

# Inhaltsverzeichnis

- 1 Einführung** ..... 1
  - 1.1 Aufbau des Buches ..... 2
  - 1.2 Historie der Fachdisziplin Technische Zuverlässigkeit ..... 5
- 2 Technische Zuverlässigkeit und Produktentstehungsprozess** ..... 9
  - 2.1 Produktentstehung und Produktlebenszyklus ..... 9
    - 2.1.1 Grundzüge des Produktentstehungsprozesses ..... 9
    - 2.1.2 Konzept- und Serienentwicklungsphasen ..... 11
    - 2.1.3 Produktions- und Vertriebsphasen ..... 12
  - 2.2 Technische Zuverlässigkeit in der Produktentstehung ..... 15
    - 2.2.1 Einsatz von Methoden der Technischen Zuverlässigkeit ..... 15
    - 2.2.2 Risikoeliminierung und Risikoprävention ..... 18
- 3 Elementare Begriffe** ..... 21
  - 3.1 Statistik und Spezifikation ..... 21
  - 3.2 Produkt- und Prozessmerkmale sowie deren Ausprägungen ..... 25
  - 3.3 Technische Zuverlässigkeit und Instandhaltung ..... 29
    - 3.3.1 Technische Zuverlässigkeit nach Bitter und DIN ..... 29
    - 3.3.2 Diskussion der Definition Zuverlässigkeit nach Bitter und DIN ... 31
    - 3.3.3 Definition des Begriffes Technische Zuverlässigkeit ..... 32
    - 3.3.4 Technische Zuverlässigkeit und Ausfallverhalten ..... 33
    - 3.3.5 Daten, Schadensdaten, Produktflotte und Zensierung ..... 34
    - 3.3.6 Kennzahlen ..... 36
    - 3.3.7 Instandhaltung und Qualität ..... 37
  - 3.4 Messen und Prüfen ..... 38
  - 3.5 Risiko und Risikoanalyse ..... 41
- 4 Beschreibende Statistik: Darstellungsformen** ..... 45
  - 4.1 Einleitung und Fallbeispiel Motor-Pleuel ..... 45
  - 4.2 Werteverlauf ..... 46
  - 4.3 Stabdiagramm ..... 48
  - 4.4 Histogramm ..... 49

|          |                                                                                     |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.5      | Kumulierte Darstellung                                                              | 50        |
| 4.6      | Mathematische Papiere: Log-Darstellungen                                            | 51        |
| 4.6.1    | Logarithmisches Papier                                                              | 52        |
| 4.6.2    | Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier                                                   | 53        |
| 4.7      | Boxplot                                                                             | 54        |
| 4.8      | Isochronendiagramm                                                                  | 56        |
| 4.9      | X-Y-Plot                                                                            | 59        |
| <b>5</b> | <b>Wahrscheinlichkeit und Zufallsexperimente</b>                                    | <b>63</b> |
| 5.1      | Wahrscheinlichkeit                                                                  | 63        |
| 5.2      | Probabilistik                                                                       | 71        |
| 5.3      | Beispiele zur Probabilistik                                                         | 75        |
| 5.3.1    | Stichprobenprüfung in der Eingangsprüfung                                           | 75        |
| 5.3.2    | Urnenmodell: Die Kugelziehung                                                       | 76        |
| 5.3.3    | Das Monty-Hall-Problem (Ziegenproblem)                                              | 79        |
| <b>6</b> | <b>Datenerhebung und erste Analyse</b>                                              | <b>83</b> |
| 6.1      | Stichprobe                                                                          | 83        |
| 6.2      | Datenklassierung                                                                    | 84        |
| 6.3      | Schätzmethoden für unbekannte Parameter Mittelwert und<br>Streuung einer Verteilung | 87        |
| 6.3.1    | Schätzfunktionen                                                                    | 88        |
| 6.3.2    | Schätzfunktionen und Schätzungen für Mittelwert $\mu$ und<br>Varianz $\sigma^2$     | 89        |
| 6.3.3    | Schätzfunktion und Schätzung des Anteilswerts $p$                                   | 90        |
| 6.4      | Grundlegende Schätzer und Kennwerte einer Stichprobe                                | 91        |
| 6.4.1    | Fallbeispiel Motor-Pleuel: Merkmalsbeschreibung,<br>Stichprobenkennwerte            | 91        |
| 6.4.2    | Schätzer für den Mittelwert basierend auf einer Stichprobe                          | 92        |
| 6.4.3    | Schätzer für die Streuung basierend auf einer Stichprobe                            | 93        |
| 6.4.4    | Schwerpunkt, Dispersion und Schiefe einer Messwertreihe                             | 94        |
| <b>7</b> | <b>Verteilungsmodelle und Funktionen</b>                                            | <b>97</b> |
| 7.1      | Grundlagen eines Verteilungsmodells                                                 | 97        |
| 7.2      | Stetige Verteilungsmodelle                                                          | 98        |
| 7.2.1    | Grundlagen und Anwendungsfelder                                                     | 99        |
| 7.2.2    | Normalverteilung                                                                    | 101       |
| 7.2.3    | Standard-Normalverteilung und Anwendung                                             | 103       |
| 7.2.4    | Betragsverteilung der 1. Art                                                        | 109       |
| 7.2.5    | Rayleigh-Verteilung (Betragsverteilung der 2. Art)                                  | 110       |
| 7.2.6    | Logarithmische Normalverteilung                                                     | 112       |
| 7.2.7    | Weibullverteilung                                                                   | 113       |
| 7.2.8    | Exponentialverteilung                                                               | 116       |

- 7.2.9 Gleichverteilung. . . . . 117
  - 7.2.10 Gamma-Verteilung. . . . . 119
  - 7.2.11 Erlang-Verteilung. . . . . 120
  - 7.2.12 Extremwert-Verteilungsmodelle . . . . . 121
  - 7.2.13 Verteilungsmodell und Analyse der technischen  
Zuverlässigkeit. . . . . 125
- 7.3 Test- und Prüfverteilungen. . . . . 126
  - 7.3.1 t-Verteilung nach Gosset (respektive Student). . . . . 126
  - 7.3.2  $\chi^2$ -Verteilung . . . . . 129
  - 7.3.3 F-Verteilung nach Fisher . . . . . 131
- 7.4 Diskrete Verteilungsmodelle . . . . . 132
  - 7.4.1 Grundlagen. . . . . 132
  - 7.4.2 Binomialverteilung . . . . . 134
  - 7.4.3 Poissonverteilung. . . . . 138
  - 7.4.4 Hypergeometrische Verteilung. . . . . 141
- 7.5 Wachstumsprozess und Sättigungsfunktion. . . . . 144
  - 7.5.1 Logistische Funktion . . . . . 144
  - 7.5.2 Anwendungsbeispiel Verhulst-Modell: Korrosionsprozess . . . . . 146
- 7.6 Mischverteilungsmodelle. . . . . 147
  - 7.6.1 Alternative Modelle . . . . . 148
  - 7.6.2 Konkurrierende Modelle . . . . . 150
- 8 Verteilungsmodelle: Parameterschätzung . . . . . 153**
  - 8.1 Regressionsanalyse . . . . . 154
  - 8.2 Maximum Likelihood Schätzverfahren (Fisher) . . . . . 155
  - 8.3 Spezielle Parameterschätzer mit Bezug zu bestimmten  
Verteilungsmodellen . . . . . 158
    - 8.3.1 Dubey. . . . . 159
    - 8.3.2 Gumbel. . . . . 160
    - 8.3.3 Tintner und Rhodes . . . . . 161
- 9 Konfidenzintervalle. . . . . 163**
  - 9.1 Einführung Konfidenzintervall. . . . . 163
  - 9.2 Konfidenzintervalle für Schätzer bei normalverteilter  
Grundgesamtheit . . . . . 165
    - 9.2.1 Konfidenzintervall für unbekannten Mittelwert bei bekannter  
Varianz. . . . . 166
    - 9.2.2 Konfidenzintervall für unbekannten Mittelwert bei  
unbekannter Varianz. . . . . 168
    - 9.2.3 Konfidenzintervall für unbekannte Varianz . . . . . 170
    - 9.2.4 Anwendungsbeispiel: Konfidenzintervall für Mittelwert und  
Varianz . . . . . 172

- 9.3 Konfidenzintervall für Anteilswert bei binomialverteilter Grundgesamtheit . . . . . 175
  - 9.3.1 Approximation über Normalverteilung . . . . . 175
  - 9.3.2 Anwendungsbeispiel: Konfidenzintervall für einen Anteilswert  $p$  . . . . . 179
  - 9.3.3 Ansätze nach Clopper-Pearson sowie Fisher . . . . . 181
- 9.4 Weibullverteilungsmodell: Konfidenzintervalle Parameter . . . . . 184
  - 9.4.1 Formparameter . . . . . 184
  - 9.4.2 Charakteristische Lebensdauer . . . . . 185
  - 9.4.3 Threshold (Schwelle, Ausfallfreie Zeit). . . . . 185
- 9.5 Konfidenzintervall für eine Funktion (Verteilungsmodell) . . . . . 187
- 10 Korrelation und Regression . . . . . 191**
  - 10.1 Grundlagen zur Korrelation und Regression . . . . . 191
  - 10.2 Korrelationsanalyse . . . . . 193
    - 10.2.1 Korrelation nach Bravais-Pearson . . . . . 195
    - 10.2.2 Korrelation nach Spearman . . . . . 195
  - 10.3 Regressionsanalyse . . . . . 196
  - 10.4 Fallbeispiele zur Korrelations- und Regressionsanalyse . . . . . 201
  - 10.5 Scheinkausalität und Korrelation. . . . . 207
- 11 Systemanalyse: Funktion, Fault Tree sowie Failure Mode and Effects . . . . 211**
  - 11.1 Grundlagen der Funktions- und Fehlerbaumanalyse . . . . . 211
    - 11.1.1 Fehlerbaum: Entwicklung und Darstellung . . . . . 212
    - 11.1.2 Algebra nach Boole . . . . . 215
    - 11.1.3 Abbildung Systemfunktion und Ausfallanalyse. . . . . 219
    - 11.1.4 Importanzkenngrößen . . . . . 223
  - 11.2 Anwendungsbeispiele: Funktions- und Fehlerbaumanalyse . . . . . 224
    - 11.2.1 Bremssystem eines Kraftfahrzeugs . . . . . 224
    - 11.2.2 Brückenschaltung. . . . . 227
    - 11.2.3 Doppelbrücken-Konfiguration . . . . . 230
  - 11.3 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). . . . . 237
- 12 Analyse des Ausfallverhaltens von Bauteilen, Baugruppen, Systemen . . . . 243**
  - 12.1 Zuverlässigkeitsanalyse auf Basis von Schadensdaten . . . . . 244
    - 12.1.1 Ausgangsbasis und Übersicht . . . . . 244
    - 12.1.2 Datensichtung . . . . . 244
    - 12.1.3 Abbildung des Ausfallverhaltens . . . . . 245
    - 12.1.4 Kennzahlen zur Charakterisierung des Ausfallverhaltens . . . . . 247
    - 12.1.5 Konfidenzintervalle für Parameter, Kennzahlen und Modell. . . . . 249
    - 12.1.6 Überlebenswahrscheinlichkeit und Ausfallrate . . . . . 250
    - 12.1.7 Deutung von Kennzahlen und Modellparametern . . . . . 251
    - 12.1.8 Anwärterprognose . . . . . 255

12.2 Fallstudie: Analyse Ausfallverhalten einer Kühlmittelpumpe . . . . . 256

12.3 Anwrterprognose in Erprobung und Feld . . . . . 264

12.3.1 Sudden Death Test und Felddatenanalytik. . . . . 265

12.3.2 Rangkorrektur nach Johnson . . . . . 266

12.3.3 Verfahren nach Nelson. . . . . 267

12.3.4 Nutzungsprofil: Empirische Verteilungsfunktion. . . . . 268

12.3.5 Verfahren nach Kaplan und Meier . . . . . 270

12.3.6 Verfahren nach Eckel . . . . . 271

12.4 RAPP – Analyse von Serienschäden . . . . . 272

12.4.1 Risk Analysis and Prognosis of complex Products (RAPP) . . . . . 272

12.4.2 Fallbeispiel RAPP: Schadensschwerpunkt in einer Flotte. . . . . 278

12.5 Fallbeispiel Sensor: Ausfallverhalten; Sttigungsmodell versus Weibullmodell . . . . . 282

**13 Signifikanztests . . . . . 289**

13.1 Einführung und Anwendungsbeispiel . . . . . 289

13.2 Grundlagen zu Signifikanztests . . . . . 292

13.2.1 Durchführung Signifikanztests, p-value. . . . . 292

13.2.2 Fehler 1. Art, Fehler 2. Art und Testeffizienz. . . . . 295

13.2.3 Abhängige und unabhängige Stichproben . . . . . 297

13.2.4 Parametrische und parameterfreie Signifikanztests . . . . . 297

13.2.5 Übersicht: Statistische Tests für den Ein-, Zwei-, Mehrstichprobenfall. . . . . 299

13.3 Einstichprobenfall . . . . . 299

13.3.1 Wallis-Moore-Test auf Zufälligkeit . . . . . 301

13.3.2 Kolmogorov-Smirnov-Test: Anpassungstest . . . . . 304

13.3.3 Sign-Test: Test auf Lageparameter . . . . . 310

13.3.4 Test auf Ausreißer innerhalb einer Beobachtungsreihe . . . . . 315

13.3.5 t-Test: Vergleich Stichprobenmittelwert gegen Referenzwert . . . . . 320

13.3.6 Cox und Stuart-Test: Trendanalyse . . . . . 321

13.4 Zweistichprobenfall . . . . . 325

13.4.1 Mann-Whitney-U-Test: Vergleich zweier Schwerpunkte . . . . . 326

13.4.2 Siegel-Tukey-Test: Dispersionsvergleich. . . . . 332

13.4.3 Vergleich zweier Mittelwerte – t-Test . . . . . 340

13.4.4 Vergleich zweier Varianzen – F-Test . . . . . 346

13.5 Mehrstichprobenfall. . . . . 349

13.5.1 Kruskal-Wallis H-Test und Conover Post hoc Analyse: Schwerpunkte. . . . . 350

13.5.2 Bartlett-Test: Vergleich Varianzen . . . . . 353

13.5.3 Meyer-Bahlburg-Test: Vergleich Varianzen . . . . . 355

|           |                                                                                     |     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>14</b> | <b>Prototype Testing und Accelerated Testing</b>                                    | 359 |
| 14.1      | Beschleunigende Testverfahren (Accelerated Testing)                                 | 359 |
| 14.2      | Quantitatives Accelerated Testing: Modelle                                          | 362 |
| 14.2.1    | Arrhenius-Modell                                                                    | 363 |
| 14.2.2    | Wöhlerversuch und Schadensakkumulationshypothesen                                   | 367 |
| 14.2.3    | Inverse Power Law: Einführung                                                       | 375 |
| 14.2.4    | Coffin-Manson-Modell                                                                | 375 |
| 14.2.5    | Inverse Power Weibull Modell                                                        | 376 |
| 14.2.6    | Lundberg-Palmgren-Gleichung                                                         | 377 |
| 14.2.7    | Taylor-Gleichung                                                                    | 378 |
| 14.2.8    | Eyring-Modell                                                                       | 379 |
| 14.2.9    | Power acceleration factor (Raffungsfaktor)                                          | 379 |
| 14.3      | Mindestumfang in einer Prototypen-Erprobung                                         | 380 |
| 14.3.1    | Erprobungsumfang auf Basis Überlebenswahrscheinlichkeit                             | 380 |
| 14.3.2    | Erprobungsumfang auf Basis Ausfallverhalten und Testdauer                           | 382 |
| 14.4      | Fallbeispiel: Accelerated Testing und Weibullverteilungsmodell                      | 384 |
| 14.4.1    | Einführung                                                                          | 384 |
| 14.4.2    | Accelerated Testing: Beispiel Büroklammerbiegung                                    | 386 |
| 14.5      | Qualitatives Accelerated Testing: HALT und HASS                                     | 392 |
| <b>15</b> | <b>Prüfprozesseignung</b>                                                           | 397 |
| 15.1      | Grundlagen der Analyse von Mess- und Prüfprozessen                                  | 398 |
| 15.2      | Prüfmittelfähigkeit und Prüfprozesseignung                                          | 401 |
| 15.3      | Kurzzeitprüfmittelfähigkeit: $C_g$ -/ $C_{gk}$ -Studie                              | 404 |
| 15.3.1    | Grundlagen der $C_g$ -/ $C_{gk}$ -Studie                                            | 404 |
| 15.3.2    | Anwendungsbeispiel $C_g$ -/ $C_{gk}$ -Studie: Zylinderkopfprüfung                   | 406 |
| 15.4      | Wiederhol- und Vergleichspräzision: %GRR-Studie                                     | 408 |
| 15.4.1    | Grundlagen der %GRR-Studie                                                          | 408 |
| 15.4.2    | Anwendungsbeispiel %GRR-Studie: Motor-Pleuelprüfung                                 | 410 |
| 15.5      | Prüfprozesseignung: Analyse der Messunsicherheit<br>( $Q_{MS}$ -/ $Q_{MP}$ -Studie) | 412 |
| 15.5.1    | Analyse der Messunsicherheit                                                        | 412 |
| 15.5.2    | Anmerkungen zur Analyse der Messunsicherheit                                        | 416 |
| 15.5.3    | Anwendungsbeispiel $Q_{MS}$ -/ $Q_{MP}$ -Studie: Vermessung<br>Rohbaukarosserie     | 419 |
| 15.6      | Anmerkungen und Hinweise: Verfahren X                                               | 422 |
| <b>16</b> | <b>Statistical Process Control (SPC)</b>                                            | 425 |
| 16.1      | Grundlagen und Definitionen                                                         | 426 |
| 16.1.1    | Prozesseignungsanalysen                                                             | 428 |
| 16.1.2    | Prüfstrategie: Vollprüfung versus Stichprobenprüfverfahren                          | 430 |
| 16.2      | Planung und Realisierung von SPC                                                    | 431 |
| 16.2.1    | Vorgehensweise                                                                      | 432 |

|                                    |                                                                          |     |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 16.2.2                             | Zusammenfassung: Analyseumfänge, Kennwerte und Anmerkungen. ....         | 434 |
| 16.3                               | Maschinen- und Prozessanalyse: Fähigkeitsindizes .....                   | 435 |
| 16.3.1                             | Maschinenfähigkeit und vorläufige Prozessfähigkeit .....                 | 436 |
| 16.3.2                             | Prozessfähigkeit in der laufenden Serie. ....                            | 437 |
| 16.3.3                             | Fähigkeitsanalyse bei beliebigem Verteilungsmodell: Quantil-Ansatz. .... | 439 |
| 16.3.4                             | Fähigkeitsanalyse und Interpretation Prozessbilder. ....                 | 443 |
| 16.3.5                             | Fallbeispiel: Fähigkeitsanalyse eines Zerspanungsprozesses ....          | 446 |
| 16.4                               | Multivariate Prozessbewertung .....                                      | 448 |
| 16.4.1                             | Multivariater Prozessfähigkeitskennwert. ....                            | 449 |
| 16.4.2                             | Ausschusswahrscheinlichkeit bei Merkmalsets. ....                        | 450 |
| 16.5                               | Prozessvisualisierung und -regeltechnik: Regelkarten .....               | 454 |
| 16.5.1                             | Grundlagen: Aufbau von Regelkarten .....                                 | 455 |
| 16.5.2                             | Regelkarten für stetige Merkmale .....                                   | 459 |
| 16.5.3                             | Fallstudie Motor-Pleuel : Annahme- und Shewhartkarten. ....              | 464 |
| 16.5.4                             | Regelkarten für diskrete Merkmale .....                                  | 465 |
| 16.5.5                             | Fallbeispiel Graugussbauteilproduktion: Auslegung einer Regelkarte ..... | 469 |
| 16.5.6                             | Analyse typischer Prozessszenarien mittels Regelkarten .....             | 470 |
| <b>Anhang.</b> .....               |                                                                          | 473 |
| <b>Literatur.</b> .....            |                                                                          | 505 |
| <b>Stichwortverzeichnis.</b> ..... |                                                                          | 513 |