

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 | Prinzipiskizzen 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 | Bürstenbehafte 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 Anorderungen 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 |