

# Inhaltsverzeichnis

---

## Vorwort

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Historie	1
1.2	Situation Heute	2
1.3	Was soll erreicht werden	3
1.4	Von der Belastung zur Konzeption	7
1.5	Fazit	10
<b>2</b>	<b>Zuverlässigkeitsmanagement und Zuverlässigkeitsziele</b>	<b>11</b>
2.1	Einführung	11
2.2	Vom Kunden zum Lieferanten - ein ganzheitliches Konzept	15
2.3	Etablieren von Zuverlässigkeitsmanagement	16
2.4	Anforderungen an den Zuverlässigkeitsmanager	20
2.5	Schulung von Zuverlässigkeitsingenieuren	23
2.6	Ermittlung von Zuverlässigkeitsvorgaben und Ableitung von Einzelzielen	25
2.6.1	Einführung und Prämissen	25
2.6.2	Ermittlung von Zuverlässigkeitsvorgaben	30
2.6.3	Aufteilung in Einzelziele	32
2.6.4	Beispiel zum Vorgehen zur Ermittlung der Zuverlässigkeitskennwerte	39
2.6.5	Verifikation der Ermittelten Ziele	40
2.7	Vorgehen im Falle auftretender Zielkonflikte	41
2.8	Entwicklung einer Guideline Zuverlässigkeitsmanagement	42
2.9	Reliability Monitoring	45
2.10	Feldbeobachtung	46
<b>3</b>	<b>Statistische Grundlagen</b>	<b>47</b>
3.1	Einführung	47
3.2	Begriffe	48
3.3	Modell Kugelkasten	52
3.4	Axiome der Wahrscheinlichkeit	54
3.5	Relative Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit	55
3.6	Additionssatz für Wahrscheinlichkeiten (Logisch ODER)	56
3.7	Multiplikationssatz für Wahrscheinlichkeiten (Logisch UND)	57
3.8	Baumdiagramm	58
3.9	Rechenregeln	59
3.9.1	Permutation	59
3.9.2	Variation	60
3.9.3	Kombination	60
3.10	Anzahl fehlerhafter Einheiten, Modelle und Modelleigenschaften	61
3.10.1	Wahrscheinlichkeitsfunktion und Verteilungsfunktion	61

3.10.2	Hypergeometrische Verteilung	66
3.10.3	Binomialverteilung	67
3.10.4	Grafische Darstellung der Binomialverteilung - Larson-Nomogramm	69
3.11	Zufallstreibereich und Vertrauensbereich	71
3.12	Anzahl von Fehlern pro Einheit, Modell und Modelleigenschaften	72
3.12.1	Wahrscheinlichkeitsfunktion und Verteilungsfunktion für Anzahl Fehler pro Einheit (Poisson-Verteilung)	73
3.12.2	Grafische Darstellung der Poisson-Verteilung — Thorndike-Nomogramm	76
3.13	Normalverteilung, Modell und Modelleigenschaften	77
3.13.1	Kennwerte quantitativer Stichprobenergebnisse	78
3.13.2	Modell der Normalverteilung	80
3.13.3	Standardisierte Normalverteilung und Tabelle der standardisierten Normalverteilung	81
3.13.4	Das Wahrscheinlichkeitsnetz	83
3.14	Einfluss der Bauelementequalität auf das System	83
<b>4</b>	<b>Zuverlässigkeitskenngrößen</b>	<b>85</b>
4.1	Einführung	85
4.2	Dichtefunktion	86
4.3	Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$	86
4.4	Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$	86
4.5	Bestandsfunktion $B(t)$	87
4.6	Ausfallrate	87
4.6.1	Darlegung	87
4.6.2	Beispiel: Ermittlung der Ausfallrate von Schaltungen	90
4.6.3	Beispiel: Ermittlung der Ausfallrate von Bauelementen im Test	91
4.7	Mean Time Between Failures, MTBF	92
4.7.1	Darlegung	92
4.7.2	Beispiel: MTBF Ermittlung	93
4.8	Mean Time To Failures, MTTF	93
4.9	Mean Time To Repair, MTTR	94
4.10	Mean Down Time, MDT	94
4.11	Verfügbarkeit	94
4.12	Unverfügbarkeit	95
4.13	Unterschiedliche Lebensdauerverteilungen	95
4.14	Normalverteilung	97
4.14.1	Dichtefunktion (immer symmetrisch zum Mittelwert)	97
4.14.2	Ausfallwahrscheinlichkeit	97
4.14.3	Überlebenswahrscheinlichkeit	97
4.14.4	Ausfallrate (immer steigend)	97
4.15	Log-Normalverteilung (Logarithmische Normalverteilung)	97
4.15.1	Dichtefunktion (immer linkssymmetrisch)	98
4.15.2	Ausfallwahrscheinlichkeit	98
4.15.3	Überlebenswahrscheinlichkeit	98
4.15.4	Ausfallrate	98
4.16	Exponentialverteilung	98
4.16.1	Präambel	98
4.16.2	Dichtefunktion	99

4.16.3	Überlebenswahrscheinlichkeit	100
4.16.4	Ausfallwahrscheinlichkeit	101
4.16.5	Ausfallrate	101
4.16.6	Beispiel: Ermittlung der Überlebenswahrscheinlichkeit	101
4.16.7	Beispiel: Ermittlung der Zuverlässigkeit	102
4.17	Weibullverteilung	104
4.17.1	Einführung	104
4.17.2	Dichtefunktion der Weibullverteilung	105
4.17.3	Überlebenswahrscheinlichkeit der Weibullverteilung	105
4.17.4	Ausfallwahrscheinlichkeit der Weibullverteilung	106
4.17.5	Ausfallrate der Weibullverteilung	106
4.17.6	Besonderheit der Weibullverteilung	107
4.17.7	Drei-Parametrische-Weibullverteilung	107
4.17.8	Beispiel: Grafische Darstellung der Dichtefunktion und Ausfallwahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung von $t_0$	108
4.17.9	Das Weibullnetz	109
4.17.10	Der Vertrauensbereich im Weibullnetz	113
4.17.11	Ergänzende Informationen	113
4.17.11.1	Achsen der Weibullverteilung	114
4.17.11.2	Bestimmung von $b$ und $T$	114
4.17.11.3	Bestimmung des Vertrauensbereiches von $b$ und $T$	114
4.18	Die $B_0$ Lebensdauerangabe	115
4.19	Nachweis der Zuverlässigkeit ohne Ausfall und ohne Berücksichtigung der Prüfdauer	116
4.19.1	Darlegung	116
4.19.2	Beispiel: Geforderte Mindestzuverlässigkeit	116
4.20	Nachweis der Zuverlässigkeit ohne Ausfall und mit Berücksichtigung der Prüfdauer	117
4.20.1	Darlegung	117
4.20.2	Beispiel: Ermittlung Testzeit	117
4.21	Ermittlung der Zuverlässigkeitskennwerte entsprechend ISO 16750	119
4.22	Anwendung Larson-Nomogramm zur Zuverlässigkeitsermittlung	119
4.22.1	Handhabung des Larson-Nomogramms	119
4.22.2	Beispiel: Anwendung Larson-Nomogramms	120
4.23	Zusammenhang zwischen den Formeln der Zuverlässigkeitskenngrößen	121
4.24	Die gebräuchlichsten Begriffe in Englisch	122
<b>5</b>	<b>Lebensdauer- und Umweltsimulationstests</b>	<b>123</b>
5.1	Einführung	123
5.2	Begriffe (alphabetisch)	123
5.3	Handhabung von Probanden und Daten	124
5.3.1	Probanden	124
5.3.2	Verwendbarkeit der Probanden nach Test	124
5.3.3	Aufzeichnen von Daten	125
5.4	Die wichtigsten Prüfungen	125
5.4.1	Übersicht der Prüfungen (alphabetisch)	125
5.4.2	Hinweise zu Normen	130
5.5	Wirkung der Stresstests	131

5.5.1	Beispiel: Integrierte Halbleiterschaltungen	131
5.5.2	Beispiel: Generelle Umwelteinflüsse	132
5.5.3	Ergänzende Erläuterungen	132
5.6	Lebensdauerprüfung	134
5.6.1	Einführung	134
5.6.2	Betriebszeiten während der Herstellung einer elektronischen Komponente	137
5.6.3	Strategie zur Durchführung einer Lebensdauerprüfung	138
5.6.4	Modellentwicklung und Parameter zur beschleunigenden Lebensdauerprüfung	139
5.6.4.1	Das Gesetz von Arrhenius	139
5.6.4.2	Die Beschleunigung	140
5.6.4.3	Beispiel: Ermittlung des Beschleunigungsfaktors	142
5.6.5	Anwendung des Modells	142
5.6.5.1	Bestimmung der Aktivierungsenergie	142
5.6.5.1.1	Werte zu Aktivierungsenergien	142
5.6.5.1.2	Weitergehende Erläuterungen zur Aktivierungsenergie	145
5.6.5.2	Bestimmung der Prüftemperatur $T_1$	147
5.6.5.2.1	Überblick	147
5.6.5.2.2	Ermittlung der maximal zulässigen Sperrschichttemperatur	148
5.6.5.2.3	Ermittlung des thermischen Widerstandes für das Gehäuse	148
5.6.5.2.4	Ermittlung der Eigenerwärmung des Bauelementes	149
5.6.5.3	Ermittlung der maximalen Prüfkammertemperatur $T_2$	151
5.6.5.3.1	Ermittlung der maximal erreichbaren Sperrschichttemperatur	151
5.6.5.3.2	Ermittlung der maximal zulässigen Temperatur innerhalb der Prüfkammer	151
5.6.5.4	Bestimmung der Testdauer	151
5.6.5.5	Beispiel: Ermittlung der Prüftemperatur und der Prüfzeit	152
5.6.6	Ermittlung der Ausfallrate $\lambda$	153
5.6.6.1	Ausfallrate	153
5.6.6.2	Der Vertrauensbereich	154
5.6.6.2.1	Einführung	154
5.6.6.2.2	Der einseitige Vertrauensbereich	154
5.6.6.2.3	Der zweiseitige Vertrauensbereich	155
5.6.6.2.4	Bestimmung des Vertrauensbereiches einer ermittelten Ausfallrate	155
5.6.6.2.5	Beispiel: Bestimmung von Ausfallrate und Vertrauensbereich	156
5.6.6.2.6	Die $\chi^2$ -Tabelle (Chi-Quadrat-Tabelle)	157
5.6.6.2.7	Ergänzende Erläuterungen zur $\chi^2$ -Verteilung	158
5.6.7	Durchführung des Lebensdauertests	159
5.6.7.1	Beschaltung	159
5.6.7.2	Variablen	160
5.6.8	Schlussfolgerungen/Aktionen nach Abschluss der Lebensdauerprüfung	162
5.6.9	Hinweise zu Herstellerangaben	163
5.6.10	Ergänzungen zum Gerätelebensdauer-test	163
5.7	Feuchte Prüfungen	164
5.7.1	Einführung	164
5.7.2	Feuchte-Wärme-Prüfung, konstant	166
5.7.2.1	Allgemein	166

5.7.2.2	Beschleunigungsmodell Peck	168
5.7.2.3	Beschleunigungsmodell Lawson	170
5.7.3	Feuchte-Wärme-Prüfung, zyklisch	170
5.7.4	HAST, Prüfungen bei erhöhtem Dampfdruck	171
5.7.5	Pressure Cooker-Test	172
5.8	Temperaturwechselprüfungen	172
5.8.1	Einführung	172
5.8.2	Ziel des Temperaturwechseltest	173
5.8.3	Vorgehensweise	173
5.8.3.1	Ableitung der Anzahl der Temperaturwechsel	173
5.8.3.2	Beschleunigungsgesetz nach Coffin-Manson	174
5.8.3.3	Prüfungsdurchführung	175
5.8.4	Temperaturschock	177
5.9	Mechanische Prüfungen	177
5.9.1	Mechanischer Schock	177
5.9.2	Vibration	177
5.9.3	Konstante Beschleunigung	178
5.10	HALT - Highly Accelerated Life Testing	178
5.11	HASS - Highly Accelerated Stress Screening	178
5.12	Weitere Beschleunigungsmodelle	179
5.12.1	Spannungs-Beschleunigungsgesetz	179
5.12.2	Das Eyring Modell	179
5.13	Charakterisierung	180
5.14	Screening	181
5.14.1	Einführung	181
5.14.2	Definition	182
5.14.3	Kosten-Nutzen Aspekt	182
5.14.4	Bericht über den Verlauf des Screening	183
5.15	Burn-In	184
5.15.1	Einführung	184
5.15.2	Strategie	185
5.15.3	Durchführung	188
5.15.3.1	Ermittlung Burn-In Zeit	188
5.15.3.2	Beschleunigung	189
5.15.3.3	Temperatur	189
5.15.3.4	Beschaltung	191
5.15.3.5	Ablauf	191
5.15.3.6	Bewertung	192
5.15.3.7	Bericht	194
5.15.3.8	Ermittlung der Burn-In Kosten	195
5.16	Run-In	196
<b>6</b>	<b>Qualifikation – Aspekte, Vorgehensweise, Schlussfolgerung</b>	<b>197</b>
6.1	Einführung	197
6.2	Begriffe	198
6.3	Einteilung der Umweltbedingungen	198
6.4	Umweltbedingungen – Umwelterprobung	200
6.4.1	Festlegungen zu den Prüfungen	200
6.4.2	Grundlegendes	201

6.4.3	Vorgehen	201
6.5	Kategorien der Prüfungen einer Qualifikation	202
6.6	Voraussetzungen und Festlegungen	205
6.7	Mission Profile	207
6.7.1	Einführung	207
6.7.2	Schritte des Mission Profile und der Beobachtungsparameter	209
6.7.3	Beispiel einer Mission Profile Checkliste	211
6.7.4	Betrachtung thermischer Verhältnisse	214
6.7.5	Beispiel für ein Mission Profile für zwei Parameter	216
6.8	Entwicklung eines Qualifikationsplans	218
6.8.1	Einführung	218
6.8.2	Beispiel, Qualifikationsplan mit paralleler Struktur	219
6.8.3	Beispiel, Qualifikationsplan mit sequentieller Struktur	220
6.8.4	Planung und Strukturierung der Tests	221
6.8.5	Zusammenhang und Nutzenwendung der Formeln	222
6.9	Vorgehensweise Qualifikation	224
6.9.1	Aspekte der Vorgehensweise	224
6.9.2	Beispiel zur Vorgehensweise bei einem Lebensdauertest	225
6.9.3	Verfolgung der Probanden im Test	225
6.9.4	Stichprobengröße im Test	226
6.9.5	Relevanz von Ausfällen	227
6.9.6	Entwicklung einer Guideline Qualifikation zur Vorgehensweise	227
6.9.7	Gerätepark	229
6.10	Ausfallanalytik	229
6.10.1	Einführung	229
6.10.2	Ablauf einer Ausfallanalyse an Bauelementen	230
6.10.3	Ablauf einer Ausfallanalyse an Geräten	231
6.10.4	Bericht zur Ausfallanalyse	232
6.11	Bericht über den Verlauf der Qualifikation	233
6.12	Tests und Fehlermechanismen	235
6.12.1	Einführung	235
6.12.2	Generell	235
6.12.3	Fehlermechanismen bei Leiterplatten	235
6.12.4	Fehlermechanismen bei Bauelementen	236
6.13	Schlussfolgerung und Rückführung	237
<b>7</b>	<b>Zuverlässigkeitsberechnung von Boards</b>	<b>240</b>
7.1	Einführung	240
7.2	Begriffe	243
7.3	Kenngrößen der Zuverlässigkeitsanalyse	245
7.4	Veranschaulichung der Begriffe MTBF, MTTF, MTTR und MDT	248
7.5	Herkunft der Daten	250
7.5.1	Einführung	250
7.5.2	Quellen von Standards und Handbüchern	251
7.5.3	Darlegung zu Ausfallraten	252
7.5.4	Aufbau einer Datenbank	255
7.6	Vorgehensweise bei der Prognose	257
7.6.1	Vorbereitung	257
7.6.2	Prämissen	259

7.6.3	Zerlegung in ein Zuverlässigkeits-Blockdiagramm (ZBD)	259
7.6.4	Detaillierte Schritte der Vorgehensweise	261
7.6.5	Einfaches Beispiel	266
7.7	Verwendung des ermittelten MTTF-Wertes	267
7.8	Einschätzung von MTBF / MTTF Prognosen	268
7.9	Reparatur und Zuverlässigkeit	269
<b>8</b>	<b>Zuverlässigkeitsberechnung von Systemen</b>	<b>270</b>
8.1	Einführung	270
8.2	Begriffe	271
8.3	Kenngößen	271
8.4	Hinweise zur Vorgehensweise	272
8.5	Systeme	272
8.5.1	Überblick verschiedener Systeme	272
8.5.2	Seriensystem	273
8.5.2.1	Prinzip der Serienschaltung	273
8.5.2.2	Beispiel Seriensystem	275
8.5.3	Parallelsystem	276
8.5.3.1	Prinzip der Parallelschaltung	276
8.5.3.2	Parallelschaltung von zwei Geräten	277
8.5.3.3	Parallelschaltung von drei Geräten	278
8.5.3.4	Erhöhung der Zuverlässigkeit mit vier Geräten	278
8.5.3.5	Beispiel Parallelsystem mit zwei Geräten	279
8.5.5	Kalte Redundanz	280
8.5.6	Serien- und Parallelsystem	281
8.5.7	k-aus-n-System	283
8.5.8	Beispiel eines 2-aus-3-Systems	285
8.5.9	Beispiel eines 2-aus-4-Systems	287
8.5.10	Beispiel eines 2-aus-3-Systems mit seriellen Voter	288
8.5.11	Beispiel Rauchmeldeanlage	289
8.5.12	Netzwerk Brückenschaltung	292
8.5.13	Parallel-Serien-System	293
8.5.14	Beispiel High Level Redundanz und Low Level Redundanz	294
8.5.15	Beispiel Parallelsystem und gegebener MTTR	296
8.6	Bewertung / Einschätzung	297
<b>9</b>	<b>Weitere Methoden und Hinweise</b>	<b>299</b>
9.1	Einführung	299
9.2	The Deming Circle	299
9.3	Fehlersammelliste	301
9.4	Histogramm	301
9.5	Pareto-Diagramm	303
9.6	Ursache-Wirkungs-Diagramm	306
9.7	Einführung in Statistical Process Control – SPC	307
9.7.1	Begriffe und Prinzip	307
9.7.2	Zielsetzung von SPC	309
9.7.3	Visualisierung der Daten	310
9.7.4	Lage und Streuung	311
9.7.5	Prozessverhalten und Fähigkeit	313

9.8	Lieferantenmanagement und Lieferantenentwicklung	315
9.8.1	Zielsetzung	315
9.8.2	Vorgehensweise	316
9.8.3	Wesentliche Schritte der Lieferantenentwicklung	318
9.9	FMEA - Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse	322
9.9.1	Einführung	322
9.9.2	Die Phasen einer FMEA	323
9.9.3	Das FMEA Formblatt und Vorgehen	324
9.10	Fehlerbaumanalyse FBA (FTA – Fault Tree Analysis)	327
9.10.1	Prinzip des Fehlerbaumes	327
9.10.2	Zuverlässigkeitsblockdiagramm und Fehlerbaum	329
9.10.3	Beispiel eines Fehlerbaum	329
9.11	Pragmatischer Ansatz zur Vorgehensweise bei Risikobewertungen	331
9.12	Zuverlässigkeitswachstum	336
9.12.1.	Einführung	336
9.12.2	Wesentliches des Duane Modell	336
9.12.3	Wesentliches des Crow AMSAA Modells	338
9.13	Japanische Begriffe/ Methodiken	340
9.13.1	Drei M	340
9.13.1	Fünf S	340
9.14	ESD-Audit	341
9.14.1	Einführung	341
9.14.2	Motivation, Zielsetzung	341
9.14.3	Prämissen	342
9.14.4	Vorbereitung	343
9.14.5	Durchführung	345
9.14.6	Aufbau und Ziel eines ESD-Audit Berichtes	350
9.15	ESD-Schutzstrategie in 17 Schritten	351
9.16	Hinweise zur strukturierten Ausbildung von ESD-Fachkräften	353
9.16.1	Einführung	353
9.16.2	Motivation, Ziel, erwartetes Ergebnis	354
9.16.2.1	Motivation zur ESD-Schulung	354
9.16.2.2	Ziel	354
9.16.2.3	Erwartetes Ergebnis	354
9.16.3	Inhalte von ESD-Schulungen und ESD-Informationsveranstaltungen	355
9.16.3.1	Einführung	355
9.16.3.2	Informationsvorträge für Führungskräfte	355
9.16.3.3	Schulung - Einführung des ESD-Schutzes	355
9.16.3.4	Motivations- und Auffrischungsseminare für alle Mitarbeiter	356
9.16.3.5	Beispiel Inhalt Workshop für einen ESD-Beauftragten	356
9.16.4	Besondere Anforderungen an den ESD-Beauftragten	357
9.16.5	Fazit zur ESD Ausbildung	358
9.17	Funktionale Sicherheit	359
9.17.1	Einführung	359
9.17.2	Begriffe	359
9.17.3	Der Sicherheits-Integritätslevel, SIL	361
9.17.4	Sicherheitsintegritäts-Einschränkung bei Hardware-Anforderungen	361
9.17.5	Verbindung von Risiko und Sicherheits-Integritätslevel	362
9.17.6	Ausfallrate, Diagnoseabdeckungsgrad und Safe Failure Fraction	363



9.18	Vereinfachter Ansatz zur Bestimmung der Ausfallrate von Software	364
9.18.1	Einführung	364
9.18.2	Prämissen	365
9.18.3	Darstellung Ausfallratenmodell	365
9.18.4	Hardware- und Software-Zuverlässigkeit	366
<b>10</b>	<b>Normen, Standards, Richtlinien und Publikationen</b>	<b>367</b>
10.1	Einführung	367
10.2	Normen aus der Reihe 60300 – Zuverlässigkeitsmanagement	367
10.3	Normen aus der Reihe 60068 – Umweltsimulationstests	368
10.4	Normen aus der Reihe 60749 – Umweltprüfung Halbleiterbauelemente	372
10.5	Normen zu Zuverlässigkeitsthemen	375
10.6	Normen aus der Reihe 60605	378
10.7	Standards des MIL-STD	378
10.8	Standards aus der Reihe AEC	380
10.9	Standards aus der Reihe EIA	381
10.10	Standards aus der Reihe JEDEC	381
10.11	Richtlinien aus der VDI Reihe zum Themenfeld Zuverlässigkeit	382
10.12	Normen aus der Reihe ISO	384
10.13	Standards der IPC	385
10.14	Informationsbroschüren des VDA	385
10.15	Normen zum ESD-Schutz elektronischer Bauelemente	386
10.16	Normen zur Funktionalen Sicherheit	386
10.17	Normen und Standards zur Software	389
10.18	Organisationen zu Normen, Standards, Richtlinien und Publikationen	390
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>392</b>
<b>12</b>	<b>Abkürzungen, Begriffe, Formelzeichen</b>	<b>396</b>
12.1	Abkürzungen	396
12.2	Begriffe	400
12.3	Formelzeichen	409
<b>Stichwortverzeichnis</b>		<b>412</b>