerionen für die Erzeugung von SEE von geringer Bedeutung sind.

Zusammenfassend wird laut Olsen et al. daher angenommen, dass lediglich Neutronen einen großen Beitrag zum Vorkommen von SEEs an Bord von zivilen Flugzeugen haben. /OLS 93/

⁵⁰ Myonen, Pionen und Neutrinos werden in der hier zitierten Veröffentlichung nicht berücksichtigt.

7.2.2.1 Quantas Flug QF72

Dieses Kapitel behandelt einen Flugzeugunfall eines Airbus A330-303 auf dem Weg von Singapur nach Perth (Australien) am 7.10.2008. Die australische Transportsicherheitsbehörde weißt in dem offiziellen Untersuchungsbericht des Vorfalls /ATS 11/ darauf hin, dass SEE ein potentiell Risiko in der Luftfahrt darstellen. Sämtliche den Vorfall betreffende Informationen, Abbildungen und Bewertungen sind diesem Untersuchungsbericht entnommen. Zum besseren Verständnis sind in In der Raumfahrt kommt es aufgrund der Einwirkung kosmischer Strahlung zu einer erhöhten Komponentenbelastung. Künstliche Raumflugkörper werden oft weit über ihre Auslegungslbensdauer hinaus betrieben. Somit konnten in der Vergangenheit bereits eine Reihe von verschiedenen strahlungsinduzierten Effekten und Beeinträchtigungen beobachtet werden. Ähnlich zu dem von der IAEA bekannten Incident Reporting System for Nuclear Installations /IAEA 18/ existiert eine für die Öffentlichkeit zugängliche „NASA Lessons Learned“-Datenbank, die unter <https://llis.nasa.gov/> abgerufen werden kann /NAS 19/. Um einen Einblick in die thematische Relevanz und den Umfang der Datenbank in Bezug auf dieses Forschungsvorhaben zu gewinnen, wurden am 08.06.2018 gezielte Abfragen zu relevanten Suchbegriffen vorgenommen. Tab. 7.1 zeigt eine Übersicht und Einordnung einiger der genutzten Suchbegriffe und erhaltenen Ergebnisse.

Tab. 7.1 zeigt einige allgemeine Begriffe aus der Luftfahrt, sowie Details des betroffenen Flugzeugs, aufgeführt und erläutert.

Nach einem zunächst erwartungsgemäß verlaufenen Flug begann ADIRU 1 in einer Flughöhe von 37.000 ft (ca. 11 km) alternierende, fehlerhafte Datenwerte (oszillierende Datenspitzen) sämtlicher Flugparameter an andere Flugzeugsysteme auszugeben. Kurz darauf schaltete sich der Autopilot ab und eine Vielzahl an größtenteils fehlerhaft angeregter Warnmeldungen wurde im Cockpit visuell und akustisch angezeigt und erloschen kurz darauf wieder. Diese falschen Meldungen setzten sich über den gesamten Flug fort. Nach wenigen Minuten drückte das FCPC als Reaktion auf Datenspitzen des AOA die Nase des Flugzeuges abrupt herunter. Das Flugkontrollsystem reagierte die ersten 2 Sekunden nicht auf Bewegungen des Steuerknüppels durch den Piloten. Während dieser 2 Sekunden verlor das Flugzeug ca. 150 ft (\approx 45 m) an Höhe. Fast alle nicht angeschnallten Insassen wurden dabei verletzt. Nach einigen Minuten kam es zu einem zweiten, weniger schwerwiegenden Herunterdrücken der Flugzeugnase.

Tab. 7.3 Erläuterung einiger wichtiger Begriffe und Systeme in Zusammenhang mit dem dargelegten Flugzeugunfall

Begriff	Bedeutung
Electrical Flight Control System (EFCS)	Das EFCS des betroffenen A330 ist ein „fly-by-wire“ System. Somit gibt es keine direkte mechanische Verbindung zwischen den meisten Bedienelementen des Cockpits und der Flugsteuerung. Stattdessen werden die Befehle von Flugkontrollcomputern über elektrische Impulse an die hydraulischen Stellantriebe der Flugsteuerung gesendet. Falls das EFCS einen zu hohen AOA detektiert leitet es ein automatisches Herunterdrücken der Flugzeugnase ein.
Flight Control Primary Computers (FCPC): Haupt-Flugrechner	Ein FCPC erstellt Berechnungen für die Flugzeugsteuerung und sendet Signale an die Aktuatoren von Steuerflächen und Motoren.
Angle Of Attack (AOA): Anstellwinkel, Anströmungswinkel	Der AOA ist der vertikale Winkel eines Flügels in Relation zur Luftströmung und dient als wichtiger Parameter, mit dem das EFCS die Neigung des Flugzeugs kontrolliert.
Air Data Inertial Reference Unit (ADIRU)	Ein ADIRU stellt Daten über eine Vielzahl von Flugparametern zur Verfügung. Diese werden an zahlreiche andere Flugzeugsysteme, wie z. B. Fluganzeigen, Autopiloten und EFCS weitergeleitet.
Air Data and Inertial Reference System (ADIRS)	Das ADIRS stellt wichtige Informationen über die Flugzeugumgebung (z. B. Luftdruck und Temperatur), den Status des Flugzeugs relativ zur Umgebung (z. B. Luftgeschwindigkeit, Höhe und AOA), sowie den Status des Flugzeugs im Verhältnis zur Erde (Position, Bewegung und Orientierung) zur Verfügung. Aus Gründen der Redundanz waren drei ADIRUs (ADIRU 1, ADIRU 2, ADIRU 3) Teil des ADIRS. Diese drei ADIRUs sind vom gleichen Typ, stellen Werte der gleichen Informationen bereit und arbeiten unabhängig voneinander.

Abb. 7.7 illustriert einen Teil der Schäden, die im Flugzeug durch die plötzlichen Sinkflüge entstanden sind. Während des gesamten Flugs funktionierten die anderen beiden ADIRUs normal. Aufgrund der Verletzungen und der Unvorhersehbarkeit des weiteren Flugzeugverhaltens wurde eine Notlandung in Learmonth (Australien) vorgenommen.



Abb. 7.7 Foto eines Teils der Schäden, die an der Decke des Passagierraums über dem Gang entstanden sind /ATS 11/

Das abnormale Verhalten der betroffenen ADIRU hielt bis zu ihrem Abschalten an. Nach einem Neustart der ADIRU verhielt sich diese normal, was auf einen Soft Error⁵¹ schließen lässt. Auslöser des Ereignisses war eine Kombination von unzureichendem Design der FCPC-Software und einem Fehlermodus einer der drei ADIRUs. Das unzureichende Softwaredesign bestand darin, dass in dem sehr seltenen Fall einer Übertragung mehrerer Datenspitzen des AOA von einem ADIRU den FCPC veranlassen kann, die Nase des Flugzeuges herunterzudrücken. Mögliche Auslöser des ADIRU-Fehlermodus werden gegen Ende dieses Unterkapitels diskutiert.

⁵¹ Soft Errors können durch verschiedene Faktoren, wie beispielsweise Softwarefehler, Softwarekorruption oder Hardwareanomalien verursacht werden. Hardwareanomalien können durch Umgebungsfaktoren wie beispielsweise Temperatur, Vibrationen, elektromagnetischer Störungen oder SEEs ausgelöst werden. Gegen Ende von Abschnitt 7.2.2.1 werden die möglichen Auslöser genauer betrachtet.

Vollautomatische FCPCs, wie sie in A330/A340-Flugzeugen genutzt werden, setzen zwingend die Kenntnis des korrekten AOA voraus. Um Redundanz und Fehlertoleranz zu garantieren, besaß das Flugzeug 3 ADIRUs, mit jeweils einer Instrumentierung zur Bestimmung des AOA. Der FCPC vergleicht die drei unabhängigen AOA Werte auf Konsistenz. Hierzu wird u.a. geprüft, ob einer der drei AOA Werte um mehr als einen vordefinierten Wert vom Median⁵² der drei AOA Werte abweicht. Im Normalfall, wenn alle drei AOA Werte konsistent und gültig⁵³ sind, nutzt der FCPC den Mittelwert von AOA 1 und AOA 2 als $AOA_{FCPC\ Input}$ ⁵⁴. Falls jedoch AOA 1 oder AOA 2 signifikant vom Median aller drei Werte abweicht, nutzt der FCPC für 1,2 Sekunden den letzten gültigen $AOA_{FCPC\ Input}$. Wenn einer der AOA-Werte länger als 1 Sekunde für mehr als einen festgesetzten Wert vom Median der drei AOA-Werte abweichen sollte, ignoriert der FCPC für den Rest des Fluges den betroffenen Teil des abweichenden ADIRUs. Für nachfolgende Berechnungen des $AOA_{FCPC\ Input}$ wird der Mittelwert der beiden anderen AOAs genutzt. Falls die Abweichung des AOA jedoch nicht länger als 1 Sekunde anhält, wird nach den 1,2 Sekunden wieder der Mittelwert von AOA 1 und AOA 2 vom FCPC genutzt, ohne eine Konsistenzprüfung durchzuführen. Abb. 7.8 zeigt ein Schema dieses Algorithmus. Diese Methode ist sehr effektiv bei der Ermittlung eines möglichst korrekten AOA Wertes, falls einzelne Datenspitzen auftreten, versagt aber, falls in einem Abstand von 1,2 Sekunden zwei Datenspitzen in den AOA-Werten auftreten. Während des Vorfalls wurden die meisten, jedoch nicht alle, AOA 1 Datenspitzen mit einem Ungültigkeits-Indikator versehen. Der Fehlermodus des Auftretens von einer Vielzahl von unbemerkten Datenspitzen ist in der Vergangenheit nicht beobachtet worden und wurde in der Sicherheitsanalyse des ADIRU-Herstellers nicht identifiziert und analysiert. Andere Flugzeugtypen der Herstellers Airbus, wie bspw. der A320 und A380, wären von dem Auftreten von Datenspitzen der ADIRUs nicht signifikant beeinträchtigt worden, da diese einen anderen Algorithmus zur Verarbeitung der AOA-Daten nutzen.

⁵² Der Median ist der Wert, der genau „in der Mitte“ steht, wenn man die Werte eines Wertesatzes der Größe nach sortiert.

⁵³ In bestimmten Situationen werden Werte des ADIRU zusammen mit einem Ungültigkeitsindikator weitergeleitet.

⁵⁴ $AOA_{FCPC\ Input}$ ist der Wert, den der Haupt-Flugrechner für weitere Berechnungen nutzt.

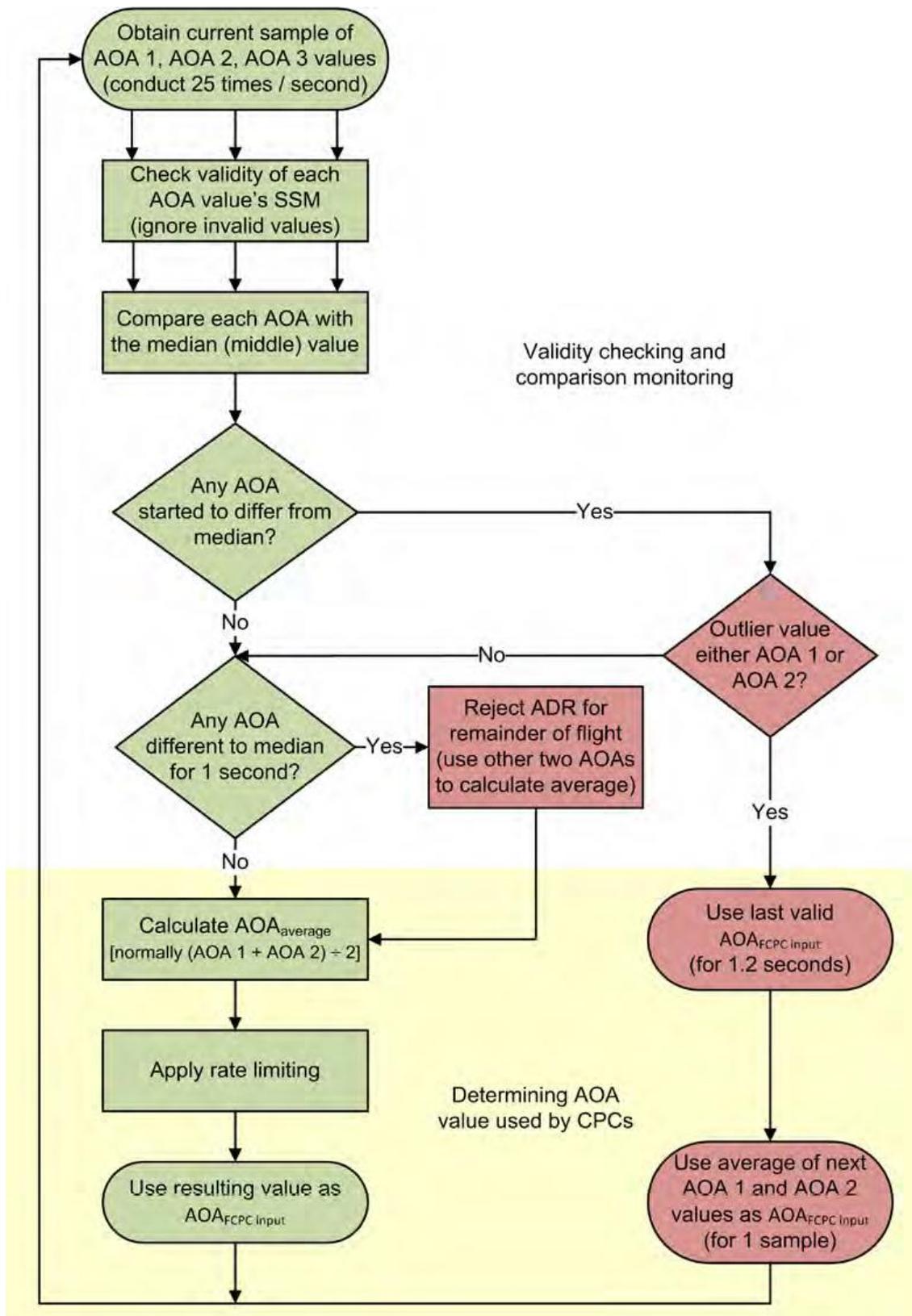


Abb. 7.8 Graphische Darstellung des FCPC Algorithmus zur Verarbeitung der AOA-Werte /ATS 11/

Abb. 7.9 zeigt eine Übersicht über verschiedene Warnmeldungen und angezeigte Flugparameter im zeitlichen Umfeld der zwei Sinkflüge. Das plötzliche Eintreten der kurzzeitig angezeigten Warnmeldungen und die abrupten Änderungen des (falsch) angezeigten AOA 1 (rot) zwischen 0° und ca. $\pm 50^\circ$ ⁵⁵ sind deutlich zu erkennen. Der zeitliche Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Datenspitzen des AOA-1 mit Werten von jeweils $50,625^\circ$ und den beiden steilen Sinkflügen wird deutlich:

- Daten-Spitze um 04:42:26 UTC - erster Sinkflug um 04:42:27 UTC,
- Daten-Spitze um 04:45:08 UTC - zweiter Sinkflug um 04:42:09 UTC.

Es gibt insgesamt drei bekannte Fälle, in denen Datenspitzen zu einem Fehlermodus eines ADIRU geführt haben. Neben dem hier dargestellten Ereignis vom 07.10.2008 gab es im Vorfeld am 12.09.2006 einen Vorfall mit derselben ADIRU im selben Flugzeug sowie einen Vorfall am 27.12.2008 mit einer baugleichen ADIRU in einem anderen Flugzeug vom Typ A330.

Bewertung möglicher Auslöser

Sämtliche Bewertungen und Schlussfolgerungen, sowie auch alle weiteren Informationen des Kapitels 7.2.2.1, sind dem offiziellen Untersuchungsbericht der australischen Transportsicherheitsbehörde /ATS 11/ entnommen. Nach ausführlichen Untersuchungen wurden gemäß /ATS 11/ mehrere potentiellen Auslöser identifiziert und die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens bewertet. Die wichtigsten Aspekte dieser Untersuchungsergebnisse der australischen Transportsicherheitsbehörde sind in Tab. 7.4 zusammengefasst. Definitive Schlussfolgerungen konnten nicht gezogen werden. Es gibt jedoch ausreichende Informationen aus verschiedenen Quellen, die nahelegen, dass die meisten potentiell möglichen Auslöser sehr unwahrscheinlich gewesen sind. Wie man in der Tabelle erkennt, wurden mit Ausnahme von SEE (letzte Tabellenzeile) sämtliche potentielle Auslöser als unwahrscheinlich oder sehr unwahrscheinlich bewertet. Für SEE ist eine Bewertung aufgrund unzureichender Belege nicht möglich. Das betroffene ADIRU-Modell hatte jedoch eine nachgewiesene Anfälligkeit für SEE, wobei die Berücksichtigung von SEEs während des Konstruktionsprozesses im Einklang mit der branchenüblichen Praxis zum Entwicklungszeitpunkt der ADIRU stand. Die Gesamtfehlerrate der ADIRU lag innerhalb der relevanten Designziele.

⁵⁵ Ab einem AOA von $15-20^\circ$ und größer beginnt laut /WIK 19/ bei vielen typischen Tragflächen der Strömungsabriss.

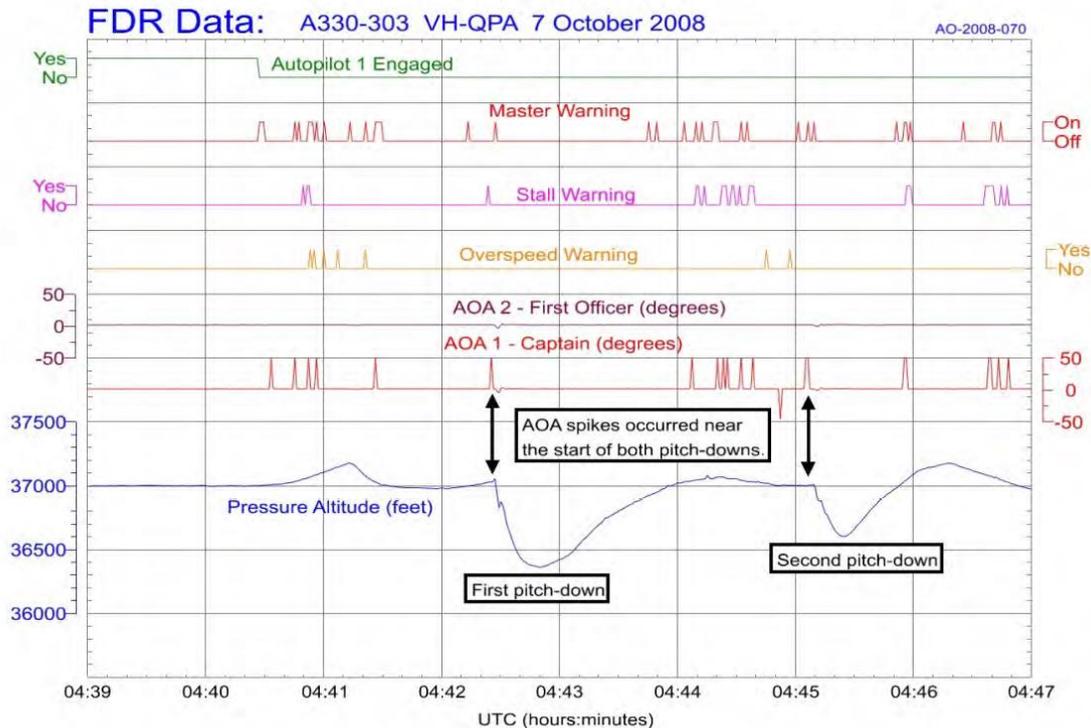


Abb. 7.9 Aufzeichnungen des Flugdatenschreibers für die Zeit von kurz vor Beginn des Ereignisses (04:40:26 UTC) bis kurz nach dem zweiten Sinkflug.

Erläuterung der Werte von oben nach unten:

- Grün: Status des Autopiloten 1 (Eingeschaltet/Ausgeschaltet)
- Magenta: Strömungsabriss liegt vor (Ja/Nein)
- Gelb: Warnmeldungen im Cockpit (Ausschlag der jeweiligen Line: Warnmeldung wurde im Cockpit angezeigt)
- Dunkelrot: AOA-2-Wert (in °), wie er dem Co-Piloten angezeigt wurde
- Rot: AOA-1-Wert (in °), wie er dem Piloten angezeigt wurde
- Blau: Angezeigter Wert des Höhenmessers (in ft) /ATS 11/

Es gab jedoch keine spezifischen Zertifizierungsanforderungen bezüglich SEE, und zum Ereigniszeitpunkt gab es keinen formalen Leitfaden wie SEE während des Designprozesses berücksichtigt werden sollten. Im Untersuchungsbericht der australischen Transportsicherheitsbehörde wird explizit darauf hingewiesen, dass SEE ein potentielles Risiko in der Luftfahrt darstellen und dies von Konstrukteuren berücksichtigt werden sollte. Das Systemdesign sollte daher spezifische Merkmale aufweisen, um die Auswirkungen von SEE zu verringern. Auf Grundlage des Untersuchungsberichtes /ATS 11/ konnte aus Sicht der GRS ein eindeutiger Auslöser des Ereignisses nicht identifiziert werden. Ein SEE als möglicher Auslöser erscheint der GRS aufgrund der in /ATS 11/ vorliegenden Informationen plausibel.

Tab. 7.4 Evaluation möglicher Auslöser /ATS 11/

Mögliche Auslöser	Schlüsselaspekte	Bewertung
Software Korruption ¹	<ul style="list-style-type: none"> • ADIRU-Software wurde nach dem Ereignis als unbeschädigt verifiziert. • Die ADIRU-Software wurde zwischen den beiden dieselbe ADIRU betreffenden Vorfällen¹ neu geladen und verifiziert. 	Sehr unwahrscheinlich
Softwarefehler („Bug“) ²	<ul style="list-style-type: none"> • Würde erwartungsgemäß nicht zweimal dieselbe Komponente (ADIRU) betreffen³, ohne auch bei anderen Komponenten aufzutreten. • Software zeigte bei Funktionstests keine Probleme. • Es wurden keine spezifischen Flugumstände identifiziert, die einen seltenen Fehler hervorrufen könnten. 	Sehr unwahrscheinlich
Hardwaredefekt	<ul style="list-style-type: none"> • Extensive Komponenten- und Baugruppentests zeigten keine Probleme. • Während der Sichtprüfung der Komponenten wurden keine Schäden oder andere Anomalien festgestellt. • Nicht schlüssig in Zusammenhang mit einem Soft Error. 	Sehr unwahrscheinlich
Einfluss der physischen Umgebung ⁴ (SEEs und elektromagnetische Störungen ⁵ werden separat betrachtet)	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Komponententests, die über die relevanten Standards⁶ hinausgingen, zeigten sich keine Fehler. • Sichtprüfungen der Komponenten zeigten keine physischen Schäden oder andere Anomalien, die in Zusammenhang mit normalen oder außergewöhnlichen Umgebungsbedingungen zu einem relevanten Gerätefehler führen könnten. • Die physikalische Umgebung während der drei Flüge⁷ war normal. • Während der Tests wurden keine Auffälligkeiten der Flugzeugumgebung beobachtet 	Sehr unwahrscheinlich
Elektromagnetische Störung durch flugzeugeigene Systeme	<ul style="list-style-type: none"> • Extensive Komponententests zeigten keine Probleme. • Messung der elektromagnetischen Umgebung im Flugzeug während Boden- und Flugtests zeigten nichts Ungewöhnliches oder Exzessives. • Es war nicht möglich die exakten Bedingungen, die während des Ereignisses herrschten, zu reproduzieren. • Tests der Kabelintegrität zeigten keine Probleme. • Die Flugzeugkonfiguration war weder einzigartig noch ungewöhnlich. • Es gab keine Probleme mit den anderen beiden ADIRUS, die im selben Flugzeug installiert waren. 	Unwahrscheinlich

Mögliche Auslöser	Schlüsselaspekte	Bewertung
Elektromagnetische Störung durch andere an Bord befindliche Systeme	<ul style="list-style-type: none"> • Es wurden keine relevanten Faktoren identifiziert. • Bei extensiven Gerätetests wurden keine Probleme identifiziert. • Messungen im Flugzeuginneren während der Nutzung persönlicher elektronischer Geräte zeigten sehr geringe Effekte auf das elektromagnetische Umfeld. 	Sehr unwahrscheinlich
Elektromagnetische Störung durch andere äußere Quellen ⁸	<ul style="list-style-type: none"> • Es wurden keine relevanten Faktoren identifiziert. • Bei extensiven Gerätetests wurden keine Probleme identifiziert. • Das elektromagnetische Umfeld zeigte sich während Flugtests weder exzessiv noch ungewöhnlich. • Es traten keine Probleme mit anderen Systemen während der Flüge auf. 	Sehr unwahrscheinlich
SEE	<ul style="list-style-type: none"> • Es gab keine ungewöhnliche Intensität hochenergetischer Teilchen während der drei Vorfälle. • Die ADIRUs hatten eingeschränkte Mechanismen zur Erkennung und Handhabung von SEE (d. h. keine Vorwärtsfehlerkorrektur). • Es wurden keine SEE-Tests an den betroffenen ADIRUS durchgeführt. • SEE-Tests an anderen ADIRUS führten nicht zu den beim Vorfall beobachteten Daten-Spitzen (wobei lediglich eingeschränkte Tests durchgeführt wurden). • Das exakte Ermitteln der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von zwei SEEs während der Lebenszeit einer Komponente³ erweist sich als schwierig. 	Unzureichende Belege zur Bewertung der Wahrscheinlichkeit

1 Software Korruption ist eine ungewollte Veränderung der Software, beispielsweise durch Computerviren oder den Einfluss von Strahlungseffekten.

2 Ein Softwarefehler ist ein Fehler, eine Schwachstelle, ein Versagen oder ein Mangel in einem Computerprogramm oder System, der dazu führt, dass dieses ein falsches oder unerwartetes Ergebnis liefert oder sich unbeabsichtigt verhält.

3 Dies bezieht sich auf die ADIRU der Ereignisse vom 12.09.2006 & 7.10.2018 (dem hier beschriebenen Ereignis); vgl. Abschnitt 7.2.2.1, letzter Absatz.

4 Zur physischen Umgebung zählen z.B.: Temperatur, Vibrationen, Kontamination mit Staub oder Flüssigkeiten, chemische Veränderungen (z.B. Korrosion) und mechanische Spannungen.

5 Elektromagnetische Störungen sind von einer externen Quelle erzeugt Störungen, die eine elektrische Schaltung durch elektromagnetische Induktion, elektrostatische Kopplung oder Leitfähigkeit beeinflussen.

6 Weitere Informationen zu den Standards und Tests sind /ATS 11/ zu entnehmen.

7 Dies bezieht sich auf die Ereignisse vom 12.09.2006, 7.10.2018 & 27.12.2018; vgl. Abschnitt 7.2.2.1, letzter Absatz.

8 Ein Beispiel für eine solche Quelle ist eine in der Nähe von Learmond gelegene Marinefunkstelle.

7.2.3 Medizintechnik

Im Bereich der implantierbaren elektronischen Medizinprodukte können strahlungsinduzierte Ausfälle potentiell schwerwiegende Auswirkungen haben. Betroffen sind hier beispielsweise Menschen, die Herzschrittmacher oder implantierbare Kardioverter-Defibrillatoren (ICD)⁵⁶ tragen. Drei signifikante Mechanismen können zu Soft Errors in elektronischen Medizinprodukten führen: Neutronenstrahlung als Teil der kosmischen Strahlung, Alphastrahler im Bauteil, sowie die durch thermische Neutronen verursachte Spaltung von ¹⁰B (siehe Kapitel 2.1.2). Da thermische Neutronen beispielsweise für radiologische Krebsbehandlungen durch künstliche Strahlungsquellen generiert werden können, sind die von ihnen hervorgerufenen Auswirkungen von besonderer Relevanz. Die Effekte dieser drei Mechanismen können durch das Design der Microchips, ihren Herstellungsprozess, die genutzte Verpackungstechnologie und durch Abschirmungsmechanismen der für das Implantat genutzten Materialien beeinflusst werden. /ZIE 04/

Es hat sich gezeigt, dass die während einer Computertomographie genutzte Röntgenstrahlung mit einer Energie im keV-Bereich keine Fehlfunktionen bei Herzschrittmachern hervorruft. Die für Strahlentherapie üblicherweise genutzte Strahlung im MeV-Bereich kann jedoch zu Problemen mit modernen Herzschrittmachern führen. Tab. 7.5 zeigt eine Übersicht einiger dokumentierter Auswirkungen von Strahlentherapie auf Schrittmacherpatienten. /SUN 05/

Tab. 7.5 Ausgewählte Beispiele der Folgen von Bestrahlungstherapie bei Patienten mit modernen Herzschrittmachern. Alle Zahlenwerte wurden aus /SUN 05/ übernommen

Jahr	Tumorart	Gesamtdosis	Schrittmacherdosis	Folgen
1982	Brustkrebs	30-36 Gy	< 36 Gy	Fehlfunktion des Schrittmachers
1983	Speiseröhrenkrebs	63 Gy	15 Gy	Schaden am Impulsgeber
1983	Lungenkrebs	50,8 Gy	22,07 Gy	Schaltkreisfehler / „Runaway Rythm“ ¹
1984	Hämangioperizytom ²	19,8 Gy	19,8 Gy	Tachykardie ³

⁵⁶ Implantat zur Normalisierung der Herzmuskelaktivität bei Herzkammerflattern oder Herzkammerflimmern.

Jahr	Tumorart	Gesamtdosis	Schrittmacherdosis	Folgen
1986	Uteruskarzinom	36,9 Gy	< 40 Gy	Schrittmacherinduzierte Tachykardie
1988	Lungenkrebs	35 Gy	< 35 Gy	Schrittmacherinduzierte Tachykardie
1990	Lungenkrebs	64 Gy	6,2 Gy	Keine Fehlfunktion
1993	Krebs	Cobalt ⁴	0,5 Gy	Keine Fehlfunktion im Demand-Modus
1994	Schilddrüsenkrebs	4,8 Gy	0,9 Gy	„Runaway Rythm“
2001	Brustkrebs	< 60 Gy	< 60 Gy	Keine Fehlfunktion

1. Potentiell tödliche Fehlfunktion eines Herzschrittmachers, mit schnellen und unregelmäßigen Ausschlägen in unphysiologischer Geschwindigkeit,
2. Sarkom im Bereich der Weichteile, häufig in der Unterhaut und in den Hirnhäuten,
3. Ein längerfristiger Pulsschlag von über 100 Schlägen/Minute bei Erwachsenen („Herzrasen“),
4. Die Angabe „Cobalt“ in der Spalte „Gesamtdosis“ wurde aus /SUN 05/ übernommen.

Wie bereits erwähnt, können strahlungsinduzierte Ausfälle nicht nur Herzschrittmacher, sondern auch implantierbare Kardioverter-Defibrillatoren (ICD) betreffen. ICD wurden in den 1990er Jahren als Goldstandard⁵⁷ in der Behandlung von Patienten, die einen drohenden plötzlichen Herztod⁵⁸ überlebt haben, etabliert. Das Gerät wird ähnlich zu einem Herzschrittmacher implantiert, wobei Elektroden direkt in die Herzkammer verlegt werden. Im Falle eines Herzkammerflimmerns oder -flatterns löst der ICD einen Stromstoß aus, der die Herzmuskelaktivität und Pumpleistung normalisiert.

Bradley et al. /BRAD 05/ haben eine Zusammenfassung der potentiellen Effekte von ionisierender Strahlung auf implantierbare medizinische Geräte veröffentlicht. Hierbei unterscheiden sie zwischen TID aufgrund von Ladungsakkumulation in der Oxidregion der Elektronik und SEE durch Teilchen mit hohem linearer Energietransfer (LET). Den Grenzwert der Energiedosis, die TID auslösen kann, liegt laut ihrer Vermutung bei ca. 10 Gy. Bei SEE müssten lediglich vom Verpackungsmaterial emittierte Alphateilchen und hochenergetische Neutronen als Teil der kosmischen Strahlung bzw. im Rahmen von Strahlentherapie berücksichtigt werden. An-

⁵⁷ In der Medizin allgemeingültiger und maßgebender Standard in der Behandlung einer Erkrankung.

⁵⁸ Plötzlich und unerwartet eingetretener Tod aufgrund einer kardialen Ursache.

dere Effekte, wie z. B. SEL, SEB und SEGR von Leistungs-MOSFETs würden dagegen vernachlässigbar selten auftreten. Tab. 7.6 zeigt eine Übersicht verschiedener alltäglicher, herstellungsbedingter oder medizinischer Strahlungsquellen und den potentiellen Auswirkungen auf implantierbare Medizinprodukte.

Die potentiell dramatischen Auswirkungen, die durch strahleninduzierte Ausfälle in ICD entstehen können, werden auch anhand des folgenden Ereignisses deutlich. Im Jahr 2005 veröffentlichte die Medizintechnikfirma St. Judes Medical eine Ärztemitteilung bezüglich einiger von ihr hergestellter ICD. Es hatte sich gezeigt, dass die Einwirkung von kosmischer Hintergrundstrahlung auf den SRAM der betroffenen ICD eine vorzeitige Entladung hervorrufen kann. Ein derartiger Vorfall zeigt folgende Effekte /STJ 05/:

- keine Schrittmacherfunktion oder Defibrillationstherapie während der ersten 48 Stunden,
- nach 48 Std.: "Hardware-Reset" (Sicherheitsmodus) aufgrund zu geringer Spannung,
- Tachykardie kann nicht erkannt oder behandelt werden,
- bei Geräteabfrage wird eine Warnung angezeigt.

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung war es bereits zu Vorfällen bei 53 implantierten und 7 noch nicht implantierten ICD gekommen, jedoch ohne ernsthafte Verletzungen oder Todesfälle. Insgesamt wurden ca. 36.000 ICD der betroffenen Gerätetypen implantiert. Als Vorgehen empfiehlt der Hersteller eine Geräteabfrage in dreimonatigen Intervallen sowie ein weiteres Handeln nach Einzelfallabwägung. Falls sich der ICD bereits im Hardware-Reset Modus befindet sollte er ausgetauscht werden. Aufgrund der Vorfälle hat St. Jude Medical den Chipzulieferer gewechselt. Tab. 7.7 zeigt eine abnehmende Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Fehlers am ICD in Zusammenhang mit der Implantationsdauer. /STJ 05/

Tab. 7.6 Übersicht über verschiedene Strahlungsquellen, denen implantierbare Geräte ausgesetzt sein können /BRAD 05/

Strahlungsquelle	Strahlungsart	Dosis	Kommentare
Natürlicher Ursprung			
Kosmische Strahlung	$p^1, \beta^2, n^3, \pi^4, \mu^5$	0,28 mGy (Lunge)	Neutronen der sek. kosm. Strahlung können zu SEU führen
Terrestrische Strahlung	α, β, γ^6	0,32 mGy (Lunge)	
Radionuklide (z. B. ^{40}K)	α, β, γ	0,50 mGy (Lunge)	
Elektronikverpackungen			
Spuren von Uran/Thorium	α	niedrige Dosis $E < 10MeV$	Kann zu SEU führen
Diagnostik/ Nuklearmedizin		Durchschnitts- dosis/Tests	
Schilddrüsen- scan (^{131}I Radionuklid)	γ (369, 640 keV) β^-	500 mGy (Schilddrüse)	
Lungenscan (^{99m}Tc Radionuklid)	γ (140 keV)	60 mGy (Schilddrüse)	
SPECT ⁷	wie oben	etwas > als obiger planare Scan	
PET ⁸	β^-, β^+	zehntel eines mGy	
In Vivo Neutronenaktivierungsanalyse ⁹ (PuBe)	n, γ , verschiedene andere	relativ gering	Neutronen SEU (Gerät $Q_c < 0,15pC$)
Diagnostik/Röntgenbasierte Techniken			
Fluoroskopie ¹⁰ (Schrittmacher Implantierung)	Röntgenstrahlung < 200 keV	1300 mGy (Haut)	
Fluoroskopie (Koronarangioplastie ¹¹)	Röntgenstrahlung < 200 keV	1000-5000 mGy (Haut)	
CT ¹²	Röntgenstrahlung < 200 keV	50-140 mGy (Gewebe)	
Röntgen-Thorax ¹³	Röntgenstrahlung < 200 keV	0,2 mGy (Eingang)	

Strahlungsquelle	Strahlungsart	Dosis	Kommentare
Therapeutisch/Nuklearmedizin			
Schilddrüsenkrebs	γ (360,640keV)	40 Gy (Schilddrüse)	(unter Annahme von 50.000 Mbq)
(¹³¹ I Radionuklide)	β^- (610 keV)	0,7 Gy (Gonade ¹³)	
Therapeutische/externe Strahlentherapie, Brachytherapie¹⁵		Vom Target absorbierte Dosis	
Teletherapie ¹⁶ (Brust)	<1MeV γ und β	50 (30-60) Gy	Gesamtdosis, SEU durch vom Kernphotoeffekt „herausgeschlagene“ Neutronen
Teletherapie (Lunge/Thorax)	<1MeV γ und β	60 (20-60) Gy	Gesamtdosis, SEU durch vom Kernphotoeffekt „herausgeschlagene“ Neutronen
Protonentherapie oder FNT ¹⁷	p, n	experimentelle Behandlung	Gesamtdosis, mögliche SEU
Hadronentherapie	Schwerionen	experimentelle Behandlung	Gesamtdosis, mögliche SEU
Bor-Neutroneneinfang-Therapie	n, α	experimentelle Behandlung	Gesamtdosis, mögliche SEU

- 1 Protonenstrahlung,
- 2 β -Strahlung,
- 3 Neutronenstrahlung,
- 4 Pionenstrahlung,
- 5 α -Strahlung,
- 6 γ -Strahlung,
- 7 Einzelphotonen-Emissionscomputertomographie,
- 8 Positronen-Emissions-Tomographie,
- 9 Methode zur Bestimmung der Konzentration von Elementen (z. B. Kalzium) in menschlichen oder tierischen Körpern,
- 10 Nutzung von Röntgenstrahlen zur kontinuierlichen Betrachtung von Vorgängen in menschlichen oder tierischen Körpern,
- 11 Erweitern verengter Herzkranzarterien ohne Operation,
- 12 Computertomographie,
- 13 Röntgenaufnahme des Brustkorbes in gerader oder seitlicher Ansicht,
- 14 Geschlechtsdrüse; männlich: Hoden; weiblich: Eierstock,
- 15 Generell: Therapie, bei der umschlossene Strahlenquellen innerhalb oder in unmittelbarer Nähe des zu bestrahlenden Gebietes im Körper platziert werden. Hier: LINAC (Linearbeschleuniger) oder externe Bestrahlung mit ⁶⁰Co,
- 16 Strahlentherapie, bei der die Strahlungsquelle sich in räumlicher Entfernung zum Körper befindet,
- 17 Fast Neutron Therapy: Bestrahlung mit schnellen (hochenergetischen) Neutronen.

Tab. 7.7 Risiko des Auftretens des ICD Fehlers für die verbleibende Implantationszeit, bei einer geplanten Lebensdauer des Gerätes von fünf Jahren /STJ 05/

Zeit seit Implantation	Geschätzte Häufigkeit eines Auftretens des Fehlers
0 Tage	0,00257
1 Jahr	0,00209
2 Jahre	0,00157
3 Jahre	0,00102
4 Jahre	0,00046

7.2.4 Ereignisse aus der kommerziellen Halbleitertechnologie

Neben den bereits in den Abschnitten 7.2.1 - 7.2.3 behandelten Ereignissen gibt es zahlreiche weitere Beispiele für strahleninduzierte Ausfälle im Bereich der kommerziellen Halbleitertechnologie. Im Folgenden werden einige Fälle beispielhaft vorgestellt.

1978 berichtete die Firma Intel über Probleme mit ihren Microchips, die zu Änderungen der gespeicherten Daten sowie dem „Einfrieren“⁵⁹ der Mikroprozessoren führten. Als ursächlich zeigte sich eine Uran- und Thoriumkontamination des Chipgehäuses. Zurückzuführen war dies auf eine Kontamination des zur Tonherstellung genutzten Flusswassers durch eine alte Uranmine. Eine Verwendung des Tons zur Herstellung der Keramikummantelung der Microchips führte so zu einer radioaktiven Belastung der Komponenten. Dieser Vorfall erreichte in den USA als „alpha particle problem“ große Bekanntheit und führte zur Einführung des Begriffes „soft error“. /ZIE 04/

Beim Hersteller IBM zeigten sich 1986 schwerwiegende Probleme mit Ausfällen von bereits ausgelieferten Großcomputern aufgrund von Problemen einzelner Computerchips der Pufferspeicher. Der für die Ausfälle verantwortliche Computerchip verfügte über eine Paritätskontrolle. Sobald diese einen Fehler im Pufferspeicher anzeigten, frohr der gesamte Großcomputer ein. Betroffen waren lediglich Computer, in denen Computerchips aus einer bestimmten IBM Fabrik verbaut waren. Identische Chips und Computer aus anderen IBM Fabriken wiesen keine Probleme auf. Nach Mai 1987 hergestellte Großcomputer waren zunächst nicht mehr

⁵⁹ Der Mikroprozessor (oder Computer) ist „erstarrt“ und reagiert nicht auf Eingaben.

betroffen, in den folgenden Monaten trat das Problem aber erneut bei wenigen Produktionschargen auf. Als Ursache zeigte sich eine isolierte Kontamination mit radioaktivem Polonium (^{210}Po), ohne das Auftreten weiterer radioaktive Nuklide. Dies lässt auf eine künstliche Kontamination schließen, da ^{210}Po in der Natur gewöhnlich zusammen mit weiteren Nukliden auftritt. Als Quelle erwies sich eine im Herstellungsprozess genutzte, mit ^{210}Po kontaminierte Salpetersäure. Die Zuliefererfirma nutzte ^{210}Po zum Säubern von Flaschen vor dem Abfüllen der Salpetersäure, wodurch einige wenige der Säureflaschen, und somit die in ihnen enthaltene Säure, unbeabsichtigt radioaktiv belastet wurde. Abb. 7.10 zeigt den Zusammenhang zwischen der Radioaktivität der Computerchips und den Ausfällen der Geräte nach Lieferung an den Kunden, sogenannte „field fails“, für die Jahre 1985 - 1987. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Fehlerrate 1987 auf das Tausendfache der Fehlerrate von 1985, die der durch kosmische Strahlung erwarteten Fehlerrate entspricht, angestiegen ist. Der Zusammenhang mit der radioaktiven Kontamination ist deutlich zu erkennen. /ZIE 04/, /ZIE 96/

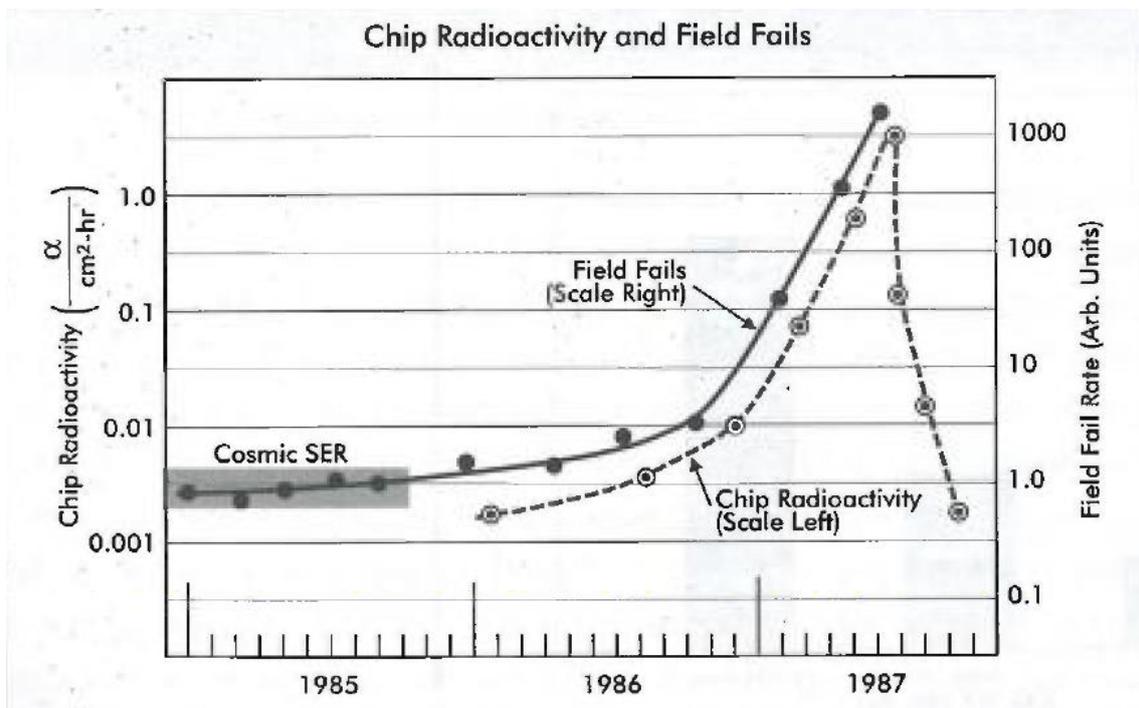


Abb. 7.10 Zusammenhang zwischen der Fehlerrate der betroffenen Computerchips in Großrechnern des Herstellers IBM (rechte Skala) und der gemessenen Radioaktivität der Computerchips (linke Skala) für die Jahre 1985 - 1987 /ZIE 04/

Ein weiteres Beispiel für Betriebserfahrung der Halbleiterindustrie mit strahlungsinduzierten Effekten ist der Fall einer Halbleiterfabrik, die aufgrund von im Ätzprozess der Halbleiterherstellung genutzter radioaktiv belasteter Phosphorsäure für acht Wochen geschlossen werden musste. /ZIE 04/

7.2.5 Fazit zur Auswertung der internationalen Betriebserfahrung

Die vielfältige internationale Betriebserfahrung aus verschiedenen technischen Bereichen zeigt, dass die Problematik der Strahlungseffekte auf programmierbare oder rechnerbasierte Bauteile in der Technik weit verbreitet ist und erhebliche Auswirkungen haben kann. Die z. T. schon bei normaler Hintergrundstrahlung auftretenden Effekte können beim Einsatz anfälliger Bauteile gravierende Auswirkungen haben. Dies zeigt die Notwendigkeit Bauteile nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik für ihren Einsatz zu qualifizieren und geeignete Bauteile für den vorgesehenen Einsatz auszuwählen. In der Kerntechnik, beim Rückbau sowie bei der Zwischen- und Endlagerung muss in Zukunft auf die Verwendung von einsatzgerechten, programmierbaren oder rechnerbasierten Bauteilen geachtet werden.

8 Basis einer Bewertungsmethode für SEE und TID

8.1 Einleitung

Im Folgenden werden zunächst für die Bewertungsmethode wichtige Begriffe definiert und sind in Abb. 8.1 grafisch beispielhaft dargestellt:

Betriebsmittel

„Ist die kleinste Einheit, die betrachtet wird und in sich funktionsfähig ist. Ein Betriebsmittel, wie zum Beispiel eine Armatur, besteht daher aus mehreren Bauteilen (Ventilkörper, Anschlussstutzen, Schweißnaht).“ /GRS 91/

Aggregat (Apparat, Messung, Regelung)

„Ist eine Einheit, die eine selbstständige Funktion innerhalb eines Prozesses wahrnimmt, ohne seine Steuerung und Energieversorgung. Es besteht aus einzelnen Betriebsmitteln. Beispiel: Pumpe mit Pumpenmotor, Kupplung, allerdings ohne Antriebssteuerung und Schaltanlagenabzweig“ /GRS 91/

Komponente

„Ist ein Aggregat einschließlich zugehöriger Steuerung und Energieversorgung, aber ohne eventuell notwendige Hilfssysteme, wie z. B. Öl- oder Sperrwasserversorgung. Zur Energieversorgung gehören der Schaltanlagenabzweig bzw. der Leistungsschalter. Die Grenze des Abzweiges ist der Anschluss an die Sammelschiene. Diese Betriebsmittel werden der Komponente als Ganzes zugeordnet. Zur Steuerung gehört der Steuerbaustein auf dem Wartenpult, die Betätigungsbausteine sowie die Vorrangbausteine.“ /GRS 91/

Funktionseinheit

„Komponente einschließlich ihrer zugehörigen Schutzeinrichtung, Hilfs- und Versorgungseinrichtungen wie z. B. Lagertemperaturüberwachung, Sperrwasserversorgung und Ölkühler.“ /GRS 91/

Strang/Teilstrang

„Ist Teil eines Systems, der allein oder in Kombination mit anderen Teilsystemen/Strängen eine Funktion innerhalb eines Systems wahrnehmen kann. Es ist also eine Einheit aus meh-

renen Komponenten. Ein redundantes System besteht aus mehreren Strängen. Das Nachkühl-system beispielsweise aus vier Strängen. Innerhalb eines Stranges kann es einzelne Teilstränge geben. Beispiel: Druckspeichereinspeisung mit den Teilsträngen [...] für die einzelnen Druckspeicher.“ /GRS 91/

System

„Zusammenschaltung von Strängen mit mehreren Komponenten zur Erfüllung einer selbstständigen Aufgabe innerhalb des Gesamtprozesses Beispiel: Notkühlsystem, Druckhaltesystem.“ /GRS 91/

Bauteil

Teile eines Betriebsmittels wie z. B. Mikroprozessor, Ventilkörper oder Anschlussstutzen.

Im Folgenden werden anhand von Ablaufdiagrammen die einzelnen Bewertungsmethoden im Detail erläutert.

Bei der Entwicklung der Basis für eine Bewertungsmethode wurden sowohl Betrachtungen von Single Event Effects als auch die Betrachtung der Langzeiteffekte berücksichtigt. Hierzu wurden die Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln wie z.B. die Erfahrungen aus der amerikanischen Luftfahrtindustrie bzw. Luftfahrtbehörde herangezogen. Da die Bewertung stark abhängig vom Bauteil und den Einsatzbedingungen ist, werden hier zwei generische Methoden vorgestellt, wobei hinter den einzelnen Punkten jeweils detaillierte, auf die spezielle Anwendung bezogene, Betrachtungen und Tests stehen. Im Kapitel 8.2 wird die Basis für eine Bewertungsmethode für SEE dargestellt, in Kapitel 8.3 erfolgt die Betrachtung für den Einfluss von TID.

Ziel dieser Methode ist es zu zeigen, dass die betrachteten Systeme ausreichend vor den Einwirkungen von Strahlung geschützt sind. Anforderungen an die Methode waren u. a., dass sie für die Einflüsse von SEE und TID abdeckend sein muss. Bei den Effekten müssen die verschiedenen Arten von SEE betrachtet werden und die Sensibilität gegenüber verschiedener SEE bzw. TID mit einbezogen werden. Weiterhin müssen sowohl sicherheitstechnisch wichtige Systeme und betriebliche Systeme betrachtet werden. Um diesen Forderungen gerecht zu werden, wurden zwei Ebenen eingeführt, welche Systeme/Betriebsmittel/Komponenten und Bauteile abdecken, womit die möglichen Einsatzzwecke abgedeckt sind. Die sicherheitstechnische Einstufung stellt sicher, dass die für den Einsatzzweck anzuwendenden

Regelwerke und Normen mit einbezogen werden und so alle Anforderungen eingehalten werden. Es werden verschiedene Felder, in denen Schutzmechanismen etabliert werden können, in die Betrachtung mit einbezogen. Diese Felder sind Systemdesign, Bauteildesign, Komponentenwahl und Tests.

Das hier dargestellte Vorgehen, zunächst eine Trennung der Ebenen „System / Komponente/ Betriebsmittel“ und „Bauteil“ vorzunehmen und damit zwei Ausgangspunkte für eine Sicherheitsanalyse zu schaffen, basiert auf den Forschungsergebnissen der amerikanischen Luftfahrtbehörde FAA /HUG 16/. Das Vorgehen in der Luftfahrt verläuft ähnlich den Betrachtungen in der Kerntechnik: Die Systeme werden je nach sicherheitstechnischer Bedeutung eingeteilt und dann in mehreren Schritten bis zum Bauteil heruntergebrochen. So können dann Anforderungen an einzelne Bauteile je nach sicherheitstechnischer Bedeutung gestellt werden und eine Bewertungsmethode angewendet werden. In der Kerntechnik verläuft die Einteilung in sicherheitstechnische Systeme ähnlich. Der Ansatz aus der Luftfahrt wird daher auch für die Kerntechnik als sinnvoll angesehen und deshalb in angepasster Weise übernommen. Das Modell aus der Luftfahrt enthält ebenfalls zwei Ebenen, die aufgrund der oben aufgeführten Ähnlichkeiten übernommen wurden. Auch angewandte Verfahren wie die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (engl. Failure Mode and Effects Analysis, kurz FMEA) werden sowohl in der Luftfahrt, als auch in der Kerntechnik eingesetzt. Betrachtungsweisen wie z. B. Budgetbetrachtungen wurden nicht übernommen. Die Auswahl für die zwei gewählten Ebenen wird im Folgenden motiviert:

Der Ausfall eines Betriebsmittels (beispielsweise eines Messumformers) auf Bauteileebene wird zunächst dahingehend zu untersucht, ob sensitive Bauteile in den Betriebsmitteln verbaut sind, ob vorhandene Mitigationsmöglichkeiten etabliert sind, aber nicht gegriffen haben und daraus ergibt sich grundsätzlich die Eignung oder Nichteignung dieses Betriebsmittels. Diese Analyseschritte werden auf Bauteilebene durch die Bewertungsmethode abgedeckt.

Den Ausgangspunkt in der System- / Komponenten- / Betriebsmittelebene wählt man, sofern die Möglichkeit besteht, Änderungen am System, beispielsweise durch Nachrüstung zusätzlicher abschirmender Barrieren, durchzuführen oder ein Neubau eines Systems geplant wird. Die vorherrschenden Randbedingungen und ergriffenen Mitigationsmöglichkeiten können sich in diesem Szenario gegenseitig beeinflussen. So bietet diese Herangehensweise den Vorteil, ehe sich die notwendigen Analysen auf Bauteilebene anschließen, die vorherrschenden Rand-

bedingungen auf Bauteilebene möglichst positiv zu beeinflussen und im weiteren Bewertungsprozess das Bauteil mit höherer Wahrscheinlichkeit als geeignet zu betrachten. Es wird an verschiedenen Stellen im Bewertungsprozess auf Datenerhebungen bzw. Situationseinschätzungen wie der Definition der vor Ort herrschenden Randbedingungen oder den im betrachteten Bauteil bereits vorhandenen Mitigationsmöglichkeiten verwiesen, die im Schaubild durch Rauten oder Rechtecke symbolisiert und durch eines oder mehrere Kapitel dieses Berichts abgehandelt werden.

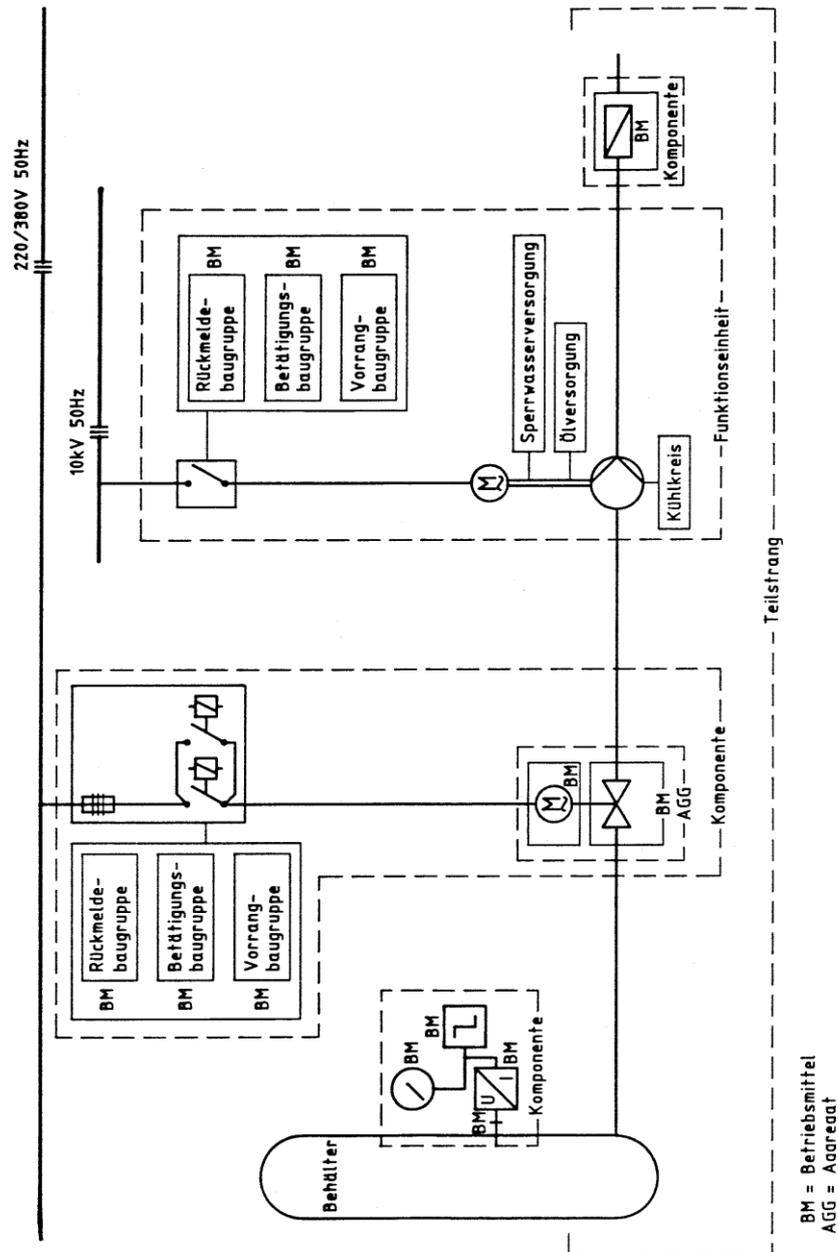


Abb. 8.1 Beispielhafte Aufgliederung eines Teilstrangs /GRS 91/

8.2 Basis Bewertungsmethode für SEE

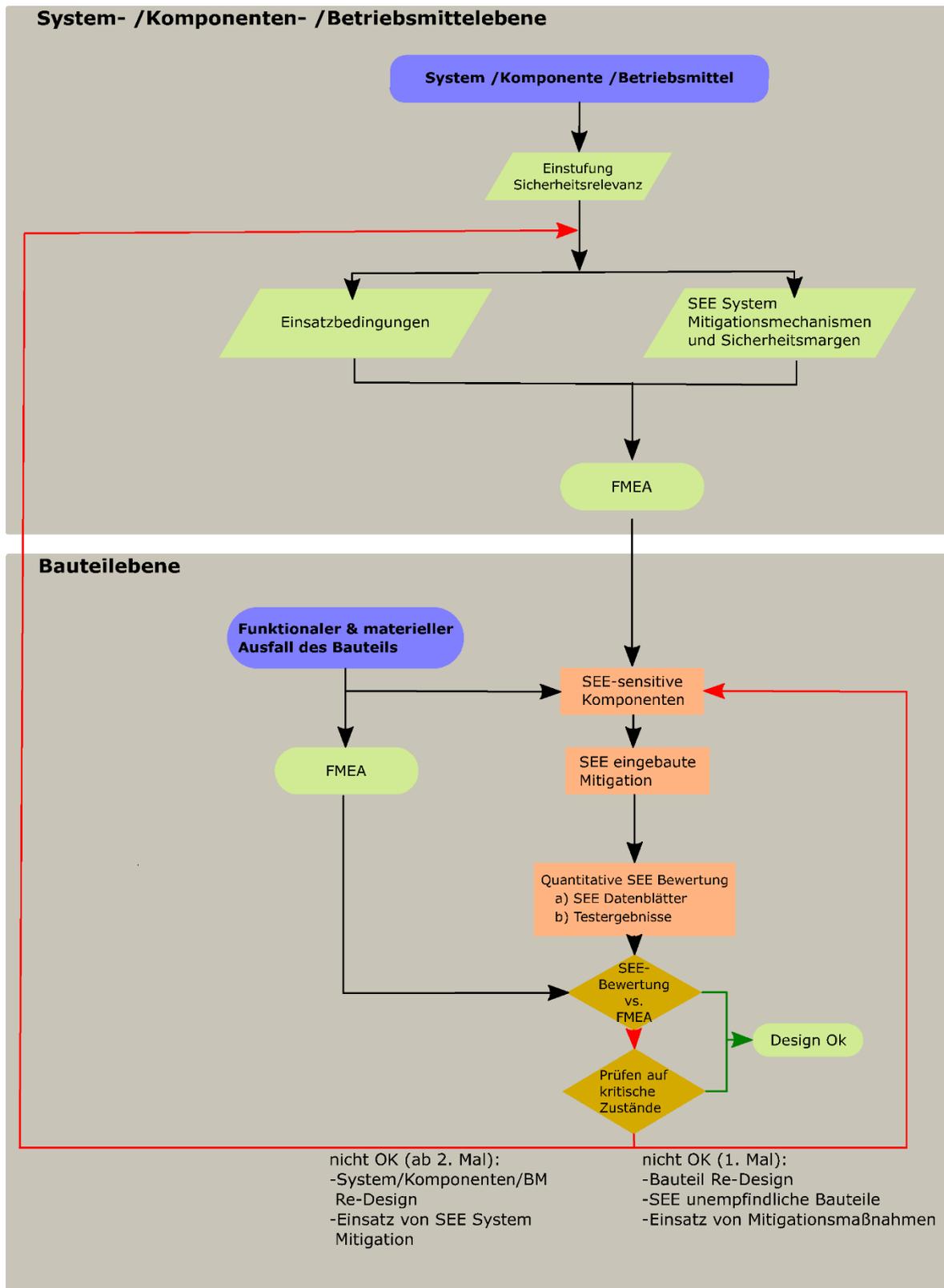


Abb. 8.2 Übersicht der Basis einer Bewertungsmethode für Single Event Effects

8.2.1 Bewertungsmethode auf System-/ Komponenten-/ Betriebsmittelebene

Schritt 1:

System /Komponente /Betriebsmittel

Als erstes steht die Definition der System-/ Komponenten-/Betriebsmittelfunktion mit allen notwendigen Komponenten und Aufbauten, Abb. 8.2.

Schritt 2:

Einstufung
Sicherheitsrelevanz

Anschließend wird eine Bewertung der Sicherheitsrelevanz des Systems/ der Komponente/des Betriebsmittels- vorgenommen (z. B. aufgrund des zugrundeliegenden Regelwerks). Hieraus leiten sich die regulatorischen und sicherheitstechnischen Anforderungen an System, Komponente oder Betriebsmittel ab.

Schritt 3:

Einsatzbedingungen

Die Einsatzbedingungen wie z. B. Umweltbedingungen werden ermittelt. Hierzu zählt auch die detaillierte Kenntnis der Strahlungsumgebung.

SEE System
Mitigationsmechanismen
und Sicherheitsmargen

Weiterhin werden hier die geplanten Mitigationsmechanismen gegen SEE an die Einsatzbedingungen angepasst und Sicherheitsmargen definiert.

Schritt 4:

FMEA

Die ermittelten Daten gehen in eine sog. Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (engl. Failure Mode and Effects Analysis, kurz FMEA) ein. Hierbei werden potentielle Fehlerursachen identifiziert.

Schritt 5:

SEE-sensitive
Komponenten

Auf Bauteilebene folgt eine Identifizierung von Bauteilen, welche sensitiv gegen SEE sind. Hier müssen die Fehlermöglichkeiten der FMEA aufgegriffen werden

Schritt 6:

SEE eingebaute
Mitigation

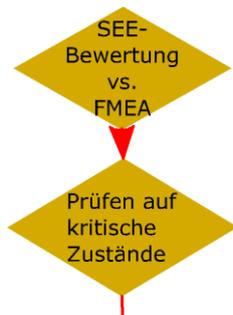
Eingebaute Mitigationsmechanismen auf Bauteilebene werden ermittelt.

Schritt 7:

Quantitative SEE Bewertung
a) SEE Datenblätter
b) Testergebnisse

Die so gewonnenen Daten fließen in eine quantitative Bewertung hinsichtlich SEE ein. Hierzu werden die erhaltenen Werte für den Einsatz im System mit Datenblättern und Testergebnissen für die Suszeptibilität gegenüber SEE verglichen. Dies setzt die genaue Kenntnis der im Bauteil verwendeten Halbleiterbauteile voraus.

Schritt 8:



Nachfolgend werden die aus dem letzten Schritt 7 gewonnenen Informationen mit den Ergebnissen einer FMEA (System, Hardware) verglichen. Hier sollte sich im positiven Fall zeigen, dass Bauteilausfälle durch den Einfluss eines SEE gegenüber den sonstigen, in der FMEA betrachteten Szenarien aufgrund ihrer Auftretswahrscheinlichkeit als vernachlässigbar bewertet werden können.

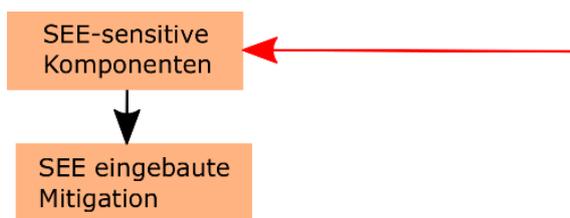
Design Ok

Gibt es hier keine Auffälligkeiten, so ist das Zusammenwirken mehrerer Komponenten in einem komplexen System als geeignet anzusehen.

Fällt die Bewertung hinsichtlich SEE gegenüber der FMEA nicht positiv aus, folgt ein Test auf kritische Zustände. Kann ein Ausfall eines Bauteils, einer Komponente bzw. eines Betriebsmittels im System zu einem unerwünschten Zustand führen oder ist ein Ausfall eines Bauteils, einer Komponente bzw. eines Betriebsmittels tolerierbar?

Kann diese Frage mit ja beantwortet werden, ist das Systemdesign ebenfalls als geeignet anzusehen.

Schritt 9:



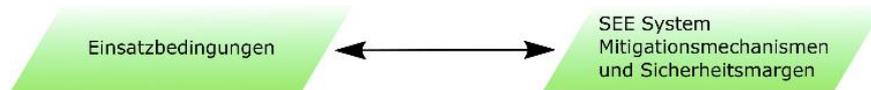
Treten kritische bzw. nicht tolerierbare Systemzustände auf, so erfolgt eine erste Schleife, mit der erneut die Methode auf Bauteilebene durchlaufen wird. Hierbei ist das Ziel das Ersetzen, die Anpassung oder Verbesserung des Bauteils selbst, ohne das Systemdesign zu verändern (siehe Kapitel 4.6). Beispielsweise können Bauteile, welche unempfindlich gegenüber SEE sind eingesetzt werden, ein Redesign der Bauteile kann durchgeführt werden oder Mitigationsmaßnahmen können ergriffen werden.

Diese Maßnahmen und die daraus sich ergebende neue Vergleichsbasis auf Grundlage der Schritte 4 bis 7 gehen erneut in die quantitative Bewertung hinsichtlich SEE und in den Vergleich mit der FMEA ein.

Fallen diese Analysen positiv aus, ist das System geeignet. Ist dies nicht der Fall, erfolgt erneut ein Test auf kritische oder nicht tolerierbare Zustände des Systems. Liegen die Abweichungen im tolerierbaren Bereich, ist das System für den Einsatz geeignet. Sind die zu erwartenden Ausfälle bzw. negativen Einflüsse im System nicht tolerierbar, so sind die Maßnahmen auf Bauteilebene erschöpft, da sich die Problematik weder durch andere Bauteile, Redesign oder

Mitigationsmaßnahmen lösen lässt. Abhilfemaßnahmen können somit nur auf System-/Komponenten-/Betriebsmittelebene ergriffen werden.

Schritt 10:



Auf der System-/Komponenten-/Betriebsmittelebene erfolgt zunächst eine Prüfung auf Mitigationsmaßnahmen gegen SEE, die im System ergriffen werden können. Hierbei werden auch Sicherheitsbarrieren im Systemaufbau mit einbezogen bzw. verbessert. Diese Betrachtungen erfolgen unter Einbeziehung der Einsatzbedingungen der Komponente des Betriebsmittels.

Diese neuen Daten fließen in eine erneute FMEA ein.

Mit diesen neuen Daten muss der Weg zurück zur Bauteilebene gegangen werden.

Schritt 4 – 9 wiederholen sich und Schritt 10 zurück in die System-/Komponenten-/Betriebsmittelebene wird so lange durchgeführt, bis das Design den Status „Ok“ erreicht oder der Einsatz des neuen Systems / der neuen Komponente verworfen werden muss.

8.2.2 Bewertungsmethode auf Bauteilebene

Schritt 1:

Funktionaler & materieller Ausfall des Bauteils

Nach Ausfall oder Auswahl des Bauteils erfolgt eine FMEA, Abb. 8.2. Weiterhin wird die Sensitivität gegenüber SEE sowie Ausfallraten und die SEE-Mitigation des Bauteils getestet bzw. recherchiert, hierzu werden Datenblätter oder Testergebnisse herangezogen.

Schritt 2:

Die so gewonnenen Daten fließen in eine quantitative Bewertung hinsichtlich SEE ein. Hierzu werden die ermittelten Werte für den Einsatz im System mit Datenblättern und Testergebnissen für Bewertung hinsichtlich SEE verglichen. Dies setzt die genaue Kenntnis der im Bauteil verwendeten Halbleiterbauteile voraus.

Schritt 3:

Nachfolgend werden die aus dem letzten Schritt gewonnenen Informationen mit den Ergebnissen einer FMEA (System, Hardware) verknüpft.

Hier sollte sich im positiven Fall zeigen, dass Ausfälle durch den Einfluss eines SEE vernachlässigbar sind und keinen Einfluss auf die in der FMEA betrachteten Szenarien haben.

Gibt es hier keine Auffälligkeiten, so ist das Zusammenwirken mehrerer Komponenten in einem komplexen System als geeignet anzusehen.

Fällt die Analyse gegenüber der FMEA nicht positiv aus, d. h. ein Ausfall aufgrund von Strahlung zu erwarten ist unter den gegebenen Bedingungen zu beachten, folgt ein Test auf kritische Zustände. Kann ein Ausfall eines Bauteils, einer Komponente bzw. eines Betriebsmittels im System zu einem kritischen Zustand führen oder ist ein Ausfall eines Bauteils, einer Komponente bzw. eines Betriebsmittels tolerierbar?

Kann der Ausfall eines Bauteils toleriert werden, ist das Systemdesign ebenfalls als geeignet anzusehen.

Schritt 4:

Können kritische Systemzustände auftreten, so erfolgt eine erste Schleife auf Bauteilebene. Hierbei geht es um das Ersetzen, die Anpassung oder Verbesserung des Bauteils selbst ohne das Systemdesign zu verändern (siehe Kapitel 4.6). Hierbei können Bauteile, welche unempfindlicher gegen SEE sind eingesetzt werden, ein Redesign der Bauteile kann durchgeführt werden oder Mitigationsmaßnahmen können ergriffen werden.

Diese Maßnahmen und die damit verbundenen neuen Daten gehen erneut in die quantitative Bewertung hinsichtlich SEE und in den Vergleich mit der FMEA ein.

Fallen diese Analysen positiv aus, ist das System geeignet. Ist dies nicht der Fall, erfolgt erneut ein Test auf kritische Zustände des Systems. Liegen die Abweichungen im tolerierbaren Bereich, ist das System für den Einsatz geeignet. Sind die zu erwartenden Ausfälle bzw. negativen Einflüsse im System nicht tolerierbar, so sind die Maßnahmen auf Bauteilebene erschöpft, da sich die Problematik weder durch andere Bauteile, Redesign oder Mitigationsmaßnahmen lösen lässt. Abhilfemaßnahmen können somit nur auf System-, Komponenten- bzw. Betriebsmittelebene ergriffen werden.

Schritt 5:

Auf der System-/Komponenten-/Betriebsmittelebene erfolgt zunächst eine Prüfung auf Systemmitigationsmaßnahmen gegen SEE, die ergriffen werden können. Hierbei werden auch Sicherheitsbarrieren im Systemaufbau mit einbezogen bzw. verbessert. Diese Betrachtungen erfolgen unter Einbeziehung der Einsatzbedingungen.

Diese neuen Daten fließen in eine erneute FMEA ein.

Mit diesen neuen Daten muss der Weg zurück zur Bauteilebene gegangen werden.

Schritt 2 – 4 wiederholen sich und Schritt 5 in die System-/Komponenten-/Betriebsmittelebene wird so lange durchgeführt, bis der Status „Ok“ erreicht ist.

8.3 Basis Bewertungsmethode für TID

Die Bewertungsmethode zu TID kann aus Sicht der GRS in analoger Weise wie die Bewertungsmethode für SEE verlaufen, da die Unterteilung in die zwei Ebenen und die damit verknüpften Schritte ihre Gültigkeit behalten. Es ist dabei aber zu beachten, dass sich die dahinterliegenden Punkte deutlich von denen bei der Betrachtung von SEE unterscheiden können (z. B. Experimente, Mitigationsmöglichkeiten und Testmethoden). Es ist wichtig die korrekten Werte und Testmethoden anzuwenden. Die Schritte aus Kapitel 8.2 sind auf die Bewertungsmethode für TID, siehe Abb. 8.3, analog anzuwenden.

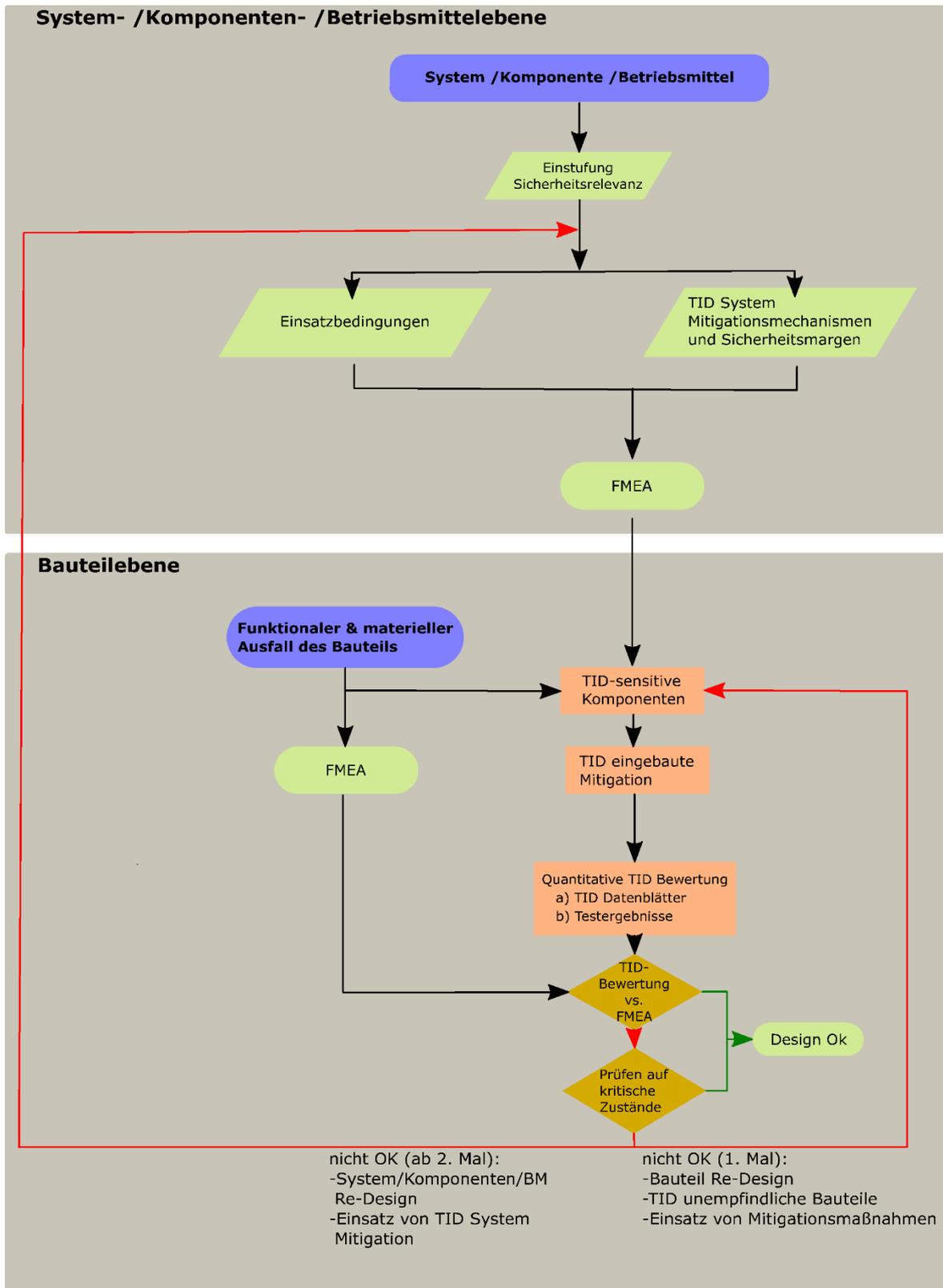


Abb. 8.3 Übersicht der Basis einer Bewertungsmethode für Total Ionizing Dose

8.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Basis einer Bewertungsmethode sowohl für Betrachtungen von Single Event Effects als auch die Betrachtung der Langzeiteffekte berücksichtigt. Dies geschieht anhand eines Zugangs in zwei Ebenen, der es ermöglicht je nach Anforderungsfall verschiedene Vorgehensweisen zu wählen, dabei aber immer sicherstellt, dass Schäden die in der betrachteten Umgebung durch SEE und / oder TID auftreten, abdeckend betrachtet werden. Die Basis für die Bewertungsgrundlage liegt in einer Bewertungsmethode, welche von der amerikanischen Luftfahrtbehörde veröffentlicht wurde. Aufgrund der ähnlichen Betrachtungsweisen von sicherheitstechnischen wichtigen und betrieblichen Systemen, sowie der sich analog ergebenden Fragestellung zum Einsatz halbleiterbasierter Bauteile in einer Strahlungsumgebung, wurde die Methode auch als sinnvoll für den Einsatz in der Kerntechnik betrachtet und angepasst.

Aus den Informationen, die der GRS zu den Ausfällen von betrieblichen Messumformern vorliegen, siehe Kapitel 7.1, lassen sich nicht genug Daten extrahieren, um die Methode auf diesen Fall anzuwenden.

9 Fazit

Die Auswirkung von Strahlung auf Halbleiterbauteile ist sehr vielfältig und wird besonders im Bereich der Luft- und Raumfahrt erforscht. Es gibt daher eine große Anzahl verschiedener Standards und Testmethoden, deren Herangehensweise einen Ansatz für die Bewertung dieser Komponenten zum Einsatz in einer kerntechnischen Anlage sein können.

Die Weite des Themengebietes wurde in den ersten Kapiteln durch Einführung in die zugrundeliegende Physik, den Aufbau und die Funktion betroffener Halbleiterbauteile und die durch Einwirkung von Strahlung auf diese Bauteile wirkenden Schadensmechanismen gezeigt. Diese Schadensmechanismen wurden in die Kategorien Single Event Effects (SEE), Total Ionizing Dose Effects (TID) und Versetzungsschäden im Atomgitter eingeordnet und deren Mitigationsmöglichkeiten beschrieben. In den darauffolgenden Kapiteln wurden einige der weltweit zur Qualifizierung von Halbleiterbauteilen zum Einsatz in strahlenbelasteten Umgebungen durchgeführten Testmethoden und verschiedene nationale und internationale Test- und Qualifizierungsstandards dargestellt. Hier sieht die GRS Hinweise dafür, dass bei der Qualifizierung von Betriebsmitteln gemäß KTA auch andere Strahlungsarten, insbesondere die Neutronenstrahlung, berücksichtigt werden sollten. Eine genauere Beurteilung kann Gegenstand weiterer Forschung sein.

Die Auswertung der Betriebserfahrung aus dem Vorläuferprojekt und den Gesprächen mit Vertretern der Industrie sowie der Blick auf andere Industrie- und Forschungszweige wie der Luft- und Raumfahrt, der Medizintechnik und der kommerziellen Halbleitertechnologie zeigen verschiedene Beispielfälle auf, in denen Fehlfunktionen und Ausfällen von Komponenten aufgrund von Strahlungseinfluss aufgetreten sind oder der Strahlungseinfluss als Ursache vermutet wird. Da die Auswirkungen in diesen Fällen zum Teil erheblich sind, zeigt sich hier die Relevanz der Betrachtung von Strahlungseffekten auf Halbleiterbauteile.

Betrachtet man Einflüsse von außen, kann es bei seltenen kosmischen Ereignissen, harter kosmischer Strahlung oder Sonneneruptionen ebenfalls zu einer starken Beeinflussung der Funktion von Komponenten und Systemen in der Leittechnik und der Energieversorgung kommen. Dies zeigen die genannten Beispiele aus den Kapiteln Luft- und Raumfahrt.

Die Grundzüge eines Bewertungsansatzes werden im Bericht dargestellt. Diese Methode leitet sich teilweise aus der Herangehensweise der amerikanischen Luftfahrtbehörde ab und ist

durch die vorgenommene Modifikation nach Einschätzung der GRS geeignet, den Anforderungen in der Kerntechnik gerecht zu werden. Die Methode bietet die Möglichkeit der Betrachtung auf System-/ Komponenten-/Betriebsmittelebene oder Bauteilebene und ist gleichermaßen für Einflüsse von SEE und TID geeignet. Die GRS hat Modifikationen der Methode vorgenommen, um diese an die Kerntechnik anzupassen. Hierbei wurden die vorgenommenen Schritte in der Luftfahrt überprüft, falls passend übernommen oder für die Kerntechnik angepasst. Unpassende oder für die Kerntechnik nicht relevante Schritte wurden gestrichen. Zudem wurde geprüft ob die vorher gestellten Anforderungen an die Methode abgedeckt wurden.

Der Einfluss von Strahlung auf halbleiterbasierte Bauteile bleibt auch nach dem Ausstieg aus der Kernenergie für Deutschland relevant, da diese Komponenten in einer Vielzahl von Systemen und Einrichtungen Verwendung findet und zukünftig Verwendung finden wird. Hier ist der Rückbau der deutschen Kernkraftwerke ebenso zu nennen wie Einrichtungen und Messtechnik in Zwischen- und Endlagern, insbesondere die Fassüberwachung, sowohl im Normalbetrieb als auch im Störfall.

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog to digital converter
ADIRU	Air data inertial reference unit
ADIRS	Air data and inertial reference system
AOA	Angle of attack
ASIC	Application-specific integrated circuit
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJT	Bipolar junction transistor
BRAM	Block random access memory
CMOS	Complementary metal-oxide semiconductor
COTS	Commercial off-the-shelf
CPU	Central processing unit
DRAM	Dynamic random access memory
DUT	Device under test
ECC	Error correcting code
ECSS	European Co-operation for Space Standardization
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only memory
EPROM	Erasable programmable read-only memory
EFCS	Electrical flight control system

FET	Feld-Effekt-Transistor
FF	Flipflop
FIT	Failure in time
FMEA	Failure mode and effects analysis
FPGA	Field programmable gate array
FS	File system
FTL	Flash-Translationsschicht
GCR	Galactic cosmic ray
GIDEP	Government-industry data exchange program
GPU	Graphics processing unit
HF	High frequency
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICD	Implantierbare Kardioverter-Defibrillatoren
I/O	Input/output
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LCD	Liquid crystal display
LET	Linear energy transfer
LUT	Lookup table
MBU	Multiple bit upset

MCU	Multiple cell upset
MOSFET	Metalloxid-Feldeffekttransistor
MLC	Multi level cells
NAND	NOT AND
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIEL	Non-ionizing energy loss
NOR	NOT OR
NSREC	Nuclear and space radiation effects conference
PLD	Programmable logic device
PN	Übergang aus p- und n-dotierten Halbleitermaterialien
PROM	Programmable read-only memory
RADECS	Radiation effects data workshop
RAM	Random access memory
ROM	Read-only memory
SEB	Single event burnout
SEDED	Single-error correction and double-error detection
SEE	Single event effects
SEFI	Single event functional interrupt
SEGR	Single event gate rupture

SEL	Single event latchup
SET	Single event transient
SEU	Single event upset
SLC	Single level cells
SRAM	Static random access memory
TID	Total ionization dose
TMR	Triple modular redundancy
TNID	Total non-ionizing dose
WL	Wordline

Literaturverzeichnis

- /ABB 00/ Datenblatt Contrans P Hart Messumformer ASD 800, ABB ehemals Hartmann & Braun, Stand 2000
- /ABB 00a/ Datenblatt Contrans P Hart Messumformer ASD 810, ABB ehemals Hartmann & Braun, Stand 2000
- /ABB 00b/ Datenblatt Contrans P Hart Messumformer ASK 800, ABB ehemals Hartmann & Braun, Stand 2000
- /ADE 08/ Adell, P., Allen, G.: Assessing and Mitigating Radiation Effects in Xilinx FPGAs
JPL 08-9 2/08.
- /ARM 03/ J.M. Armani, G. Simon, P.Poirot, *Low Energy Neutron Sensitivity of Recent Generation SRAMs*, Proceedings of RADECS 2003
- /AST 19/ ASTM International Standards
<https://www.astm.org/>
Abgerufen am 22.01.2019
- /ATS 11/ Australian Transport Safety Bureau
In-flight upset, 154 km west of Learmonth, Western Australia, 7 October 2008, VH-QPA, Airbus A330-303
ATSB Transport Safety Report
Aviation Occurrence Investigation AO-2008-070
Dezember 2011
- /BAU 05/ Baumann, R.: A tutorial on Single Event Effects in Advanced Commercial Silicon Technology. IRPS, 2005.
- /BED 196/ Bedingfield, K. L., Leach, R. D., Alexander, M. B.: Spacecraft System Failures and Anomalies Attributed to the Natural Space Environment, NASA Reference Publication 1390, August 1996

- /BMU 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke
vom 22. November 2012, Neufassung vom 3. März 2015 (Banz AT
30.03.2015 B2)
- /BRA 05/ Bradley; P. D., Normand E.
Radiotherapy to patients with artificial cardiac pacemakers
CANCER TREATMENT REVIEWS, pp. 474–486, 31
2005
- /BUT 73/ H. Butler, K. Wallace, C. Fulmer, *Half-Value Thickness Measurements of Ordinary Concrete for Neutrons from Cyclotron Targets*, Oak Ridge National Laboratory, 1973
- /CHA 99/ M. Chadwick, P. Young, *Evaluation of Gamma + ^{28}Si Cross Section for the Energy Range 1 to 150 MeV*, Los Alamos National Laboratory, 1999
- /CER 19/ CERN
<https://home.cern/science/physics/cosmic-rays-particles-outer-space>
Abgerufen am 01.02.2019
- /CLE 01/ Clemen, C.: Grundlagen der Mikroelektronik, Vorlesung WS 2000/2001 an der Fachhochschule Augsburg, Fachbereich Elektrotechnik.
- /CRI 08/ L. Crippa, R. Micheloni, I. Motta and M. Sangalli
Chapter 2 Nonvolatile Memories: NOR vs. NAND Architectures
Springer Verlag 2008
- /DIE 07/ Dierker, Ch.: Fehlertolerante Instrumentenrechner für kompakte Kameras auf Raumsonden, Cuvillier Verlag Göttingen, Dissertation, 2007.
- /DLR 19/ https://www.dlr.de/qp/en/desktopdefault.aspx/tabid-3090/4698_read-6879/
Abgerufen am 24.01.2019

- /EDM 00/ L. D. Edmonds, C. E. Barnes, L. Z. Scheick, *An Introduction to Space Radiation Effects on Microelectronics*, National Aeronautics Space Administration, Mai 2000
- /EET 05/ https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1233788, Artikel vom 17.03.2005, abgerufen 21.11.2017
- /ELE 12/ <http://www.elektroniknet.de/elektronik/halbleiter/keramikgehaeuse-sorgt-fuer-strahlungsfestigkeit-93415.html>, Artikel vom 30.11.2012, abgerufen 21.11.2017
- /ELV 19/ https://www.elv.de/module/community_expertenwissen/bilder_popup.aspx?id=108&bild_id=undefined
Abgerufen am 12.02.2019
- /ESCC 14/ Single Event Effect Test Method and Guidelines, ESCC Basic Specification No. 25100, ESA, Issue 2 Oktober 2014
- /ESCC 19/ <https://escies.org/webdocument/showArticle?id=229>
Abgerufen am 24.01.2019
- /EVR 19/ MIL-STD und Handbooks
<http://everyspec.com/>
Abgerufen am 24.01.2019
- /FAR 08/ Farokh, I., Nguyen, D.N., et al: Radiation Tests of Highly Scaled High Density Commercial Nonvolatile Flash Memories, JPL Publication, 2008.
- /FRA 19/ https://www.int.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/nukleare_effekteinelektronikundoptik/taetigkeitsprofil/displacement-damage.html
Abgerufen am 31.01.2019
- /FUC 15/ Fuchs, Ch. M.; Trinitis, C., Appel, N., Langer, M.: A fault tolerant radiation robust mass storage concept for highly scaled flash memory, 05.2015.

- /FRI 09/ Frimont, S.: Ein Ansatz für die Nutzung teildefekter Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) in der Serienproduktion. Dissertation. Uni Oldenburg. 13.10.2009.
- /GAW 14/ Gawlina-Schmidl, Y.: Analyse ioneninduzierter Ausfallmechanismen in hochintegrierten CMOS-Speicherzellen, Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TUM, 10.10.2014
- /GEO 08/ Georgakos, G., Borucki, L., Gawlina, Y.: Entwurfsregeln für integrierte SRAM Speicher zur Unterdrückung von Multi-Bit Fehlern in sub-100nm CMOS Technologien. 2. GMM/GI/ITG-Fachtagung: Zuverlässigkeit und Entwurf, pages 43-48, 2008.
- /GOV 59/ Government-Industry Data Exchange Program
GIDEP - P.O. Box 8000, Corona, CA 92878-8000, USA
<http://www.gidep.org>
- /GRS 91/ A. Bechtel, C. Verstegen
GRS-A-1796: Beschreibung eines Datenerfassungssystems zur Sammlung und Auswertung von Betriebsdaten in Kernkraftwerken
GRS, April 1991
- /GRS 15/ R. Arians, S. Arnold, S. Blum, M. Buchholz, A. Lochthofen, C. Quester, D. Sommer
Sicherheitstechnische Analyse zum Einsatz und Betrieb elektrotechnischer Einrichtungen in deutschen Kernkraftwerken, Überwachung und Schutz gegen sicherheitstechnisch bedeutsame Einwirkungen aus dem Verbundnetz sowie anderen äußeren Quellen
GRS, Oktober 2015
- /GUS 17/ Prof. Dr.-Ing. Frank Gustrau
Digitaltechnik
FH Dortmund, Oktober 2017
- /H&B 00/ Technische Information Contrans P HART Messumformer ASK 800 für Differenzdruck, Durchfluss und Füllstand, Hartmann & Braun/ABB, Stand 2000

- /HOC 08/ Hochreutener, H.: Transistoren als Schalter, Zentrum für Signalverarbeitung und Nachrichtentechnik, 25.04.2008.
- /HOL 02/ A. Holmes-Siedle, L. Adams, *Handbook of Radiation Effects*, Second Edition, Oxford University Press, 2002
- /HUG 16/ William J. Hughes
Single Event Effects Mitigation Techniques Report
Technical Center Aviation Research Division
Atlantic City International Airport, New Jersey, USA, Februar 2016
- /IAEA 16/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Application of Field Programmable Gate Arrays in Instrumentation and Control Systems of Nuclear Power Plants; IAEA Nuclear Energy Series, No. NP-T-3.17, Vienna 2016
- /IAEA 18/ Internationale Atomenergie-Organisation
<https://www.iaea.org/resources/databases/irsni>
- /JED 02/ JEDEC
JEDEC Manual of Organization and Procedure, Juli 2002
- /JED 19/ <https://www.jedec.org/>
Abgerufen am 24.01.2019
- /JOH 00/ A. H. Johnston and T. F. Miyahira
JPL: Latchup Test Considerations for Analog-to-Digital Converters
SEE Symposium, CA, USA, April 2000
- /JED 19/ JESD89A, 10/06
<https://www.jedec.org/standards-documents/dictionary/terms/multiple-bit-upset-mbu>
Abgerufen am 09.07.2019

- /JPL 17/ Jet Propulsion Laboratory (JPL):
Provide Adequate Overcurrent Circuit Protection for LEO
NASA Lessons Learned, Lesson Info 19501
14.02.2017
- /KES 13/ Kesel, F., Bartholomä, R.: Entwurf von digitalen Schaltungen und Systemen
mit HDLs und FPGAs, 3. Auflage, 2013.
- /KIP 17/ <http://elektronik-kurs.net/elektronik/kippschaltungen/>, abgerufen am
21.11.2017
- /KTA 15/ KTA 3505 Typprüfung von Messwertgebern und Messumformern der Sicher-
heitsleittechnik, Fassung 2015-11
- /LAN 16/ Michael F. L'Annunziata: Radioactivity and our well-being, Radioactivity (Sec-
ond Edition), 2016
- /LAN 19/ Los Alamos Neutron Science Center
<https://lansce.lanl.gov/>
Abgerufen am 22.01.2019
- /LUF 18/ Lufthansa Magazin
<https://magazin.lufthansa.com/xx/de/flotte/airbus-a380-800/>
Abgerufen am 18.01.2019
- /MAX 04/ Maxfield, C.: The Design Warrior's Guide to FPGAs. ISBN 0-7506-7604-3.
2004
- /MAY 79/ May, T.C., Woods, M.H.: Alpha-Particle-Induced Soft Errors in Dynamic Mem-
ories. IEEE Transactions on Electron Devices, 26(1):2-9, 1979.
- /MET 05/ E. Mettmann, T. Oberhausen, *Fachhefte für den Kraftwerksbetrieb, Heft 7*
Strahlenschutz, VGB PowerTech Service GmbH, 2005

- /MIL 95/ MIL-STD-750-1
https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/NSWC_Crane/SD-18/Test%20Methods/MILSTD750.pdf
 Abgerufen am 24.01.2019
- /NAP 18/ <https://www.nap.edu/read/24993/chapter/10#64>
 Testing at the Speed of Light: The State of U.S. Electronic Parts Space Radiation Testing Infrastructure, 2018
 Abgerufen am 22.01.2019
- /NAS 10/ R. Velazco, G. Foucard, P. Peronnard
 Combining Results of Accelerated Radiation Tests and Fault Injections to Predict the Error Rate of an Application Implemented in SRAM-based FPGAs
 NASA, 2010
- /NAS 17/ Martha V. O'Bryan, Kenneth A. LaBel, Edward P. Wilcox, Dakai Chen, Michael J. Campola, Megan C. Casey, Jean Marie Lauenstein, Edward J. Wyrwas, Steven M. Guertin, Jonathan A. Pellish, and Melanie D. Berg
Compendium of Current Single Event Effects Results from NASA Goddard Space Flight Center and NASA Electronic Parts and Packaging Program
 NASA, Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC), Radiation Effect Data Workshop proceedings, New Orleans, Louisiana, July 17-21, 2017
- /NAS 19/ National Aeronautics and Space Administration (NASA)
<https://www.nasa.gov/offices/oce/functions/lessons/index.html>
 Abgerufen am 24.02.2019
- /NAV 19/ NRL Naval Research Laboratory
https://www.nrl.navy.mil/estd/sites/www.nrl.navy.mil.estd/files/pdfs/pulsed_laser.pdf
 Abgerufen am 30.01.2019
- /NEU 75/ Neusüß, W.: Elektronische Schaltungen, ISBN 978-3-528-00824-6, 1975.
- /NIC 11/ M. Nicolaidis (Hrsg.), *Soft Errors in Modern Electronic Systems*, Frontiers in Electronic Testing, 2011

- /NIST 10/ M. Berger et al., *XCOM: Photon Cross Section Database*, National Institute of Standards and Technology, <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>, 2010
- /NOE 10/ Tammy Noergaard
Demystifying Embedded Systems Middleware
Copyright 2011 Elsevier Inc.
- /NRC 17/ NRC
<https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/sources/nat-bg-sources.html>
Abgerufen am 01.02.2018
- /NSR 15/ Shortcourse IEEE NSREC 2015, Konferenz
Boston, MA, USA, Juli 2018
- /NSR 18/ Shortcourse IEEE NSREC 2018, Konferenz
Hawaii, USA, Juli 2018
- /OECD 15/ Primary Radiation Damage in Materials
NEA/NSC/DOC(2015)9, OECD/NEA 2015
- /OLS 93/ Olsen, J., Becher, P. E., Fynbo, P. B., Raaby, P., Schultz, J.
Neutron-Induced Single Event Upsets in Static RAMS Observed at 10 KM Flight Altitude
IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 40, NO. 2
April 1993.
- /PET 11/ E. Petersen, *Single Event Effects in Aerospace*, John Wiley and Sons, 2011
- /POL 17/ C. Boatella Polo, *SEE Single Event Effects*
ESA-CERN-SCC Workshop, CERN, Mai 2017
- /POT 13/ Universität Potsdam
<https://www.uni-potsdam.de/u/physik/fprakti/ANLEIK1.pdf>
Abgerufen am 31.01.2019

- /PRI 02/ Pritchard, B. E., Swift, G. M., Johnston, A. H.
Radiation Effects Predicted, Observed, and Compared for Spacecraft Systems
IEEE Radiation Effects Data Workshop
10. Dezember 2002
- /QUI 08/ Quinn, H.: An Introduction to Mission Risk and Risk Mitigation for Xilinx SRAM
FPGAs.
- /RDB 19 / Radiation Data Base, NASA
<https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/RadDataBase/RadDataBase.html>
Abgerufen am 28.01.2019
- /RSK 08/ RSK–STELLUNGNAHME: Kühlmittelverluststörfälle mit Freisetzung von Iso-
liermaterial und anderen Stoffen in Druckwasserreaktoren - Ablösung der Ab-
lagerungen auf den Sumpfsieben, 13.03.2008 (406. Sitzung)
- /SEM 17/ [https://www.semiversus.com/dic/halbleiterelemente/statische_datenspei-
cher.html](https://www.semiversus.com/dic/halbleiterelemente/statische_datenspeicher.html), abgerufen am 28.11.2017
- /SEX 03/ F. W. Sexton, *Destructive Single-Event Effects in Semiconductor Devices and
ICs*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 50, No. 3, June 2003
- /SHO 15/ T. Shoji et al., *Observation and Analysis of Neutron-Induced Single-Event
Burnout in Silicon Power Diodes*, Special Issue on Robust Design and Relia-
bility in Power Electronics, 2015
- /SRI 19/ SRIM/TRIM
<http://srim.org/>
Abgerufen am 29.06.2017
- /STI 16/ L. Stiny, *Aktive elektronische Bauelemente*, Springer Vieweg, 2016
- /STJ 05/ St. Jude Medical
Wichtige Ärztemitteilung, Attachment No. 3 to OQLUM2018
6. Oktober 2005

- /SUN 05/ Sundar, S., Symonds, R.P., Deehan, C.
Radiotherapy to patients with artificial cardiac pacemakers
Cancer Treatment Reviews, 31, pp. 474–486
Oktober 2005
- /TAN 17/ Zhaohuan Tang et al.
SEGR- and SEB-hardened structure with DSPSOI in power MOSFETs
Journal of Semiconductors, Volume 38, Number 12, 2017
- /VAN 19/ Vanderbilt University
<https://creme.isde.vanderbilt.edu/CREME-MC/help/critical-charge-and-threshold-let>
Abgerufen am 16.05.2019
- /VAR 02/ Vargas, F., Nicolaidis, M.
SEU-tolerant SRAM design based on current monitoring
6. August 1994
- /WAN 08/ Fan Wang and Vishwani D. Agrawal
21st International Conference on VLSI Design - Single Event Upset: An Embedded Tutorial
Dept. of Electrical and Computer Engineering, Auburn University, Auburn, AL, USA, 2008
- /WIK 19/ https://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_attack#Critical_angle_of_attack
Abgerufen am 22.01.2019
- /WIK 19a/ https://de.wikipedia.org/wiki/Dynamic_Random_Access_Memory
Abgerufen am 22.01.2019
- /WIK 19b/ https://de.wikipedia.org/wiki/Static_random-access_memory
Abgerufen am 22.01.2019

- /YAN 09/ Sheng-sheng Yang, Xin Gao, Yun-fei Wang, Zhan-zu Feng
Displacement Damage Characterization of Electron Radiation in Triple- Junction GaAs Solar Cells
National key Lab. of Vacuum & Cryogenics Technology and Physics, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, China
- /ZIE 04/ Ziegler, J. F., Puchner, H.
SER-History, Trends and Challenges, A Guide for Designing with Memory ICs
Cypress Semiconductor Corporation
2004
- /ZIE 96/ Ziegler et al.
IBM experiments in soft fails in computer electronics (1987-1994)
IBM J. Res. Develop. Vol. 40, No. 1, pp.3-18. 1. Januar 1996

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schematische Darstellung der Kernspaltungsreaktion eines Bor-Neutroneneinfangs, wobei ein ^{10}B -Atom ein thermisches Neutron einfängt und spontan zerfällt, wodurch die Spaltprodukte ^4He (α -Teilchen) und ^7Li entstehen /LAN 16/.....	5
Abb. 2.2	Halbwertsdicke von Neutronen in Beton für verschiedenen Energien (ORNL – Oak Ridge National Laboratory, LRL - Lunar Receiving Laboratory) /BUT 73/.....	7
Abb. 2.3	Wirkungsquerschnitte für Photonen in Silizium /NIST 10/.....	10
Abb. 2.4	LET(E) in $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ für verschiedene Reaktionsprodukte in Silizium ($E < 10 \text{ MeV}$) /NIC 11/ Die schwarze Linie (—■—■—■) zeigt etwa den LET_{th} von $15 \text{ MeV cm}^2/\text{mg}$	13
Abb. 2.5	Beispiel für den Zusammenhang von Wirkungsquerschnitt und LET als Messung (schwarze Punkte) und Weibull-Fit (rot) /POL 17/	15
Abb. 2.6	Veranschaulichung der Abhängigkeit verschiedener charakterisierender Größen, die die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines SEE beeinflussen	17
Abb. 3.1	Einteilung von Feldeffekttransistoren /STI 16/	19
Abb. 3.2	Aufbau eines MOSFET mit n-leitendem Kanal (NMOS) mit den Anschlüssen S (Source), D (Drain) und G (Gate)	20
Abb. 3.3	Ausbildung des n-Kanals in der Nähe der Grenzschicht zwischen Substrat und Gateoxid /STI 16/	20
Abb. 3.4	Vereinfachter Querschnitt eines CMOS-Inverters mit p-Wanne /STI 16/.....	22
Abb. 3.5	Ein-Transistor DRAM-Zelle /STI 16/	23
Abb. 3.6	Statische CMOS-Gatter mit jeweils zwei Eingängen /STI 16/	23
Abb. 3.7	Aufbau einer bistabilen Kippstufe (Flipflop) aus Logikgattern links, zugehörige Wahrheitstabelle rechts (H: High, L: Low) /ELV 19/.....	25
Abb. 3.8	Inverterschaltung mit npn-Bipolartransistor /HOC 08/.....	25
Abb. 3.9	Schematische Darstellung (links) und Schichtaufbau eines CMOS-Inverters (rechts) /CLE 01/	26
Abb. 3.10	6-Transistor-SRAM /GAW 14/	27
Abb. 3.11	Aufbau DRAM-Zelle, nach /WIK 19a/	29

Abb. 3.12	Traditioneller Transistor und Floating Gate des Flash-Speichers, nach /NOE 10/	30
Abb. 3.13	Aufbau eines FPGA /IAEA 16/.....	32
Abb. 3.14	Darstellung der Funktion $y = a \& b! c$ in einem Logikblock eines FPGAs /MAX 04/	33
Abb. 4.1	Schadensmechanismen durch die Einwirkung von Strahlung.....	35
Abb. 4.2	PMOS und NMOS Aufbau des CMOS aus p- und n-dotierten Bereichen	37
Abb. 4.4	Ersatzschaltbild in der CMOS-Struktur, nach /POL 17/.....	38
Abb. 4.3	Die zwei gekoppelten parasitären Transistoren npn und pnp entstehen durch den natürlichen Aufbau der CMOS Struktur.....	38
Abb. 4.6	Verteilung der Elektronen und Löcher nach einem Durchgang eines schweren Ions /SEX 03/	40
Abb. 4.7	Abhängigkeit des SEGR von der Gate- und Drain-Spannung für verschiedene chemische Elemente /SEX 03/	41
Abb. 4.8	NMOS: Fortschreitende Verschiebung der Schwellspannung durch Erhöhung des Dosislevels /HOL 02/	46
Abb. 4.9	Frenkeldefekte im Kristallgitter. Zweidimensionales Atomgitter bestehend aus grünen und grauen Atomen. Zwischengitterplätze (grauer Kasten mit Atom) und verbleibende Leerstellen (leerer grauer Kasten) entstehen nach Energieübertrag von energiereichem Teilchen auf ein Atom des Kristallgitters, welches von seinem Platz gestoßen wurde.....	48
Abb. 5.1	Strahlungsdatenbank für Bauteile des NASA Goddard Space Flight Center. /RDB 19/	57
Abb. 5.2	SRIM/TRIM 2013, Auswahl des Targetmaterials aus dem Periodensystem	61
Abb. 5.3	SRIM/TRIM 2013, Auswahl gängiger Verbindungen für das Targetmaterial	61
Abb. 5.4	SRIM/TRIM 2013, Simulationsübersicht	62
Abb. 7.1	Verteilung der Ausfälle auf die betrachteten Jahre	76
Abb. 7.2	Funktionsschema ASK800 /ABB 00b/	77
Abb. 7.3	Ausfallort der Messumformer ASD 800 und ASK 800 (roter Blitz: Raum mit ausgefallenen Messumformern, orangener Kreis: RDB, orangenes Quadrat: biologisches Schild; innerer Kreis: Containment, äußerer Kreis: Reaktorgebäude)	78

Abb. 7.4	Dosisleistungskurve während der Versuchsdauer und Korrelation mit dem KKW-Betrieb	79
Abb. 7.5	Abhängigkeit des SEL-Wirkungsquerschnitts von LET bei verschiedenen Temperaturen /JOH 00/.....	80
Abb. 7.6	Vergleich der erwarteten und beobachteten SET in den Halbleiterrelais der Cassini-Raumsonde von 1997 bis 2006. Das Solar Maximum und GCR Minimum (GCR min.), sowie das Solar Minimum und GCR Maximum (GCR max.), sind hervorgehoben. Die erhöhte Doppelbitfehlerrate ist nicht dargestellt /PRI 02/.....	87
Abb. 7.7	Foto eines Teils der Schäden, die an der Decke des Passagierraums über dem Gang entstanden sind /ATS 11/.....	91
Abb. 7.8	Graphische Darstellung des FCPC Algorithmus zur Verarbeitung der AOA-Werte /ATS 11/.....	93
Abb. 7.9	Aufzeichnungen des Flugdatenschreibers für die Zeit von kurz vor Beginn des Ereignisses (04:40:26 UTC) bis kurz nach dem zweiten Sinkflug. Erläuterung der Werte von oben nach unten: - Grün: Status des Autopiloten 1 (Eingeschaltet/Ausgeschaltet) - Magenta: Strömungsabriss liegt vor (Ja/Nein) - Gelb: Warnmeldungen im Cockpit (Ausschlag der jeweiligen Line: Warnmeldung wurde im Cockpit angezeigt) - Dunkelrot: AOA-2-Wert (in °), wie er dem Co-Piloten angezeigt wurde - Rot: AOA-1-Wert (in °), wie er dem Piloten angezeigt wurde - Blau: Angezeigter Wert des Höhenmessers (in ft) /ATS 11/.....	95
Abb. 7.10	Zusammenhang zwischen der Fehlerrate der betroffenen Computerchips in Großrechnern des Herstellers IBM (rechte Skala) und der gemessenen Radioaktivität der Computerchips (linke Skala) für die Jahre 1985 - 1987 /ZIE 04/	104
Abb. 8.1	Beispielhafte Aufgliederung eines Teilstrangs /GRS 91/.....	110
Abb. 8.2	Übersicht der Basis einer Bewertungsmethode für Single Event Effects	111
Abb. 8.3	Übersicht der Basis einer Bewertungsmethode für Total Ionizing Dose.....	118

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de