

---

# Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme

---

Stefan Eberlin • Barbara Hock

# Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme

Eine Einführung in die Praxis

Stefan Eberlin  
München, Deutschland

Barbara Hock  
München, Deutschland

ISBN 978-3-658-03572-3  
DOI 10.1007/978-3-658-03573-0

ISBN 978-3-658-03573-0 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
([www.springer.com](http://www.springer.com))

---

## Vorwort

Im Rahmen unserer beruflichen Tätigkeit sind wir immer wieder mit Fragen konfrontiert worden, zu deren Beantwortung wir gerne auf eine vorhandene Literatur verwiesen hätten. Nur leider haben wir genau diese niemals gefunden. So mussten wir über viele Jahre alle Fragen immer wieder selbst beantworten. Schließlich haben wir uns entschlossen, diese nicht vorhandene Literatur selbst zu verfassen.

Zu danken haben wir in diesem Zusammenhang all diesen Fragestellern, die uns dahin getrieben haben, unsere eigenen Kenntnisse zu erweitern und zu vertiefen. Es waren viele Kollegen, Kunden, Teilnehmer an Seminaren und andere. Zu danken haben wir auch den vielen Bekannten und Unbekannten, deren Wissen wir übernehmen und weiter entwickeln durften. Nicht in allen Fällen sind uns die eigentlichen Urheber bekannt; somit konnten wir sie auch nicht nennen. Vieles wurde über Jahre im kollegialen Kreis informell weitergegeben – so wurde das Wissen der anderen langsam zu unserem. Das wollen wir hier nicht unerwähnt lassen.

Nun hoffen wir, dass dieses Buch dem Leser den Nutzen bringt, den er sich davon erhofft.

München, Deutschland  
im Januar 2014

Stefan Eberlin  
Barbara Hock

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	1
1.1	Ziel und Zielgruppe	2
1.2	Kosten als Motivation	3
1.3	Inhaltsübersicht	5
<b>2</b>	<b>Fehler und Fehlerraten</b>	9
2.1	Definition eines Fehlers	9
2.2	Fehlertypen und Fehlerraten	10
2.2.1	Definition und Einheit der Fehlerrate	13
2.2.2	Fehlerrate, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Systemen	13
2.3	Messen von Fehlerraten	14
2.4	Abhängigkeit der Fehlerrate von Betriebsbedingungen	20
2.5	Internationale Standards für Fehlerraten	21
2.5.1	Quellen für Standards	22
2.5.2	Leistung der Standards	23
<b>3</b>	<b>Zuverlässigkeit</b>	27
3.1	Berechnung von Zuverlässigkeit und MTBF	28
3.2	Fehlerrate und MTBF für Systeme aus mehreren Komponenten	32
3.3	Fehlerrate und MTBF von Standard-Konfigurationen	36
3.3.1	Serielle Konfiguration	36
3.3.2	Parallele Konfiguration	37
3.3.3	$k$ -aus- $n$ Majoritätsredundanz	40
<b>4</b>	<b>Erwartungswerte für das Auftreten von Fehlern</b>	45
4.1	Statistische Grundlagen	45
4.1.1	Zuverlässigkeitsfunktion und Wahrscheinlichkeit	45
4.1.2	Wahrscheinlichkeitsdichte und Wahrscheinlichkeitsverteilung	48
4.1.3	MTBF und mittlere Lebensdauer	52

4.2	Verteilungsfunktion und Ausfallsicherheit . . . . .	56
4.3	Schranken für die Ausfallsicherheit . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Verfügbarkeit und Reparatur . . . . .</b>	<b>65</b>
5.1	Berechnung von Verfügbarkeit und Nicht-Verfügbarkeit . . . . .	68
5.2	Verfügbarkeit und Nicht-Verfügbarkeit in Abhängigkeit von Fehlerraten . . . . .	70
5.3	Verfügbarkeit und Nicht-Verfügbarkeit serieller und paralleler Systeme . . . . .	72
5.4	Verfügbarkeit komplexer Strukturen . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Verfahren nach Markov . . . . .</b>	<b>77</b>
6.1	Prinzip . . . . .	77
6.2	Systeme mit und ohne Reparatur . . . . .	80
6.3	Systeme aus mehreren Komponenten . . . . .	82
6.4	Erweiterte Anwendungen . . . . .	87
<b>7</b>	<b>Verfügbarkeit von Netzwerken und Mehrkomponentensystemen . . . . .</b>	<b>93</b>
7.1	Elementare Netzwerke . . . . .	96
7.1.1	Typische Beispiel-Netze . . . . .	97
7.1.2	Wege als serielle Schaltung . . . . .	101
7.1.3	Aufbau komplexer Netzwerke aus elementaren Netzen . . . . .	101
7.1.4	Komponenten an Netzwerk-Verzweigungen . . . . .	102
7.2	Verbindungen, Kabel und Kabelstrecken . . . . .	103
7.3	Beispielrechnung: Nicht-Verfügbarkeit eines Maschen-Netzwerk . . . . .	109
7.3.1	Anwendung des Additionssatzes . . . . .	111
7.3.2	Folgerungen für die Anwendung des Additions-Satzes . . . . .	114
7.4	Berechnungs-Verfahren . . . . .	114
7.4.1	Entscheidungsbaum . . . . .	115
7.4.2	Binärer Entscheidungsbaum . . . . .	121
7.5	Genauigkeit der Berechnung . . . . .	127
7.6	Knoten und Kanten an Verzweigungen . . . . .	128
7.7	Variation der Parameter . . . . .	130
7.8	Optimierung der Verfügbarkeit . . . . .	134
<b>8</b>	<b>Ersatzteile . . . . .</b>	<b>137</b>
8.1	Komponenten-Tausch und Umlaufzeit . . . . .	138
8.2	Umfang von Ersatzteil-Vorräten . . . . .	139
8.2.1	Materialliste . . . . .	140
8.2.2	Berechnung der Ersatzteil-Vorräte . . . . .	140
8.2.3	Optimierung der Lagerhaltung . . . . .	143
<b>9</b>	<b>Vertrauensbereich für Fehlerraten . . . . .</b>	<b>145</b>
9.1	Berechnung des Vertrauensbereichs . . . . .	146
9.2	Interpretation und Anwendung . . . . .	157

---

9.2.1	Einfluss statistischer Schwankungen der Stichprobe . . . . .	157
9.2.2	Kleine Stichproben und Null Fehler . . . . .	161
9.2.3	Anpassung unterschiedlicher Vertrauenswahrscheinlichkeiten .	162
9.2.4	Ermittlung der Stichprobengröße für gegebene Fehlerraten und Vertrauensgrenzen . . . . .	167
<b>10</b>	<b>Anhang</b> . . . . .	169
10.1	Fehlerfortpflanzung in Fehlerraten . . . . .	169
10.2	Anwendungsbeispiele und Interpretation . . . . .	172
10.2.1	Fehlerrate eines Dioden-Lasers in Abhängigkeit von der optischen Leistung . . . . .	173
10.2.2	Gewährleistung von Massenprodukten . . . . .	180
10.3	Ergebnisherleitung der Summenformel . . . . .	182
10.4	Lösung der Markov-Differentialgleichungen . . . . .	183
10.5	Weibull-Verteilung für frühe Fehler und Verschleißfehler . . . . .	187
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	191

---

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Kosten der Zuverlässigkeit . . . . .	5
Abb. 2.1	Zeitlicher Verlauf der Summe aller Fehlerraten ( <i>Badewannenkurve</i> ) .	12
Abb. 2.2	Reales Experiment – Ausweitung des Basis-Experiments . . . . .	18
Abb. 2.3	Fehlerrate $\lambda$ einer Laser-Diode in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur $T$ . . . . .	21
Abb. 3.1	Anzahl $n(t)$ fehlerfreier Komponenten in Abhängigkeit von der Zeit $t$	29
Abb. 3.2	Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ . . . . .	30
Abb. 3.3	Stufenweise Berechnung von Fehlerraten . . . . .	35
Abb. 3.4	Einfache serielle Konfiguration . . . . .	36
Abb. 3.5	Einfache parallele Konfiguration . . . . .	38
Abb. 3.6	Konfiguration mit $k$ -aus- $n$ Majoritätsredundanz . . . . .	41
Abb. 3.7	Vergleich der Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ und der Fehlerrate $\lambda$ für verschiedene Werte von $k$ ( $n = 5, \lambda_e = 800$ FIT) . . . . .	42
Abb. 4.1	Binomial- oder Bernoulli-Verteilung . . . . .	50
Abb. 4.2	Poisson-Verteilung . . . . .	51
Abb. 4.3	Normal- oder Gauß-Verteilung . . . . .	52
Abb. 4.4	Mittlere Lebensdauer: Flächenvergleich . . . . .	55
Abb. 4.5	Binomial-Verteilung für $n = 5$ und $p = 0,2$ bzw. $p = 0,5$ . . . . .	57
Abb. 4.6	$f(0, t) = R(t)$ für eine Binomial-Verteilung . . . . .	58
Abb. 4.7	Zeitabhängigkeit einer Binomial-Verteilung . . . . .	60
Abb. 4.8	Ausfallsicherheit für $N = 135, \lambda = 3000$ FIT bei einer Schranke von 95 % . . . . .	62
Abb. 4.9	Relative Fehlerhäufigkeit für verschiedene Fehlerraten $\lambda$ . . . . .	64
Abb. 5.1	Wechsel der Betriebszustände in Abhängigkeit von MTBF und MDT	68
Abb. 5.2	Zeitabhängigkeit der System-Verfügbarkeit (Beispiel: $MTBF = 1$ Jahr, $MDT = 4$ Stunden) . . . . .	70
Abb. 5.3	Redundante Schaltung . . . . .	75
Abb. 5.4	Beispiel-Schaltung für komplexe Verfügbarkeits-Berechnung . . . . .	76



Abb. 6.1	Markov-Analyse für 2 Zustände . . . . .	78
Abb. 6.2	Zustandsübergänge ohne Reparatur ( <i>oben</i> ) und mit Reparatur ( <i>unten</i> )	81
Abb. 6.3	Zustände und mögliche Übergänge im 2-Komponenten-System . . .	83
Abb. 6.4	Übergangsraten im 2-Komponenten-System . . . . .	84
Abb. 6.5	Übergangsraten im 2-Komponenten-System (vereinfacht) . . . . .	84
Abb. 6.6	Schaltungsvarianten für 2 Komponenten . . . . .	86
Abb. 6.7	Übergangsraten im 3-Komponenten-System . . . . .	87
Abb. 6.8	Übergangsraten im 3-Komponenten-System (vereinfacht) . . . . .	88
Abb. 6.9	Schaltungsvarianten für 3 Komponenten . . . . .	89
Abb. 7.1	Einfache Verbindung über eine serielle Schaltung . . . . .	97
Abb. 7.2	Ring-Netzwerk . . . . .	98
Abb. 7.3	Maschen-Netzwerk . . . . .	98
Abb. 7.4	Doppelring-Netzwerk . . . . .	99
Abb. 7.5	Netzwerk mit drei verbundenen Endpunkten . . . . .	100
Abb. 7.6	Drei elementare Netzwerke in Serie . . . . .	102
Abb. 7.7	Zusammenfassung der Verbindungsmedien im Netzwerk . . . . .	106
Abb. 7.8	Beispiel: Verbindung über Glasfaser-Kabel . . . . .	108
Abb. 7.9	Beispiel: Verfügbarkeit eines Maschen-Netzwerks . . . . .	109
Abb. 7.10	Maschen-Netzwerk . . . . .	115
Abb. 7.11	Entscheidungsbaum mit Ergebnissen der Nicht-Verfügbarkeit . . . . .	117
Abb. 7.12	Modifiziertes Maschen-Netzwerk mit Kabel-Längen . . . . .	128
Abb. 7.13	Kanten und Knoten des Maschen-Netzwerks mit Verzweigungen . . .	129
Abb. 7.14	Variable Kabel-Fehlerraten und gleich bleibende Nicht-Verfügbarkeit aller sonstigen Elemente . . . . .	132
Abb. 7.15	Gleich bleibende Kabel-Fehlerraten und variable Nicht-Verfügbarkeit aller sonstigen Elemente . . . . .	132
Abb. 7.16	Gleiche Kabel-Länge, gleich bleibende Kabel-Fehlerraten und variable Nicht-Verfügbarkeit aller Kanten . . . . .	133
Abb. 8.1	Ersatzteil-Logistik mit Reparatur der Komponenten . . . . .	139
Abb. 8.2	Beispiel: Berechnung der Ersatzteil-Vorräte $n = 150$ , $\lambda = 5000$ FIT, $t = 90$ Tage . . . . .	142
Abb. 8.3	Zweistufige Lagerhaltung . . . . .	143
Abb. 9.1	Modifikation der Poisson-Verteilung von $\hat{\lambda}$ zu $\lambda_{CL}$ . . . . .	149
Abb. 9.2	Vertrauensgrenze $\lambda_{CL}$ in Abhängigkeit von der Gesamtzahl der Betriebsstunden $n \cdot \tau$ für die Vertrauenswahrscheinlichkeit $CL = 80\%$ . . . . .	154
Abb. 9.3	Bestimmung des $\chi^2$ -Wertes zu $CL = 80\%$ aus der Verteilungsfunktion der $\chi^2$ -Verteilung für $k = 2c + 2 = 8$ . . . . .	155
Abb. 9.4	Fiktive Verteilung zukünftiger Ergebnisse . . . . .	156
Abb. 9.5	$\beta$ in Abhängigkeit der beobachteten Fehlerzahl $c$ für verschiedene Vertrauenswahrscheinlichkeiten $CL$ . . . . .	159
Abb. 9.6	Sukzessive Auswertung realer Stichproben ( $CL = 80\%$ ) . . . . .	160

---

Abb. 10.1	Dioden-Kennlinie: Stromstärke $I$ in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung $U$ . . . . .	173
Abb. 10.2	Optische und elektrische Leistung, Diodenspannung und Wirkungsgrad eines Dioden-Lasers in Abhängigkeit von der Stromstärke . . . . .	174
Abb. 10.3	$\pi_I$ und $\pi_T$ in Abhängigkeit von Stromstärke ( <i>links</i> ) bzw. Sperrschicht-Temperatur ( <i>rechts</i> ) . . . . .	176
Abb. 10.4	Modell der Leistungs-Aufteilung in der Laser-Diode (LD) . . . . .	177
Abb. 10.5	Modellierung der $U-I$ -Abhängigkeit der Dioden-Kennlinie . . . . .	178
Abb. 10.6	Abhängigkeit der Fehlerrate von der optischen Leistung . . . . .	179
Abb. 10.7	Übergangsraten im 2-Komponenten-System (vereinfacht) . . . . .	184
Abb. 10.8	Badewannen-Kurve . . . . .	188