

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|--------|
| Vorwort | V |
| Vorwort zur ersten Auflage | VI |
| Inhaltsverzeichnis | IX |
| Einführung | XVII |
| I Grundlagen | 1 |
| 1 Mathematische Grundlagen aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung | 2 |
| 1.1 Mengenalgebra..... | 2 |
| 1.1.1 Grundbegriffe und Definitionen..... | 2 |
| 1.1.2 Mengenoperationen..... | 3 |
| 1.2 Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung | 6 |
| 1.2.1 Wahrscheinlichkeitsbegriff | 7 |
| 1.2.2 Axiomsystem von Kolmogorov | 8 |
| 1.2.3 Die bedingte Wahrscheinlichkeit | 12 |
| 1.2.4 Unabhängige Ereignisse..... | 14 |
| 1.2.5 Regel von der totalen Wahrscheinlichkeit..... | 15 |
| 1.2.6 Satz von Bayes | 16 |
| 1.3 Zufallsgrößen und ihre Wahrscheinlichkeitsverteilung | 18 |
| 1.3.1 Grundbegriffe..... | 18 |
| 1.3.2 Erwartungswert und Momente einer Verteilungsfunktion .. | 22 |
| 1.3.3 Quantil, Median und Modalwert | 28 |
| 2 Zuverlässigkeits- und Sicherheitskenngrößen | 33 |
| 2.1 Zuverlässigkeitskenngrößen nicht reparierbarer Systeme..... | 33 |
| 2.2 Empirische Zuverlässigkeitskenngrößen und weitere Zuverlässigkeitsmerkmale..... | 45 |
| 2.3 Zuverlässigkeitskenngrößen reparierbarer Systeme, Instandhaltung..... | 50 |
| 2.4 Sicherheitskenngrößen | 53 |
| 3 Einige wichtige Verteilungsfunktionen | 58 |
| 3.1 Einige wichtige Lebensdauerverteilungen und ihre Zuverlässigkeitskenngrößen..... | 58 |
| 3.1.1 Die Exponentialverteilung..... | 58 |
| 3.1.2 Die Weibull-Verteilung..... | 63 |
| 3.1.3 Die spezielle Erlang-Verteilung | 73 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.1.4 | Die Normalverteilung..... | 78 |
| 3.1.5 | Die logarithmische Normalverteilung..... | 82 |
| 3.1.6 | Asymptotische Extremwertverteilung..... | 88 |
| 3.2 | Einige wichtige diskrete Verteilungsfunktionen..... | 96 |
| 3.2.1 | Die Binomialverteilung..... | 96 |
| 3.2.2 | Die Poisson-Verteilung..... | 100 |
| 3.2.3 | Die hypergeometrische Verteilung..... | 103 |
| 3.3 | Abszissenttransformationen..... | 109 |
| 4 | Ausfallratenmodelle..... | 111 |
| 4.1 | Datenhandbücher..... | 113 |
| 4.2 | Konstante Ausfallrate..... | 117 |
| 4.3 | Zeitlich linear abhängige Ausfallrate..... | 117 |
| 4.4 | Durchschnittliche Ausfallrate..... | 126 |
| 4.5 | Zeitliche Schwankungen der Ausfallrate..... | 129 |
| II | Zuverlässigkeits- und Sicherheitsplanung..... | 131 |
| 5 | Sicherheits- und Zuverlässigkeitsmanagement..... | 132 |
| 5.1 | Zuverlässigkeitsprogrammplan..... | 133 |
| 5.2 | Zuverlässigkeitshandbuch..... | 140 |
| 5.3 | Der sicherheitstechnische Prozess..... | 142 |
| 5.3.1 | Der sicherheitstechnische Prozess in der zivilen Luftfahrtindustrie..... | 142 |
| 5.3.2 | Der funktionale Sicherheitsprozess in der Automobilindustrie..... | 155 |
| 6 | Zuverlässigkeitsanalyse einfacher Systemstrukturen..... | 169 |
| 6.1 | Graphische Darstellung von Systemkonfigurationen..... | 170 |
| 6.1.1 | Zuverlässigkeits-Blockschaltbild..... | 170 |
| 6.1.2 | Fehler- oder Funktionsbäume - dargestellt durch logische Symbole der Booleschen Algebra..... | 171 |
| 6.1.3 | Zustandsdiagramme (Zustandsübergangsgraphen)..... | 171 |
| 6.2 | Das logische Seriensystem..... | 172 |
| 6.3 | Das logische Parallelsystem..... | 174 |
| 6.4 | Das Parallel-Seriensystem..... | 179 |
| 6.5 | Die Brückenkonfiguration..... | 182 |
| 6.6 | Berücksichtigung mehrerer Ausfallarten..... | 186 |
| 6.6.1 | Das logische Seriensystem bei zwei Ausfallarten..... | 189 |
| 6.6.2 | Das logische Parallelsystem bei zwei Ausfallarten..... | 190 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.6.3 | Das logische Parallel- Seriensystem bei zwei Ausfallarten | 192 |
| 6.6.4 | Beliebige Konfigurationen | 197 |
| 7 | Zuverlässigkeitserhöhung in Planung und Praxis..... | 200 |
| 7.1 | Allgemeine Maßnahmen zur Zuverlässigkeitserhöhung..... | 200 |
| 7.2 | Begriff und Definition der Redundanz..... | 204 |
| 7.3 | Redundanzarten, Grundprinzipien | 206 |
| 7.4 | Die aktive Redundanz | 207 |
| 7.5 | Das mvn-System | 207 |
| 7.6 | Das nvn-System | 213 |
| 7.7 | Das Standby-System (passive Redundanz)..... | 217 |
| 8 | Boolesche Modellbildung..... | 222 |
| 8.1 | Begriffe und Regeln der Booleschen Algebra..... | 222 |
| 8.1.1 | Die Boolesche Funktion | 222 |
| 8.1.2 | Die Grundverknüpfungen..... | 224 |
| 8.1.3 | Axiome der Booleschen Algebra | 228 |
| 8.1.4 | Das Karnaugh-Veitch-Diagramm | 230 |
| 8.1.5 | Kanonische Darstellung von Booleschen Funktionen..... | 232 |
| 8.1.6 | Shannonsche Zerlegung | 240 |
| 8.1.7 | Die Boolesche Funktion mit reellen Variablen | 243 |
| 8.2 | Die Systemfunktion..... | 245 |
| 8.3 | Einführung von Wahrscheinlichkeiten..... | 249 |
| 8.4 | Die Fehlerbaumanalyse..... | 251 |
| 8.4.1 | Einführung..... | 251 |
| 8.4.2 | Darstellung monotoner Strukturen durch Minimalpfade und Minimalschnitte..... | 256 |
| 8.4.3 | Quantitative Fehlerbaumauswertung..... | 261 |
| 8.5 | Importanzkenngrößen | 272 |
| 8.5.1 | Die strukturelle Importanz | 272 |
| 8.5.2 | Die marginale Importanz..... | 276 |
| 8.5.3 | Die fraktionale Importanz | 279 |
| 8.5.4 | Die Barlow-Proschan-Importanz..... | 280 |
| 8.6 | Bestimmung der mittleren Häufigkeit von Systemausfällen sowie der mittleren Ausfall- und Betriebsdauer..... | 283 |
| 8.7 | Die induktive Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse..... | 288 |
| 9 | Zuverlässigkeitsbewertung mit Hilfe der Fuzzy-Logik | 290 |
| 9.1 | Grundlagen der Fuzzy-Logik | 291 |
| 9.1.1 | Verknüpfung unscharfer Mengen..... | 295 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 9.1.2 | Fuzzy-Relation | 297 |
| 9.1.3 | Erweiterungsprinzip | 302 |
| 9.2 | Prinzipieller Ablauf einer Fuzzy-Anwendung | 304 |
| 9.2.1 | Fuzzifizierung | 304 |
| 9.2.2 | Fuzzy-Inferenz | 305 |
| 9.2.3 | Defuzzifizierung | 306 |
| 9.3 | Anwendung der Fuzzy-Logik bei der FMEA | 312 |
| 9.3.1 | Eingangsgrößen | 312 |
| 9.3.2 | Fuzzifizierung | 315 |
| 9.3.3 | Die Verarbeitungsregeln | 319 |
| 9.3.4 | Berechnung der Zugehörigkeitsgrade | 320 |
| 9.3.5 | Defuzzifizierung | 322 |
| 9.4 | Die Fuzzy-Fehlerbaumanalyse | 323 |
| 9.4.1 | Das Fuzzy-Modell | 323 |
| 9.4.2 | Praktisches Anwendungsbeispiel | 328 |
| 10 | Einführung in die stochastischen Prozesse | 332 |
| 10.1 | Beurteilungskriterien stochastischer Prozesse | 335 |
| 10.1.1 | Definitionsspezifische Beurteilungskriterien | 335 |
| 10.1.1.1 | Markov-Bedingungen | 335 |
| 10.1.1.2 | Regenerationspunkte des Prozesses | 336 |
| 10.1.2 | Anwendungsspezifische Beurteilungskriterien | 336 |
| 10.1.2.1 | Akzeptanz von stochastischen Abhängigkeiten zwischen den Elementen des Prozesses | 336 |
| 10.1.2.2 | Anwendbare Verteilungsfunktionen der Zufallszeiten | 337 |
| 10.1.3 | Klassifizierung stochastischer Prozesse anhand der Beurteilungskriterien | 338 |
| 10.2 | Analysemöglichkeiten eines Parallelsystems mit zwei identischen Einheiten | 341 |
| 11 | Markovsche Modellbildung | 350 |
| 11.1 | Der Markovsche Prozess mit diskretem Parameterbereich und endlich vielen Zuständen (Markov-Kette) | 350 |
| 11.1.1 | Zustandsgleichung | 350 |
| 11.1.2 | Zustandsklassen | 354 |
| 11.1.3 | Die absorbierende homogene Markov-Kette | 356 |
| 11.1.4 | Ergodensatz für Markovsche Ketten | 361 |
| 11.2 | Der Markovsche Prozess mit kontinuierlichem Parameterraum und diskretem Zustandsraum | 364 |
| 11.2.1 | Zustandsgleichungen | 364 |
| 11.2.2 | Laplace-Transformation der Zustandsgleichung | 373 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 11.3 | Der Semi-Markov-Prozess..... | 382 |
| 11.3.1 | Einführung..... | 382 |
| 11.3.2 | Definition und Grundbegriffe..... | 383 |
| 11.3.3 | Der absorbierende Semi-Markov-Prozess..... | 392 |
| 11.3.4 | Der ergodische Semi-Markov-Prozess..... | 398 |
| 12 | Monte - Carlo - Simulation..... | 404 |
| 12.1 | Einführung | 404 |
| 12.2 | Grundlagen der Monte-Carlo-Simulation | 406 |
| 12.3 | Generierung von Zufallszahlen..... | 409 |
| 12.4 | Methoden zur Generierung beliebig verteilter Funktionen | 413 |
| 12.5 | Direkte Monte-Carlo-Simulation | 418 |
| 12.5.1 | Generierung eines Zustandsüberganges | 418 |
| 12.5.2 | Last-Event-Schätzer | 420 |
| 12.5.3 | Free-Flight-Schätzer..... | 420 |
| 12.6 | Anwendungsbeispiel | 424 |
| 13 | Zuverlässigkeitsbewertung mit Hilfe der Graphentheorie..... | 432 |
| 13.1 | Gerichteter Graph..... | 433 |
| 13.1.1 | Einige Grundbegriffe..... | 433 |
| 13.1.2 | Lineare Flussgraphen | 436 |
| 13.1.3 | Auswertung der linearen Flussgraphen mit Hilfe der Mason-Formel | 440 |
| 13.2 | Anwendung der linearen Flussgraphen auf diskrete Markov-Prozesse..... | 443 |
| 13.2.1 | Inhomogene Prozessdarstellung..... | 443 |
| 13.2.2 | Homogene Prozessdarstellung | 445 |
| 13.2.3 | Asymptotisches Verhalten..... | 448 |
| 13.2.4 | Erwartungswert und Eintrittswahrscheinlichkeit | 448 |
| 13.3 | Anwendung der linearen Flussgraphen auf stetige Markov-Prozesse..... | 449 |
| III | Zuverlässigkeitsprüfung | 461 |
| 14 | Stichprobenverteilung..... | 462 |
| 14.1 | Stichprobenverteilung des Mittelwertes..... | 462 |
| 14.2 | Stichprobenverteilung der Varianz | 467 |
| 14.3 | Stichprobenverteilung der Mittelwerte bei unbekannter Varianz .. | 468 |
| 14.4 | Stichprobenverteilung für die Differenz und Summe zweier arithmetischer Mittelwerte | 469 |
| 14.5 | Stichprobenverteilung des Quotienten zweier Varianzen | 471 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 15 | Grenzwertsätze und Gesetze der großen Zahlen | 472 |
| 15.1 | Grenzwertsätze und Approximationen | 472 |
| 15.1.1 | Approximation der Binomialverteilung durch die Poisson-Verteilung | 472 |
| 15.1.2 | Approximation der hypergeometrischen Verteilung durch eine Binomialverteilung | 472 |
| 15.1.3 | Approximation der Poisson-Verteilung durch eine Normalverteilung | 473 |
| 15.1.4 | Approximation der Binomialverteilung durch die Normalverteilung | 473 |
| 15.1.5 | Approximation der hypergeometrischen Verteilung durch die Normalverteilung | 475 |
| 15.1.6 | Zentraler Grenzwertsatz | 475 |
| 15.2 | Gesetz der großen Zahlen | 477 |
| 15.2.1 | Tschebyscheffsche Ungleichung | 477 |
| 15.2.2 | Satz von Bernoulli | 479 |
| 16 | Statistische Schätzung von Parametern | 480 |
| 16.1 | Eigenschaften von Schätzfunktionen | 480 |
| 16.2 | Vertrauensintervalle | 482 |
| 16.3 | Konfidenzintervall für den Erwartungswert und der Varianz bei normalverteilter Grundgesamtheit und Bestimmung des Stichprobenumfangs | 484 |
| 16.3.1 | Konfidenzintervall für den Erwartungswert | 484 |
| 16.3.2 | Konfidenzintervall für die Varianz | 490 |
| 16.3.3 | Bestimmung des Stichprobenumfangs | 490 |
| 16.4 | Die Maximum-Likelihood-Methode (M-L-M) | 495 |
| 16.4.1 | Maximum-Likelihood-Schätzer für die Parameter der Binomial- und Poisson-Verteilung | 498 |
| 16.4.2 | Maximum-Likelihood-Schätzer für den Parameter einer Exponentialfunktion | 500 |
| 16.4.3 | Maximum-Likelihood-Schätzer für die Parameter der Normal- und Lognormalverteilung | 500 |
| 16.4.4 | Maximum-Likelihood-Schätzer für die Parameter der Weibull-Verteilung | 501 |
| 16.5 | Maximum-Likelihood-Methode bei zensierter und gestutzter Stichprobe | 505 |
| 16.6 | Die Momentenmethode | 515 |
| 16.6.1 | Momentenschätzer für den Parameter einer Exponentialverteilung | 519 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 16.6.2 | Momentenschätzer für die Parameter einer Lognormalverteilung..... | 520 |
| 16.6.3 | Der Momentenschätzer für die Weibull-Verteilung..... | 521 |
| 16.7 | Lineare Regression und die Methode der kleinsten Quadrate..... | 521 |
| 17 | Bestimmung des Verteilungstyps..... | 525 |
| 17.1 | Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibull-Verteilung..... | 525 |
| 17.1.1 | Konstruktion des Wahrscheinlichkeitsnetzes..... | 525 |
| 17.1.2 | Gebrauchsanweisung für das Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibull-Verteilung nach Stange und Gumbel (DGQ -Lebensdauernetz)..... | 527 |
| 17.2 | Test zur Überprüfung des Verteilungstyps - Anpassungstest | 535 |
| 17.2.1 | Der Chi-Quadrat-Anpassungstest..... | 536 |
| 17.2.2 | Der Kolmogorov-Smirnov-Test (K-S-T) | 544 |
| 17.3 | Vergleich der beiden Anpassungstests..... | 551 |
| 18 | Test- und Prüfplanung..... | 552 |
| 18.1 | Statistische Verfahren | 556 |
| 18.1.1 | Der Binomialprüfplan als attributiver Abnahmeprüfplan | 556 |
| 18.1.2 | Sequentialprüfung | 559 |
| 18.1.3 | Success-Run | 564 |
| 18.1.4 | Sudden-Death..... | 569 |
| 18.1.5 | Lebensdauertests | 576 |
| 18.1.6 | End-of-Life-Tests | 579 |
| 18.2 | Laststeigerung zur Reduzierung des Prüfaufwandes | 580 |
| 18.2.1 | Temperaturabhängigkeit nach Arrhenius | 580 |
| 18.2.2 | Temperatur-Feuchte-Abhängigkeit nach Eyring..... | 582 |
| 18.2.3 | Mechanische Belastung nach Wöhler | 583 |
| 18.2.4 | Temperaturwechsel nach Coffin-Manson | 585 |
| 18.2.5 | HALT und HASS..... | 587 |
| 18.3 | Zusammenfassung von Versuchsergebnissen..... | 590 |
| 19 | Zuverlässigkeitsprognosen für mechatronische Systeme im Kraftfahrzeug bei nicht vollständigen Daten..... | 592 |
| 19.1 | Einleitung..... | 593 |
| 19.2 | Fahrleistungsprognosen | 595 |
| 19.3 | Ausfallmodell..... | 600 |
| 19.4 | Zuverlässigkeitsprognose..... | 601 |
| 19.4.1 | Bestimmung der Anwarter | 601 |
| 19.4.2 | Km-abhängige Lebensdauerprognosen | 602 |
| 19.4.3 | Zeitabhängige Lebensdauerprognosen..... | 603 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 19.5 | Zuverlässigkeitsprognose für zeitnahe Garantiedaten..... | 605 |
| 19.5.1 | Einfluss Zulassungsverzug..... | 606 |
| 19.5.2 | Einfluss Meldeverzug..... | 607 |
| 19.5.3 | Korrigierte Berechnung der Anwärter..... | 608 |
| 19.5.4 | Gesamtmodell für zeitnahe Garantiedaten | 609 |
| 19.6 | Weitere Anwendungsbereiche | 611 |
| 19.6.1 | Verifizierung von Kundenaktionen..... | 611 |
| 19.6.2 | Seriensatzbedarf..... | 612 |
| 19.6.3 | Endbevorratungsmengen..... | 613 |
| 19.6.4 | Berechnung von Kosten bei Garantierweiterung..... | 614 |
| 19.6.5 | Sonstige Anwendungsmöglichkeiten | 615 |
| 20 | Neuronale Netze | 616 |
| 20.1 | Grundlagen..... | 617 |
| 20.1.1 | Das biologische Paradigma | 617 |
| 20.1.2 | Aufbau und Arbeitsweise eines künstlichen Neurons..... | 618 |
| 20.1.3 | Aufbau eines neuronalen Netzes | 623 |
| 20.1.4 | Arbeitsweise neuronaler Netze..... | 625 |
| 20.2 | Anwendung in der technischen Zuverlässigkeit..... | 629 |
| 20.2.1 | Neuronale Schätzung der Parameter einer Verteilungsfunktion..... | 630 |
| 20.2.2 | Neuronale Zuverlässigkeitsprognose | 634 |
| 21 | Literaturverzeichnis..... | 639 |
| 22 | Zuverlässigkeits- und sicherheitsrelevante Zeitschriften - www-Adressen..... | 645 |
| 23 | Softwareanbieter und Kontakte..... | 647 |
| | Anhang | 652 |
| | Stichwortverzeichnis..... | 661 |