

# Inhalt

<b>Vorwort .....</b>	<b>XVII</b>
<b>Das Institut für Qualitäts- und Zuverlässigkeitmanagement (IQZ) .....</b>	<b>XIX</b>
<b>Teil I: Essenzielle Anforderungen an die Sicherheits- und Zuverlässigkeitstechnik .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Herausforderungen für Staat, Gesellschaft und Unternehmen .....</b>	<b>3</b>
1.1 Fragmente der Explikation der Sicherheits- und Zuverlässigkeitstechnik .....	3
1.2 Aktuelle Herausforderungen .....	11
<b>2 Zuverlässigkeit bei Haftungs- und Gewährleistungsfragen ...</b>	<b>17</b>
2.1 Haftungsgrundlage .....	17
2.1.1 Außervertragliche Haftung .....	18
2.1.2 Vertragliche Haftung .....	19
2.1.3 Stand der Technik .....	20
2.1.4 Gewährleistungsmanagement zwischen Unternehmen .....	21
2.2 Schadteilanalyse Feld und No-Trouble-Found-Prozess .....	23
<b>3 Normative Anforderungen in der Sicherheits- und Zuverlässigkeitstechnik .....</b>	<b>26</b>
3.1 Einleitung zu normativen Anforderungen im rechtlichen Kontext ....	26
3.2 Überblick über die Begrifflichkeiten: Safety, Security und Reliability ..	31

<b>Teil II: Zuverlässigkeit im Produktentstehungsprozess .....</b>	<b>37</b>
<b>4 Zuverlässigkeit im Produktentwicklungsprozess .....</b>	<b>39</b>
4.1 Zuverlässigkeitsprozess .....	39
4.2 Bereiche, Rollen und Verantwortlichkeiten .....	46
4.3 Wirtschaftlichkeitsaspekte und Zuverlässigkeitsziele .....	48
4.4 Reifegrad, Musterstände und Freigabeprozesse in der Automobilindustrie .....	51
<b>5 Funktionale Sicherheit im Produktentwicklungsprozess .....</b>	<b>55</b>
5.1 Der sicherheitstechnische Prozess .....	55
5.1.1 Allgemeine Einführung in die Funktionale Sicherheit .....	55
5.1.2 Die Sicherheitsgrundnorm IEC 61508 .....	58
5.1.3 Der sicherheitstechnische Prozess in der zivilen Luftfahrtindustrie .....	62
5.1.4 Funktionale Sicherheit für Straßenfahrzeuge .....	74
5.2 Unterstützende und begleitende Prozesse als Grundvoraussetzung für die Funktionale Sicherheit .....	91
<b>6 Datenquellen und -management .....</b>	<b>100</b>
6.1 Rohdatenerfassung und -management .....	101
6.2 Nutzungsdaten .....	101
6.3 Felddaten .....	102
6.4 Datenschutz am Beispiel Automotive .....	105
<b>7 Nutzungs- und belastungsabhängige Produktentwicklung ...</b>	<b>108</b>
7.1 User Experience, Marktanalysen und Use Cases .....	110
7.2 Kundencluster und -profilerstellung .....	112
7.3 Design for Reliability, nutzungs- und belastungsabhängige Zuverlässigkeit .....	113
<b>Teil III: Grundlagen der Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse ..</b>	<b>115</b>
<b>8 Mathematische Grundlagen aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung .....</b>	<b>117</b>
8.1 Mengenalgebra .....	117
8.1.1 Grundbegriffe und Definitionen .....	117

8.1.2	Mengenoperationen .....	118
8.2	Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung .....	120
8.2.1	Wahrscheinlichkeitsbegriff .....	120
8.2.2	Axiomsystem von Kolmogorov .....	121
8.2.3	Die bedingte Wahrscheinlichkeit .....	124
8.2.4	Unabhängige Ereignisse .....	126
8.2.5	Regel von der totalen Wahrscheinlichkeit .....	126
8.2.6	Satz von Bayes .....	127
8.3	Zufallsgrößen und ihre Wahrscheinlichkeitsverteilung .....	129
8.3.1	Grundbegriffe .....	129
8.3.2	Erwartungswert und Momente einer Verteilungsfunktion ..	133
8.3.3	Quantil, Median und Modalwert .....	138
<b>9</b>	<b>Zuverlässigkeit- und Sicherheitskenngrößen .....</b>	<b>141</b>
9.1	Zuverlässigkeitsskenngrößen nicht reparierbarer Systeme .....	141
9.2	Empirische Zuverlässigkeitsskenngrößen und weitere Zuverlässigkeitsmerkmale .....	150
9.3	Zuverlässigkeitsskenngrößen reparierbarer Systeme, Instandhaltung ..	153
9.4	Sicherheitskenngrößen .....	156
<b>10</b>	<b>Wichtige Verteilungsfunktionen .....</b>	<b>160</b>
10.1	Wichtige Lebensdauerverteilungen und ihre Zuverlässigkeitss- kenngrößen .....	160
10.1.1	Exponentialverteilung .....	160
10.1.2	Weibull-Verteilung .....	164
10.1.3	Die spezielle Erlang-Verteilung .....	172
10.1.4	Die Normalverteilung .....	176
10.1.5	Die logarithmische Normalverteilung .....	179
10.1.6	Asymptotische Extremwertverteilung .....	184
10.2	Wichtige diskrete Verteilungsfunktionen .....	190
10.2.1	Binomialverteilung .....	190
10.2.2	Poisson-Verteilung .....	193
10.2.3	Hypergeometrische Verteilung .....	195

<b>11 Ausfallratenmodelle .....</b>	<b>201</b>
11.1 Zeitliches Verhalten der Ausfallrate .....	201
11.2 Ausfallratenangaben .....	202
11.3 Ausfallratendatenhandbücher .....	204
11.4 Ausfallratenmodelle .....	207
11.5 Zeitliche Schwankungen der Ausfallrate .....	214
<b>Teil IV: Methoden der Zuverlässigkeit- und Sicherheitsanalyse ...</b>	<b>217</b>
<b>12 Einführung in die Methoden der Zuverlässigkeit- und Sicherheitstechnik .....</b>	<b>219</b>
12.1 Allgemeine Einführung .....	219
12.2 Methodenvergleich .....	223
<b>13 Zuverlässigkeitsanalyse einfacher Systemstrukturen .....</b>	<b>229</b>
13.1 Grafische Darstellung von Systemkonfigurationen .....	230
13.1.1 Zuverlässigkeit-Blockschaltbild .....	230
13.1.2 Fehler- oder Funktionsbäume: Darstellung mithilfe logischer Symbole der Booleschen Algebra .....	230
13.1.3 Zustandsdiagramme (Zustandsübergangsgraphen) .....	231
13.2 Logisches Seriensystem .....	232
13.3 Logisches Parallelsystem .....	233
13.4 Parallel-Seriensystem .....	237
13.5 Brückenkonfiguration .....	239
13.6 Berücksichtigung mehrerer Ausfallarten .....	242
13.6.1 Logisches Seriensystem bei zwei Ausfallarten .....	244
13.6.2 Logisches Parallelsystem bei zwei Ausfallarten .....	245
13.6.3 Logisches Parallel-Seriensystem bei zwei Ausfallarten .....	247
13.6.4 Beliebige Konfigurationen .....	250
<b>14 Zuverlässigkeitserhöhung in Planung und Praxis .....</b>	<b>252</b>
14.1 Allgemeine Maßnahmen zur Zuverlässigkeitserhöhung .....	252
14.2 Begriff und Definition der Redundanz .....	255
14.3 Redundanzarten, Grundprinzipien .....	256
14.4 Aktive Redundanz .....	257

14.5 mvn-System .....	258
14.6 nvn-System .....	262
14.7 Standby-System - passive Redundanz .....	265
<b>15 Systembetrachtung .....</b>	<b>269</b>
15.1 Begriffliche Exemplifikationen .....	269
15.2 Technisches System .....	270
15.3 Elektrik/Elektronik/Software-Systemarchitekturen .....	272
15.4 Ausfallverhalten von Elektrik/Elektronik/Software-Konfigurationen ..	273
<b>16 Boolesche Modellbildung .....</b>	<b>275</b>
16.1 Begriffe und Regeln der Booleschen Algebra .....	275
16.1.1 Die Boolesche Funktion .....	275
16.1.2 Grundverknüpfungen .....	277
16.1.3 Axiome der Booleschen Algebra .....	280
16.1.4 Karnaugh-Veitch-Diagramm .....	282
16.1.5 Kanonische Darstellung von Booleschen Funktionen .....	284
16.1.6 Shannonsche Zerlegung .....	290
16.1.7 Die Boolesche Funktion mit reellen Variablen .....	292
16.2 Die Systemfunktion .....	294
16.3 Einführung von Wahrscheinlichkeiten .....	297
16.4 Fehlerbaumanalyse .....	299
16.4.1 Einführung .....	299
16.4.2 Darstellung monotoner Strukturen durch Minimalpfade und Minimalschnitte .....	302
16.4.3 Quantitative Fehlerbaumauswertung .....	306
16.5 Importanzkenngrößen .....	315
16.5.1 Strukturelle Importanz .....	315
16.5.2 Marginale Importanz .....	318
16.5.3 Fraktionale Importanz .....	320
16.5.4 Barlow-Proschan-Importanz .....	321
16.6 Bestimmung der mittleren Häufigkeit von Systemausfällen sowie der mittleren Ausfall- und Betriebsdauer .....	324
16.7 Induktive Zuverlässigkeit- und Sicherheitsanalyse .....	327

<b>17 Zuverlässigkeitssbewertung mithilfe der Fuzzy-Logik</b> .....	<b>330</b>
17.1 Grundlagen der Fuzzy-Logik .....	331
17.1.1 Verknüpfung unscharfer Mengen .....	334
17.1.2 Fuzzy-Relation .....	336
17.1.3 Erweiterungsprinzip .....	340
17.2 Prinzipieller Ablauf einer Fuzzy-Anwendung .....	341
17.2.1 Fuzzifizierung .....	342
17.2.2 Fuzzy-Inferenz .....	342
17.2.3 Defuzzifizierung .....	343
17.3 Anwendung der Fuzzy-Logik bei der FMEA .....	348
17.3.1 Eingangsgrößen .....	348
17.3.2 Fuzzifizierung .....	351
17.3.3 Verarbeitungsregeln .....	354
17.3.4 Berechnung der Zugehörigkeitsgrade .....	355
17.3.5 Defuzzifizierung .....	357
17.4 Fuzzy-Fehlerbaumanalyse .....	357
17.4.1 Das Fuzzy-Modell .....	358
17.4.2 Praktisches Anwendungsbeispiel .....	362
<b>18 Einführung in die stochastischen Prozesse</b> .....	<b>366</b>
18.1 Beurteilungskriterien stochastischer Prozesse .....	368
18.1.1 Definitionsspezifische Beurteilungskriterien .....	369
18.1.1.1 Markov-Bedingungen .....	369
18.1.1.2 Regenerationspunkte des Prozesses .....	369
18.1.2 Anwendungsspezifische Beurteilungskriterien .....	370
18.1.2.1 Akzeptanz von stochastischen Abhängigkeiten zwischen den Elementen des Prozesses .....	370
18.1.2.2 Anwendbare Verteilungsfunktionen der Zufallszeiten .....	370
18.1.3 Klassifizierung stochastischer Prozesse anhand der Beurteilungskriterien .....	371
18.2 Analysemöglichkeiten eines Parallelsystems mit zwei identischen Einheiten .....	373

<b>19</b>	<b>Markovsche Modellbildung</b>	<b>380</b>
19.1	Der Markovsche Prozess mit diskretem Parameterbereich und endlich vielen Zuständen (Markov-Kette)	380
19.1.1	Zustandsgleichung	380
19.1.2	Zustandsklassen	383
19.1.3	Die absorbierende homogene Markov-Kette	385
19.1.4	Ergodensatz für Markovsche Ketten	389
19.2	Der Markovsche Prozess mit kontinuierlichem Parameterraum und diskretem Zustandsraum	392
19.2.1	Zustandsgleichungen	392
19.2.2	Laplace-Transformation der Zustandsgleichung	398
19.3	Der Semi-Markov-Prozess	405
19.3.1	Einführung	405
19.3.2	Definition und Grundbegriffe	405
19.3.3	Der absorbierende Semi-Markov-Prozess	412
19.3.4	Der ergodische Semi-Markov-Prozess	416
<b>20</b>	<b>Monte-Carlo-Simulation</b>	<b>421</b>
20.1	Einführung	421
20.2	Grundlagen der Monte-Carlo-Simulation	423
20.3	Generierung von Zufallszahlen	425
20.4	Methoden zur Generierung beliebig verteilter Funktionen	429
20.5	Direkte Monte-Carlo-Simulation	432
20.5.1	Generierung eines Zustandsübergangs	432
20.5.2	Last-Event-Schätzer	434
20.5.3	Free-Flight-Schätzer	434
20.6	Anwendungsbeispiel	437
<b>21</b>	<b>Zuverlässigkeitssbewertung mithilfe der Graphentheorie</b>	<b>444</b>
21.1	Gerichteter Graph	445
21.1.1	Einige Grundbegriffe	445
21.1.2	Lineare Flussgraphen	447
21.1.3	Auswertung der linearen Flussgraphen mithilfe der Mason-Formel	450

21.2	Anwendung der linearen Flussgraphen auf diskrete Markov-Prozesse	453
21.2.1	Inhomogene Prozessdarstellung .....	453
21.2.2	Homogene Prozessdarstellung .....	454
21.2.3	Asymptotisches Verhalten .....	457
21.2.4	Erwartungswert und Eintrittswahrscheinlichkeit .....	457
21.3	Anwendung der linearen Flussgraphen auf stetige Markov-Prozesse ..	458
<b>22</b>	<b>Neuronale Netze .....</b>	<b>466</b>
22.1	Grundlagen .....	467
22.1.1	Das biologische Paradigma .....	467
22.1.2	Aufbau und Arbeitsweise eines künstlichen Neurons .....	468
22.1.3	Aufbau eines neuronalen Netzes .....	472
22.1.4	Arbeitsweise neuronaler Netze .....	473
22.2	Anwendung in der technischen Zuverlässigkeit .....	477
22.2.1	Neuronale Schätzung der Parameter einer Verteilungsfunktion .....	477
22.2.2	Neuronale Zuverlässigkeitsprognose .....	481
<b>Teil V: Zuverlässigkeitsprüfung und -bewertung .....</b>	<b>487</b>	
<b>23</b>	<b>Stichprobenverteilung .....</b>	<b>489</b>
23.1	Stichprobenverteilung des Mittelwertes .....	489
23.2	Stichprobenverteilung der Varianz .....	493
23.3	Stichprobenverteilung der Mittelwerte bei unbekannter Varianz .....	494
23.4	Stichprobenverteilung für die Differenz und Summe zweier arithmetischer Mittelwerte .....	495
23.5	Stichprobenverteilung des Quotienten zweier Varianzen .....	497
<b>24</b>	<b>Grenzwertsätze und Gesetze der großen Zahlen .....</b>	<b>498</b>
24.1	Grenzwertsätze und Approximationen .....	498
24.1.1	Approximation der Binomialverteilung durch die Poisson-Verteilung .....	498
24.1.2	Approximation der hypergeometrischen Verteilung durch eine Binomialverteilung .....	498
24.1.3	Approximation der Poisson-Verteilung durch eine Normalverteilung .....	499

24.1.4	Approximation der Binomialverteilung durch die Normalverteilung .....	499
24.1.5	Approximation der hypergeometrischen Verteilung durch die Normalverteilung .....	500
24.1.6	Zentraler Grenzwertsatz .....	501
24.2	Gesetz der großen Zahlen .....	502
24.2.1	Tschebyscheffsche Ungleichung .....	502
24.2.2	Satz von Bernoulli .....	504
<b>25</b>	<b>Statistische Schätzung von Parametern .....</b>	<b>505</b>
25.1	Eigenschaften von Schätzfunktionen .....	505
25.2	Vertrauensintervalle .....	507
25.3	Konfidenzintervall für den Erwartungswert und die Varianz bei normalverteilter Grundgesamtheit und Bestimmung des Stichprobenumfangs .....	508
25.3.1	Konfidenzintervall für den Erwartungswert .....	508
25.3.2	Konfidenzintervall für die Varianz .....	512
25.3.3	Bestimmung des Stichprobenumfangs .....	513
25.4	Die Maximum-Likelihood-Methode (M-L-M) .....	517
25.4.1	Maximum-Likelihood-Schätzer für die Parameter der Binomial- und Poisson-Verteilung .....	520
25.4.2	Maximum-Likelihood-Schätzer für den Parameter einer Exponentialverteilung .....	521
25.4.3	Maximum-Likelihood-Schätzer für die Parameter der Normal- und Lognormalverteilung .....	521
25.4.4	Maximum-Likelihood-Schätzer für die Parameter der Weibull-Verteilung .....	521
25.5	Maximum-Likelihood-Methode bei zensierter und gestutzter Stichprobe .....	524
25.6	Die Momentenmethode .....	532
25.6.1	Momentenschätzer für den Parameter einer Exponentialverteilung .....	534
25.6.2	Momentenschätzer für die Parameter einer Lognormalverteilung .....	536
25.6.3	Momentenschätzer für die Parameter einer Weibull-Verteilung .....	536
25.7	Lineare Regression und die Methode der kleinsten Quadrate .....	536

<b>26 Bestimmung des Verteilungstyps .....</b>	<b>539</b>
26.1 Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibull-Verteilung .....	539
26.1.1 Konstruktion des Wahrscheinlichkeitsnetzes .....	539
26.1.2 Gebrauchsanweisung für das Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibull-Verteilung nach Stange und Gumbel (DGQ-Lebensdauernetz) .....	540
26.2 Tests zur Überprüfung des Verteilungstyps – Anpassungstests .....	547
26.2.1 Der Chi-Quadrat-Anpassungstest .....	547
26.2.2 Der Kolmogorov-Smirnov-Test (K-S-T) .....	552
26.3 Vergleich der beiden Anpassungstests .....	559
<b>27 Test- und Prüfplanung – Testverfahren .....</b>	<b>560</b>
27.1 Statistische Verfahren .....	564
27.1.1 Der Binomialprüfplan als attributiver Abnahmeprüfplan .....	564
27.1.2 Sequenzialprüfung .....	566
27.1.3 Success Run .....	569
27.1.4 Sudden-Death .....	574
27.1.5 Vorwissen und Test .....	581
27.1.6 End-of-Life-Test .....	581
27.2 Beschleunigte Lebensdauertests .....	583
27.2.1 Das Arrhenius-Modell .....	583
27.2.2 Das Eyring-Modell und dessen Modifikation .....	584
27.2.3 Das Peck-Modell .....	585
27.2.4 Dauerschwingversuch nach Wöhler .....	586
27.2.5 Hochbeschleunigte Testmethoden .....	590
<b>28 Felddatenanalyse .....</b>	<b>593</b>
28.1 Allgemeine Einführung .....	593
28.2 Schichtliniendiagramme und Beanstandungsverläufe .....	596
28.3 Zuverlässigkeitssprognosen für mechatronische Systeme in Kraftfahrzeugen bei nicht vollständigen Daten .....	604
28.3.1 Zuverlässigkeitssprognosen für Systeme im Kraftfahrzeug während der Nutzungsphase .....	604
28.3.2 Zuverlässigkeitssprognosen für zeitnahe Garantiedaten .....	610

<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>616</b>
<b>Anhang A .....</b>	<b>631</b>
<b>Anhang B .....</b>	<b>649</b>
<b>Anhang C .....</b>	<b>655</b>
<b>Anhang D .....</b>	<b>657</b>
<b>Anhang E .....</b>	<b>660</b>
<b>Index .....</b>	<b>665</b>