

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ziele des Buches	2
1.2	Mechatronik und ihre Zuverlässigkeit	2
1.3	Literatur	6
2	Grundlagen für eine Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme	7
2.1	Zuverlässigkeitsanalysen	7
2.1.1	Qualitative Analysen	7
2.1.2	Quantitative Zuverlässigkeitsanalysen	9
2.2	VDI 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme	21
2.2.1	Systementwurf	21
2.2.2	Domänenspezifischer Entwurf	22
2.2.3	Systemintegration	23
2.3	Fehler und Ausfälle in mechatronischen Systemen	23
2.3.1	Mechanik	24
2.3.2	Elektronik	24
2.3.3	Software	25
2.4	Zuverlässigkeit in den einzelnen Domänen der Mechatronik	25
2.4.1	Mechanik	25
2.4.2	Elektronik	26
2.4.3	Software	26
2.4.4	Forderung einer neuen Betrachtungsweise	27
2.5	Gemeinsame Sprache	27
2.6	Anforderungen an die Zuverlässigkeitsmodellierung	30
2.7	Aufteilungsstrategien	32
2.7.1	Gleichmäßige Aufteilung konstanter Ausfallraten	32
2.7.2	Aufteilung anhand der Systemkomplexität	32
2.7.3	Aufteilung auf Basis ähnlicher Systeme	33

2.7.4	Aufteilung auf Basis von Ausfallstatistiken.....	33
2.7.5	Methode nach Karmiol.....	33
2.7.6	Methode nach Bracha.....	34
2.7.7	Zusammenfassung der Aufteilungsstrategien	34
2.8	Zielvorgaben und Schweregrade	35
2.9	Verwenden von Netzstrukturen	36
2.9.1	Künstliche neuronale Netze	38
2.9.2	Bayes'sches Netz	40
2.9.3	Vergleich von Neuronalen Netzen und Bayes'schen Netzen anhand eines Anwendungsbeispiels.....	43
2.10	Literatur	43

3 Methodik zur Zuverlässigkeitsbewertung

	in frühen Entwicklungsphasen	47
3.1	Identifikation Topfunktion/Topfehlfunktion	48
3.2	Detaillierte Systemdarstellung.....	49
3.2.1	Qualitative Verhaltensmodelle.....	52
3.2.2	Qualitative Modellierungssprachen	53
3.2.3	Die Situationsbasierte Qualitative Modellbildung und Analyse (SQMA)	54
3.3	Ermittlung kritischer Komponenten	55
3.4	Datensammlung	56
3.4.1	Verwendung von Versuchsdaten.....	58
3.4.2	Nutzung von Netzstrukturen	60
3.4.3	Nutzung von quantitativem Expertenwissen.....	60
3.4.4	Nutzung von qualitativem Expertenwissen.....	61
3.4.5	Verwendung von quantitativem und qualitativem Expertenwissen	63
3.4.6	Verwendung von Ausfallratenkatalogen.....	63
3.5	Qualitative und quantitative Analyse.....	66
3.6	Vergleich des Analyseergebnisses mit dem Zuverlässigkeitsziel	70
3.7	Fallbeispiel für die Methodik der Zuverlässigkeitsbewertung.....	71
3.7.1	Identifikation Topfunktion/Topfehlfunktion.....	72
3.7.2	Detaillierte Systembeschreibung.....	73
3.7.3	Risikoanalyse	76
3.7.4	Datensammlung und Analyse	77
3.8	Wechselwirkungen	86
3.8.1	Beschreibung von Wechselwirkungen	86
3.8.2	Notation der Wechselwirkungen.....	87
3.8.3	Anwendungsbeispiel	92
3.9	Zuverlässigkeitssteigernde Maßnahmen für mechatronische Systeme	93
3.10	Zusammenfassung	95
3.11	Literatur	96

4 Mathematische Modelle zur quantitativen Analyse der Zuverlässigkeit 99

4.1 Lebensdaueranalyse (Survival Analysis)..... 99

 4.1.1 Einführung 99

 4.1.2 Das Modell der zufälligen Rechtszensierung..... 101

 4.1.3 Punkt- und Zählprozesse 103

 4.1.4 Das Aalen-Modell 105

 4.1.5 Das Cox-Modell..... 105

 4.1.6 Das Cox-Modell mit Change-Point..... 107

 4.1.7 Anpassungstests 109

 4.1.8 Anwendungen 111

4.2 Komplexe Systeme 120

 4.2.1 Einführung 121

 4.2.2 Copula-Modelle zur Berücksichtigung von Abhängigkeiten 122

 4.2.3 Vergleich von Lebensdauerverteilungen..... 126

 4.2.4 Importanzmaße für die Komponenten eines komplexen Systems 134

 4.2.5 Berücksichtigung ungenauer Informationen über die Verteilung der Komponentenlebensdauern 141

 4.2.6 Fallbeispiel..... 147

 4.2.7 Entwicklung eines JAVA-basierten Software Paketes: SyRBA 152

4.3 Literatur 154

5 Zuverlässigkeitsbetrachtung mechanischer Systemumfänge in frühen Entwicklungsphasen 157

5.1 Informationen in frühen Entwicklungsphasen 157

 5.1.1 Prinzipskizzen als Informationsträger 158

 5.1.2 Zuverlässigkeitsanalysen in frühen Entwicklungsphasen 159

5.2 Zuverlässigkeitssteigernde Maßnahmen in der Mechanik..... 165

 5.2.1 Methodisches Konstruieren..... 166

 5.2.2 Erhöhung der Zuverlässigkeit mechanischer Systeme durch Redundanzen 167

 5.2.3 Ursachen und Behebungsmöglichkeiten für Ausfälle mechanischer Systeme 169

 5.2.4 Werkstoffauswahl 176

 5.2.5 Einfluss von unsicheren Daten auf die Zuverlässigkeit ... 186

5.3 Kosten auf Basis unscharfer Daten..... 200

 5.3.1 Kurzkalkulation..... 201

 5.3.2 Sachmerkmalelisten 205

5.4 Zuverlässigkeit und Kosten 207

 5.4.1 Gesamtkostenmodell nach Selivanov..... 208

 5.4.2 Gesamtkostenmodell nach Churchman..... 209

5.4.3	Modell zur Optimierung von Zuverlässigkeit und Lebenslaufkosten	209
5.4.4	Modell zur Ermittlung des kostenoptimalen Redundanzgrades nach Köchel	210
5.4.5	Modell zur Optimierung der Entwicklungskosten	212
5.4.6	Aufwandsminimierungs-Algorithmus.....	212
5.4.7	Zuverlässigkeitskostenmodell nach Kohoutek.....	214
5.4.8	Kosten und Zuverlässigkeit als Auslegungstheoretischer Zusammenhang	214
5.5	Literatur	217

6	Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen am Beispiel feinwerktechnischer mechatronischer Systeme	221
6.1	Stand der Technik bei feinwerktechnischen mechatronischen Systemen.....	221
6.1.1	Zuverlässigkeitsangaben feinwerktechnischer mechatronischer Systeme allgemein	222
6.1.2	Verfügbarkeit konkreter Daten und gesicherter Erkenntnisse.....	225
6.1.3	Schlussfolgerungen für ein beispielhaftes Vorgehen	234
6.2	Auswahl der untersuchten feinwerktechnischen mechatronischen Systeme.....	235
6.2.1	Bürstenbehaftete Gleichstromkleinmotoren.....	235
6.2.2	Planetenradgetriebe mit Kunststoffverzahnung	238
6.2.3	Komplette feinwerktechnische Antriebssysteme	241
6.3	Versuchseinrichtungen und Prüfstrategie	241
6.3.1	Prüfstände und Prüfprogramme für Motoren und Systeme	242
6.3.2	Prüfstände und Prüfprogramme für Getriebe	250
6.4	Ergebnisse der Dauerversuche an Motoren und Komplettsystemen	256
6.4.1	Motoren mit Hohlläufern und Edelmetallbürsten	256
6.4.2	Motoren mit eisenbehaftetem Läufer und Edelmetallbürsten.....	272
6.4.3	Eisenbehaftete Motoren mit Kupfer-Graphit-Kommutierung	274
6.4.4	EC-Motoren	276
6.4.5	Komplette Antriebssysteme	276
6.4.6	Ermittlung der Verteilungsfunktionen	278
6.5	Ergebnisse der Dauerversuche an Getrieben	281
6.5.1	Ausfallursachen.....	281
6.5.2	Planetenradverschleiß in den einzelnen Getriebestufen...	284
6.5.3	Einfluss der Belastung bei gleichen Getrieben.....	287

6.5.4	Vergleich unterschiedlicher Getriebebauformen bei gleicher Leistung	290
6.5.5	Ermittelte Verteilungsfunktionen.....	294
6.6	Vergleich experimenteller und theoretischer Daten	297
6.6.1	Vergleich theoretischer und experimenteller Daten eines DC-Motors	297
6.6.2	Vergleich theoretischer und experimenteller Daten eines Planetenradgetriebes	299
6.6.3	Vergleich theoretischer und experimenteller Daten eines kompletten Antriebssystems	303
6.7	Schlussfolgerungen für frühe Entwicklungsphasen.....	305
6.7.1	Statistische Auswertung des Ausfallverhaltens und Nutzung für frühe Phasen.....	305
6.7.2	Erkenntnisse für die Komponenten- und Systementwicklung am Beispiel der Motoren.....	310
6.8	Zusammenfassung	312
6.9	Literatur	313
7	Zuverlässigkeit der Software in mechatronischen Systemen	317
7.1	Einführung.....	317
7.1.1	Ziele, Herausforderungen und Ansätze der frühzeitigen Analyse der Softwarezuverlässigkeit	318
7.1.2	Gliederung dieses Kapitels.....	320
7.2	Übersicht über die Methoden zur frühzeitigen Bewertung der Softwarezuverlässigkeit.....	322
7.2.1	Qualitative Zuverlässigkeitsanalyse.....	322
7.2.2	Quantitative Zuverlässigkeitsanalyse.....	330
7.3	Von der Idee zu den Zuverlässigkeitsanforderungen.....	341
7.3.1	Ermittlung der geforderten Funktionen.....	342
7.3.2	Formulierung der Anforderungen als Anwendungsfälle	343
7.3.3	Hilfsmittel zur Ermittlung der Anforderungen.....	345
7.4	Funktionale Modellierung mit dem Ziel der Zuverlässigkeitsanalyse	345
7.4.1	Funktionale Beschreibung programmierbarer mechatronischer Systeme.....	346
7.4.2	Situationsbasierte Qualitative Modellbildung und Analyse	348
7.4.3	Erweiterungen der Methode SQMA	355
7.4.4	Integrierte SQMA-Entwicklungs- und Visualisierungsumgebung	359
7.5	Rechnergestützte Analyse funktionaler Modelle.....	360
7.5.1	Überprüfung der Anforderungen am Modell.....	360
7.5.2	Analyse von Wechselwirkungen und das Erkennen von Fehlerzusammenhängen	362

7.5.3	Analyse des Auftretens und der Ursache von Fehlerauswirkungen	363
7.6	Muster für zuverlässigere mechatronische Systeme	368
7.6.1	Definitionen und Begriffe	368
7.6.2	Musterschablone für zuverlässigkeitssteigernde Maßnahmen in frühen Entwicklungsphasen	370
7.6.3	Fehlertoleranzmuster für programmierbare Systeme	373
7.6.4	Unterstützung bei der Auswahl von Mustern.....	375
7.7	Von empirischen Daten zurück in frühe Entwicklungsphasen	378
7.7.1	Sammlung empirischer Daten	378
7.7.2	Analyse der gesammelten Daten	381
7.8	IAS-Truck: Demonstrator eines programmierbaren mechatronischen Systems.....	381
7.8.1	Beschreibung des Demonstrators	382
7.8.2	Beispielhafte qualitative Modellbildung und Analyse	383
7.9	Literatur	384

8 Bewertung und Verbesserung

	der Zuverlässigkeit von mikroelektronischen Komponenten in mechatronischen Systemen	391
8.1	Zuverlässigkeit in der Mikroelektronik	393
8.1.1	Einordnung.....	393
8.1.2	Ausfallverhalten und Fehlerklassifikation	394
8.1.3	Entwurfsmethodik.....	398
8.1.4	Standardarchitekturen	406
8.1.5	Zuverlässigkeitsbegriff.....	409
8.2	Quantifizierung der Zuverlässigkeit von mikroelektronischen Systemen.....	411
8.2.1	Empirische Zuverlässigkeitsbewertung.....	411
8.2.2	Zuverlässigkeitsbewertungen auf verschiedenen Abstraktionsebenen	418
8.2.3	Zuverlässigkeitsbewertung von FPGA-Entwürfen	426
8.3	Zuverlässigkeitssteigernde Maßnahmen in der Mikroelektronik und ihre Bewertung	429
8.3.1	Fehlertoleranzmaßnahmen	429
8.3.2	Kosten zuverlässigkeitssteigernder Maßnahmen	440
8.4	Zuverlässiger Entwurf in der Informationsverarbeitung.....	444
8.4.1	Modellierung der Systemzuverlässigkeit in der Informationsverarbeitung.....	445
8.4.2	Zuverlässigkeitssteigerung von Hardware-/Softwaresystemen	454
8.5	Zusammenfassung	456
8.6	Literatur	457