

# Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen quantitativer Methoden.....	7
2.1	Grundbegriffe der Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie .....	9
2.1.1	Statistische Beschreibung und Darstellung des Ausfallverhaltens.....	9
2.1.2	Statistische Maßzahlen.....	28
2.1.3	Zuverlässigkeitskenngrößen.....	30
2.1.4	Definition der Wahrscheinlichkeit .....	34
2.2	Lebensdauerverteilungen zur Zuverlässigkeitsbeschreibung .....	36
2.2.1	Normalverteilung .....	37
2.2.2	Exponentialverteilung .....	39
2.2.3	Weibullverteilung.....	41
2.2.4	Logarithmische Normalverteilung .....	56
2.2.5	Weitere Verteilungen .....	59
2.3	Berechnung der Systemzuverlässigkeit mit der Booleschen Theorie.....	78
2.4	Übungsaufgaben zu Lebensdauerverteilungen.....	83
2.5	Übungsaufgaben zu Systemberechnungen .....	87
3	Zuverlässigkeitsanalyse am Beispiel eines Getriebes.....	92
3.1	Systemanalyse .....	94
3.1.1	Ermittlung der Systembauelemente .....	94
3.1.2	Ermittlung der Systemelemente .....	96
3.1.3	Klassifizierung der Systemelemente .....	96
3.1.4	Ermittlung der Zuverlässigkeitsstruktur.....	98
3.2	Bestimmung der Systemelementezuverlässigkeiten .....	99
3.3	Berechnung der Systemzuverlässigkeit.....	102
4	FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse.....	106
4.1	Grundlagen und Allgemeines zur FMEA-Methodik .....	107
4.2	FMEA nach VDA 86 (Formblatt-FMEA).....	110
4.3	Beispiel einer Konstruktions-FMEA nach VDA 86.....	116
4.4	FMEA nach VDA 4.2.....	119

---

4.4.1	Schritt 1: Systemelemente und Systemstruktur.....	125
4.4.2	Schritt 2: Funktionen und Funktionsstruktur .....	128
4.4.3	Schritt 3: Fehleranalyse.....	130
4.4.4	Schritt 4: Risikobewertung.....	137
4.4.5	Schritt 5: Optimierung.....	143
4.5	Beispiel einer System-FMEA Produkt nach VDA 4.2 .....	146
4.5.1	Schritt 1: Systemelemente und Systemstruktur des Anpassungsgetriebes .....	147
4.5.2	Schritt 2: Funktionen und Funktionsstruktur des Anpassungsgetriebes .....	149
4.5.3	Schritt 3: Fehlfunktionen und Fehlfunktionsstruktur des Anpassungsgetriebes.....	150
4.5.4	Schritt 4: Risikobewertung des Anpassungsgetriebes.....	151
4.5.5	Schritt 5: Optimierung des Anpassungsgetriebes.....	152
4.6	Beispiel einer System-FMEA Prozess nach VDA 4.2 .....	153
4.6.1	Schritt 1: Systemelemente und Systemstruktur des Prozesses Fertigung der Abtriebswelle .....	153
4.6.2	Schritt 2: Funktionen und Funktionsstruktur des Prozesses Fertigung der Abtriebswelle .....	155
4.6.3	Schritt 3: Fehlfunktionen und Fehlfunktionsstruktur des Prozesses Fertigung der Abtriebswelle.....	155
4.6.4	Schritt 4: Risikobewertung des Prozesses Fertigung der Abtriebswelle .....	158
4.6.5	Schritt 5: Optimierung des Prozesses Fertigung der Abtriebswelle .....	158
5	Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis, FTA).....	160
5.1	Allgemeine Vorgehensweise bei der FTA.....	161
5.1.1	Ausfallarten .....	162
5.1.2	Symbolik .....	162
5.2	Qualitative Fehlerbaumanalyse .....	163
5.2.1	Qualitative Ziele.....	163
5.2.2	Prinzipieller Aufbau .....	164
5.2.3	Vergleich zwischen FMEA und FTA.....	166
5.3	Quantitative Fehlerbaumanalyse .....	168
5.3.1	Quantitative Ziele.....	168
5.3.2	Boolesche Modellbildung .....	168
5.3.3	Anwendung auf Systeme.....	173
5.4	Zuverlässigkeitsgraph.....	178
5.5	Beispiele .....	179
5.5.1	Zahnflankenriss .....	179
5.5.2	Fehlerbaumanalyse einer Wellendichtung .....	182

---

5.6	Übungsaufgaben zur Fehlerbaumanalyse.....	186
6	Auswertung von Lebensdauerversuchen und Ausfallstatistiken .....	190
6.1	Planung von Lebensdauerversuchen .....	191
6.2	Ranggrößen und ihre Verteilungen .....	193
6.3	Grafische Auswertung von Ausfallzeiten.....	202
6.3.1	Ermittlung der Weibullgeraden (zweiparametrische Weibullverteilung) .....	203
6.3.2	Berücksichtigung der Vertrauensbereiche .....	206
6.3.3	Berücksichtigung der ausfallfreien Zeit $t_0$ (dreiparametrische Weibullverteilung).....	210
6.4	Auswertung von unvollständigen (zensierten) Daten.....	214
6.4.1	Zensorisierung Typ I und Typ II.....	216
6.4.2	Multiple Zensorisierung .....	218
6.4.3	Sudden-Death-Test.....	219
6.5	Vertrauensbereiche bei niedrigen Summenhäufigkeiten .....	236
6.6	Analytische Methoden zur Auswertung von Zuverlässigkeitsversuchen.....	238
6.6.1	Momentenmethode.....	238
6.6.2	Regressionsanalyse .....	241
6.6.3	Maximum-Likelihood Methode .....	246
6.7	Übungsaufgaben zur Auswertungen von Lebensdauer- versuchen.....	250
7	Weibullparameter einiger Maschinenelemente .....	255
7.1	Formparameter $b$ .....	256
7.2	Charakteristische Lebensdauer $T$ .....	259
7.3	Ausfallfreie Zeit $t_0$ bzw. Faktor $f_{IB}$ .....	262
8	Methoden der Zuverlässigkeitstestplanung .....	264
8.1	Testplanung auf Basis der Weibullverteilung .....	265
8.2	Testplanung auf Basis der Binomialverteilung .....	267
8.3	Lebensdauerverhältnis.....	268
8.4	Verallgemeinerung für Ausfälle während des Tests.....	272
8.5	Berücksichtigung von Vorkenntnissen (Bayes-Methode).....	274
8.5.1	Verfahren nach Beyer/Lauster .....	274
8.5.2	Verfahren nach Kleyner et al. ....	277
8.6	Beschleunigte Lebensdauerprüfung .....	281
8.6.1	Raffung.....	281
8.6.2	Step-Stress-Methode .....	283
8.6.3	HALT (Highly Accelerated Life Testing).....	284
8.6.4	Degradation Test .....	286

---

8.7	Übungsaufgaben zur Zuverlässigkeitstestplanung .....	287
9	Methodische Lebensdauerberechnung bei Maschinenelementen.....	290
9.1	Äußere Belastung, ertragbare Belastung und Zuverlässigkeit....	292
9.1.1	Statische und dauerfeste Auslegung.....	292
9.1.2	Zeitfestigkeit und Betriebsfestigkeit .....	297
9.2	Belastung .....	301
9.2.1	Ermittlung der Betriebsbelastung.....	302
9.2.2	Das Lastkollektiv .....	307
9.3	Die ertragbare Belastung, Wöhlerkurven .....	319
9.3.1	Spannungs- und dehnungskontrollierte Wöhlerkurven...	320
9.3.2	Ermittlung der Wöhlerlinien .....	321
9.4	Lebensdauerberechnung .....	324
9.4.1	Schadensakkumulation.....	324
9.4.2	Zweiparametrische Schädigungsrechnung .....	329
9.4.3	Nennspannungskonzept und örtliches Konzept .....	331
9.5	Zusammenfassung .....	333
10	Berechnung reparierbarer Systeme .....	337
10.1	Grundlagen der Instandhaltung .....	337
10.1.1	Instandhaltungsmaßnahmen .....	338
10.1.2	Instandhaltungsebenen .....	341
10.1.3	Reparaturprioritäten .....	342
10.1.4	Kapazitäten der Instandhaltung.....	342
10.1.5	Instandhaltungsstrategien.....	345
10.2	Lebenslaufkosten .....	346
10.3	Zuverlässigkeitskenngrößen .....	350
10.3.1	Der Zustandsverlauf.....	350
10.3.2	Instandhaltungskenngrößen.....	352
10.3.3	Verfügbarkeitskenngrößen .....	355
10.4	Modelle zur Berechnung reparierbarer Systeme .....	359
10.4.1	Periodisches Instandhaltungsmodell .....	360
10.4.2	Markov-Modell .....	365
10.4.3	Boole-Markov-Modell .....	374
10.4.4	Gewöhnliche Erneuerungsprozesse.....	375
10.4.5	Alternierende Erneuerungsprozesse .....	380
10.4.6	Semi-Markov-Prozesse .....	389
10.4.7	Systemtransporttheorie.....	391
10.4.8	Vergleich der Berechnungsmodelle .....	396
10.5	Beispiel: Simulation einer bestandsabhängigen Lagerhaltung ...	397
10.5.1	Das Programm SPAR.....	397
10.5.2	Szenario.....	397

---

10.5.3 Die Simulation mit SPAR .....	398
10.6 Übungsaufgaben zu reparierbaren Systemen .....	403
10.6.1 Kurzfragen .....	403
10.6.2 Berechnungsaufgaben .....	405
11 Zuverlässigkeitssicherungsprogramm .....	411
11.1 Einleitung .....	411
11.2 Zuverlässigkeitssicherungsprogramm .....	413
11.2.1 Produktdefinition.....	413
11.2.2 Produktgestaltung.....	414
11.2.3 Produktion und Nutzung .....	418
11.2.4 Allgemeine Aktivitäten .....	419
11.3 Zusammenfassung .....	419
Lösungen.....	421
Anhang.....	475
Sachverzeichnis .....	491