

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