

LEHRBUCH

Stefan Eberlin
Barbara Hock

Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme

Eine Einführung in die Praxis

 Springer Vieweg

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)

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

1	Einführung	1
1.1	Ziel und Zielgruppe	2
1.2	Kosten als Motivation	3
1.3	Inhaltsübersicht	5
2	Fehler und Fehlerraten	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
3	Zuverlässigkeit	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
4	Erwartungswerte für das Auftreten von Fehlern	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
5	Verfügbarkeit und Reparatur	65
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
6	Verfahren nach Markov	77
6.1	Prinzip	77
6.2	Systeme mit und ohne Reparatur	80
6.3	Systeme aus mehreren Komponenten	82
6.4	Erweiterte Anwendungen	87
7	Verfügbarkeit von Netzwerken und Mehrkomponentensystemen	93
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
8	Ersatzteile	137
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
9	Vertrauensbereich für Fehlerraten	145
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
10	Anhang	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
	Sachverzeichnis	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 λ 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 λ 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 λ	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 λ_{CL}	149
Abb. 9.2	Vertrauensgrenze λ_{CL} in Abhängigkeit von der Gesamtzahl der Betriebsstunden $n \cdot \tau$ für die Vertrauenswahrscheinlichkeit $CL = 80\%$	154
Abb. 9.3	Bestimmung des χ^2 -Wertes zu $CL = 80\%$ aus der Verteilungsfunktion der χ^2 -Verteilung für $k = 2c + 2 = 8$	155
Abb. 9.4	Fiktive Verteilung zukünftiger Ergebnisse	156
Abb. 9.5	β 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	π_I und π_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

Die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Geräte und Anlagen spielt im Leben eines modernen Menschen eine immer mehr zunehmende Rolle. Was wir im alltäglichen privaten und beruflichen Leben zu spüren bekommen ist, dass Geräte und Anlagen, deren Funktionsfähigkeit wir brauchen oder wünschen, eben nicht immer zuverlässig und verfügbar sind. Was für den Einzelnen häufig eher ein Ärgernis ist, ist in einem Umfeld, in dem genau diese Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit für einen Betrieb oder ein Geschäft entscheidend sein können, ein Problem mit großer Tragweite. Daher ist es ein wichtiges Anliegen, dieses Problem auf nachvollziehbare Weise zu verstehen, zu analysieren und letztlich in den Griff zu bekommen.

Zunächst wollen wir die Begriffe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit vereinfacht definierten: Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit, ein Objekt oder ein System aus Objekten zu einem bestimmten Zeitpunkt funktionsfähig vorzufinden, ohne dass wir in den Betrieb eingreifen oder Reparaturen durchführen. Wir werden sehen, dass die Zuverlässigkeit grundsätzlich exponentiell mit der Zeit abnimmt. Verfügbarkeit ist die Wahrscheinlichkeit, ein Objekt oder ein System aus Objekten zu einem beliebigen Zeitpunkt funktionsfähig vorzufinden. Im diesem zweiten Fall greifen wir durch Reparaturen in den Betrieb ein. Wir werden sehen, dass während des regulären Betriebs die Zuverlässigkeit im Allgemeinen weitgehend konstant bleibt, zumindest für den großen Teil der „Lebenserwartung“ eines Systems oder Objekts, den wir in diesem Buch betrachten.

Um es gleich vorweg festzustellen: ein technisches Objekt oder System, sei es einfach und klein oder komplex und groß, ist grundsätzlich nie mit absoluter Sicherheit verfügbar oder zuverlässig. Der Begriff der Wahrscheinlichkeit im vorangegangenen Abschnitt lässt es bereits erahnen, dass wir das Problem lediglich mit statistischen Methoden angehen können. Was letzten Endes bedeutet, dass ein System zwar durch Qualität der Komponenten, der Konstruktion und der Fertigung (fast) beliebig zuverlässig und verfügbar sein kann, aber eben niemals mit absoluter Sicherheit.

Dieses Buch ist eine Einführung, die zeigt, wie wir durch sorgfältiges Sammeln von Daten über auftretende, statistisch zufällige Fehler letzten Endes so weit kommen, dass wir

mit einer definierten Sicherheit vorhersagen können, wie es um die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit eines Systems (oder einer Komponente) bestellt ist. Wir können auf dieser Grundlage unsere Konstruktion und unsere Betriebsabläufe optimieren. Wir können vorhersagen, wie viele Ersatzteile welcher Art wir benötigen, um ein System möglichst schnell wieder instand setzen zu können. Und wir können dazu beitragen, in dem Spannungsfeld von gewünschter oder geforderter technischer Qualität einerseits und Kosten andererseits ein geschäftliches Risiko zu verringern.

1.1 Ziel und Zielgruppe

Der Inhalt dieses Buches ist eine Einführung in das Thema, nicht mehr, aber auch nicht weniger. Jeder Ingenieur und jeder Techniker, der sich mit der Konstruktion, Konfiguration oder Wartung von technischen Bauteilen und/oder Systemen beschäftigt, kann früher oder später vor der Aufgabe stehen, die Zuverlässigkeit dieser Bauteile oder Systeme zu bestimmen und zu quantifizieren. Dazu müssen zunächst Daten gesammelt werden und diese Daten dann in geeigneter Weise ausgewertet werden. Wichtigstes Ziel ist es dann, aus den Ergebnissen die richtigen Schlüsse zu ziehen. Damit können Produkte und Verfahren nicht nur aus technischer Sicht optimiert werden. Die Daten und Ergebnisse können auch als wichtige Grundlage für geschäftliche Entscheidungen dienen.

Daher sollten derartige Betrachtungen keine nachgeordnete Aufgabe sein, die man zu irgendeinem späten Zeitpunkt erledigt. Vielmehr sollte diese Überlegung mit am Anfang eines entsprechenden Projektes stehen. Deswegen ist dieses Thema ebenso interessant für Studenten der einschlägigen Fächer wie für Praktiker, die zum ersten Mal oder seit langem wieder einmal vor diesem Problem stehen.

In vielen Fällen wird die Bestimmung der Zuverlässigkeit von Systemen auch als Dienstleistung extern angeboten und eingekauft. Dagegen spricht grundsätzlich nichts, zumal die externe Betrachtung gelegentlich auch eine gewisse Betriebsblindheit vermeidet. Wenn es jedoch um die die Definition eines Auftrages bzw. Bewertung von Ergebnissen und Aussagen geht, dann sind eigene Kenntnisse nicht nur nützlich, sondern gelegentlich unabdingbar. Wie wir noch sehen werden, gibt es durchaus unterschiedliche Methoden, die auch zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, wenn man beispielsweise ausschließlich die Zahlenwerte für eine MTBF¹ betrachtet.

Es geht also schließlich auch darum zu verstehen, nach welchen Standards oder Standards und nach welchen Kriterien eine solche Untersuchung durchgeführt wurde. Hier gilt es die richtigen Fragen zu stellen und die Antworten richtig einzuordnen. Letztlich dient Bestimmung der Zuverlässigkeit neben der reinen Feststellung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit auch der Optimierung. Wenn also zum Beispiel das Ergebnis zunächst nicht so ist, wie wir uns das eigentlich wünschen, so liefern uns unsere Berechnungen die richtigen „Stellschrauben“, um dem gewünschten Ergebnis näher zu kommen. Das setzt immer voraus, dass wir die Details der Analyse und die Ergebnisse richtig verstanden haben.

¹Mean Time Between Failures, siehe Abschn. 3.1.

Voraussetzungen

Welche Kenntnisse und Erfahrungen sind notwendig, um Nutzen aus diesem Buch zu ziehen?

Natürlich ist ein grundlegendes Verständnis technischer Zusammenhänge erforderlich, beispielsweise wie größere Systeme aus gleichartigen oder verschiedenen Komponenten aufgebaut sind und wie diese Komponenten zusammenwirken. Ganz ohne mathematische Grundkenntnisse geht es auch nicht. Die Grundzüge gängiger statistischen Methoden sollten Ihnen vertraut sein, ebenso wie einfache Anwendungen der Differential- u. Integralrechnung. Ansonsten sind der gesunde Menschenverstand und Interesse am Thema hilfreich.

1.2 Kosten als Motivation

Ehe wir uns den technischen Betrachtungen zuwenden, noch ein paar Worte zur eigentlich Motivation: warum sollte man sich um das Thema kümmern. Die Antwort wurde bereits in der Überschrift gegeben: die Motivation ist Geld!

Betrachten wir einfach ganz allgemein die Geldflüsse, die im Zusammenhang mit einem technischen System entstehen können. Da sind einerseits die Kosten, zum Beispiel die Anschaffungskosten für die Geräte selbst und die Betriebskosten, die während der Lebensdauer des Systems auflaufen. Auf der anderen Seite wird ein System zu dem Zweck betrieben, einem Ertrag zu erwirtschaften, z. B. durch eine Dienstleistung für Kunden oder zur Herstellung von Produkten. Ein Kunde wird natürlich nur dann bereit sein, einen angemessenen Betrag zu zahlen, wenn die Dienstleistung hinreichend zuverlässig zur Verfügung steht bzw. das Produkt die erwartete Qualität aufweist und nach einer Bestellung auch lieferbar ist. Für die Produktion gilt also, dass sowohl das Produktionssystem als auch das Produkt Gegenstand unserer Betrachtungen sein können.

Investitionen

Ein System ist dann gut verfügbar, wenn die Fehler der Hardware-Komponenten, die unvermeidlich entstehen, möglichst wenige oder keine Auswirkungen haben.² Ein solcher Effekt wird üblicherweise dadurch erreicht, dass die wichtigen Komponenten mehrfach vorhanden sind, so dass bei Ausfall einer Komponente deren Funktion durch eine redundante Komponente übernommen wird. Einen weiteren, unter Umständen auch sehr hohen Gewinn an Verfügbarkeit erreicht man durch den Einsatz von qualitativ sehr hochwertigen Komponenten, bei denen im Allgemeinen eine höhere Zuverlässigkeit erwartet werden kann. Aus Sicht der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit ist der optimale Zustand offensichtlich die Kombination aus beidem, so dass wir auf diese Weise theoretisch ein beliebig ausfallsicheres System konstruieren können.

²Selbstverständlich können auch Software-Fehler zu Störungen im System führen, zum Beispiel durch fehlerhafte Ansteuerung der Hardware. Software-Fehler sind jedoch nicht Gegenstand dieses Buches.

Als Maß für die Zuverlässigkeit eines Objekts³ ist die mittlere Zeit definiert, die zwischen zwei Fehlern vergeht (MTBF – Mean Time Between Failures). Je länger die MTBF ist, desto zuverlässiger ist das System. Ein vollständig ausfallsicheres System hätte eine unendlich große MTBF – ein Wert, dem wir uns in der Realität allenfalls theoretisch nähern können. Praktisch spielt diese Einschränkung jedoch keine Rolle, da technische Systeme zwar auf eine möglicherweise sehr lange, jedoch immer endliche Lebensdauer ausgelegt sind. Es ist also nicht unbedingt sinnvoll, eine MTBF von z. B. 2000 Jahren anzustreben für ein System, dessen üblicher Lebensdauer 2 Jahre beträgt. Wir werden allerdings später sehen, dass mit zunehmender MTBF die Wahrscheinlichkeit von Fehlern in einem definierten Zeitraum abnimmt – für ein System, das innerhalb eines kurzen Zeitraums hoch zuverlässig sein soll, kann eine MTBF nicht „zu groß“ sein.

Wenn wir eine „beliebig große Zuverlässigkeit“ anstreben, dann müssen wir allerdings in unsere Rechnung einbeziehen, dass sowohl Redundanz als auch höher-wertige Komponenten Geld kosten. Ab irgendeinem Punkt stehen die zusätzlichen Investitionen in keinem vernünftigen Verhältnis mehr zu einer dadurch erreichten Steigerung der Zuverlässigkeit, da die Kosten den dadurch erreichbaren Nutzen übersteigen.

Betriebskosten und Folgekosten

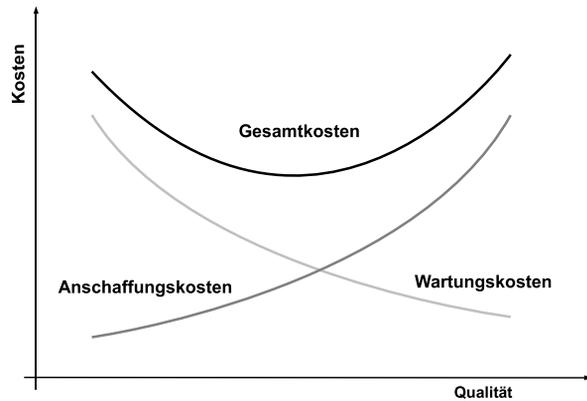
Der zweite große Kostenfaktor für das System sind die Betriebskosten, die unter anderem dadurch entstehen, dass auftretende Fehler behoben werden müssen. In die Kosten für die Fehlerbeseitigung gehen im Wesentlichen die Kosten für die Arbeitszeit und die Kosten für die erforderlichen Ersatzteile ein. Je häufiger Fehler auftreten und je länger ihre Behebung dauert, desto höher sind natürlich auch die durch die Nichtverfügbarkeit verursachten Umsatz- und Gewinn-Einbußen. Und wir sollten auch die Kosten nicht vergessen, die durch die „Verwaltung“ der während eines solchen Fehlers entstandenen Kundenprobleme entstehen.

Betrachten wir als Beispiel den fiktiven Umsatz eines fiktiven Online-Versandhauses, dem wir beispielsweise 100 Millionen Euro als Umsatz zugestehen. Es ist einfach zu berechnen, wie viel Umsatz entfällt, wenn die Internet-Präsenz des Händlers nach Ausfall eines zentralen Servers auch nur für eine Stunde nicht erreichbar ist, auch wenn man davon ausgehen kann, dass viele Kunden zu einem späteren Zeitpunkt ihre Bestellung nachholen werden. Darüber hinaus kann es bei unterbrochenen Bestellvorgängen zu Unstimmigkeiten kommen, die zu Reklamationen führen, die dann bearbeitet werden müssen. Wenn also ein solcher Ausfall häufig vorkommt, kann ein mäßiger Geschäftsgewinn durch entgangene Umsätze und oder zusätzliche Kosten sehr leicht deutlich verringert werden.

Abbildung 1.1 zeigt einen typischen Vergleich von Anschaffungskosten und laufenden Betriebskosten und die daraus resultierenden Summe der Gesamtkosten, die über die Lebensdauer eines Systems auflaufen. Wir sehen daran, dass es ein Kosten-Minimum gibt, an

³Ein „Objekt“ in diesem Sinne kann ein einzelnes Bauteil oder auch ein beliebig komplexes System sein.

Abb. 1.1 Kosten der Zuverlässigkeit



dem relativ zum Aufwand die höchste Qualität erreicht wird. Neben der technischen Betrachtung werden wir immer wieder darauf hinweisen, dass Kosten und Qualität (im Sinne von Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit) gegeneinander abgewogen werden können, auch wenn wir keine Anleitung zur kaufmännischen Optimierung geben wollen und können.

1.3 Inhaltsübersicht

Jede technische (Hardware-)Komponente und jedes System, das auch solchen Komponenten aufgebaut ist, wird mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit innerhalb eines bestimmten Zeitraums mindestens einen Fehler aufweisen. Manche Fehler treten in sehr frühen Phasen des Betriebs auf und sind dann oft auf nicht optimale Produktion oder Konstruktion zurück zu führen. Derartige Fehler lassen sich durch intensive Tests und daraus abgeleitete Maßnahmen zur Verbesserung meist vollständig beseitigen. Nach einer bestimmten Betriebsdauer treten gehäuft Verschleiß-Fehler auf, die durch normale Alterungsprozesse hervorgerufen werden und durch rechtzeitigen Austausch von Komponenten oder ganzen Systemen vermieden werden können.

Darüber hinaus gibt es jedoch auch Fehler, die im Laufe des Betriebs unerwartet zu jedem Zeitpunkt auftreten können. Diese Fehler bezeichnen wir als zufällige Fehler. Das Auftreten dieser zufälligen Fehler kann ausschließlich durch statistische Methoden abgeschätzt werden. Zufällige Fehler sind grundsätzlich nicht zu vermeiden. Die dadurch auftretenden Probleme können jedoch durch sorgfältige Erhebung und Auswertung von Daten, geeignete Konstruktion von Systemen (z. B. Redundanzen) und optimierte Strategien für Reparatur und Instandhaltung minimiert werden.

Das vorliegende Buch erläutert die wichtigsten Themen für den Betrieb von Hardware-Komponenten und -Systemen im Zusammenhang mit zufälligen Fehlern. Wir beginnen mit der Definition von Fehlern und Fehlerraten: Darauf aufbauend entwickeln wir Verfahren zur Abschätzung der Anzahl zu erwartender Fehler und Methoden, wie der Betrieb von Komponenten und Systemen im Rahmen einer statistisch vorhersagbaren Sicherheit gewährleistet werden kann.

Fehler und Fehlerraten

Die wichtigste Größe, die wir immer wieder verwenden werden, ist die Fehlerrate einer Komponente oder eines Systems. Die Fehlerrate beschreibt die Anzahl von Fehlern, die bezogen auf eine Menge von Komponenten in einem Zeitraum zu erwarten ist. Sie wird im Allgemeinen empirisch durch Experimente und/oder durch Sammeln von Betriebsdaten ermittelt. Für größere Systeme kann sie auch rechnerisch aus den Fehlerraten der Komponenten bestimmt werden. Unvollständige, falsch bewertete oder gar – wenn auch in bester Absicht – nach bestimmten Kriterien „ausgewählte“ Daten führen in der Praxis zu unbrauchbaren Ergebnissen für die weiteren Berechnungen.

In Kap. 2 betrachten wir zunächst die einfachste Methode für das Sammeln von Daten in Form einfacher Stichproben. In den meisten praktischen Fällen ist diese Methode ausreichend, um zufriedenstellende Berechnungen anstellen zu können. Wir müssen jedoch immer bedenken, dass eine Stichprobe nur ein zufälliges Ergebnis liefert und dass dieses Ergebnis auch zufällig besonders hoch oder besonders niedrig ausfallen kann („statistische Ausreißer“). Darüber hinaus zeigen wir, wie konkrete Betriebsbedingungen bei der Bestimmung der Fehlerraten berücksichtigt werden und welche Rolle Standards spielen können.

In Kap. 9 gehen wir deshalb einen Schritt weiter und führen einen Vertrauensbereich für die Aussagen zur Fehlerrate ein. Dieser Vertrauensbereich gibt uns an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die tatsächliche Fehlerrate unterhalb eines bestimmten Grenzwerts für die Fehlerrate liegt. Wenn wir diesen Grenzwert anstelle der experimentell bestimmten Fehlerrate verwenden, dann müssen wir formal meist eine deutliche höhere Fehlerrate annehmen. Dafür minimieren wir das Risiko, dass wir in der Stichprobe zufällig eine weit zu niedrige Fehlerrate gefunden haben und deshalb zum Beispiel einem Kunden gegenüber weitaus höhere Gewährleistungskosten abdecken müssen, als wir eigentlich erwartet hätten.

Zuverlässigkeit

Die erste Anwendung der Fehlerraten ist die Berechnung der Zuverlässigkeit von Komponenten und Systemen (Kap. 3). Zuverlässigkeit ist hier definiert als Wahrscheinlichkeit, ein Objekt (Komponente oder System) zu einem bestimmten Zeitpunkt in funktionsfähigem Zustand vorzufinden. Wesentliche Voraussetzung ist dabei, dass das Objekt ungestört und insbesondere auch ohne zwischenzeitliche Reparatur unter zulässigen Bedingungen betrieben wird.

Wir werden, ausgehend von einer Zuverlässigkeitsfunktion, die den zeitlichen Verlauf der Zuverlässigkeit beschreibt, die Fehlerrate und die mittlere Lebensdauer von Objekten berechnen. Dabei zeigt sich, dass die mittlere Lebensdauer eines solchen ungestörten Objektes gleich der MTBF (mean time between failure, mittlere Zeit zwischen zwei Fehlern) dieses Objektes ist. Im Detail werden wir einzelne Komponenten, serielle und parallele Schaltungen und Systeme mit redundanten Komponenten (k -aus- n Majoritätsredundanz) betrachten. Diese Schaltungen und Systeme können stellvertretend für Objekte verwendet werden, in denen alle, mindestens eine oder mehrere der vorhandenen Komponenten gleichzeitig zum Erfüllen einer Funktion fehlerfrei sein müssen.

Erwartungswerte, Ausfallsicherheit, Schranken

In einem konkreten Experiment oder bei der Beobachtung konkreter Mengen von Objekten werden wir trotz gleicher Fehlerraten, gleicher Anzahl von Objekten und gleichen Betriebsbedingungen immer Schwankungen in der tatsächlich beobachteten Fehlerzahl finden. Diese Streuung der Ergebnisse können wir durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschreiben (Kap. 4). Mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen können wir vorher sagen, mit welcher Wahrscheinlichkeit wir eine bestimmte Anzahl von Fehlern erwarten können und mit welcher Wahrscheinlichkeit wir höchstens eine bestimmte Anzahl von Fehlern erwarten können. Diese Art von Aussagen können die Daten liefern, die wir z. B. für Prognosen zukünftiger Reparaturen oder Garantieleistungen benötigen.

Mit dem gleichen Ansatz können wir auch bestimmen, mit welcher maximalen Anzahl von Fehlern wir rechnen müssen, wenn diese maximale Anzahl mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit nicht überschritten werden soll. Derartige Schranken sind insbesondere dann gefordert, wenn die Ausfallsicherheit eines Systems bestimmt werden soll, das erst bei mehr als einer fehlerhaften Komponente tatsächlich vollkommen ausfällt.

Verfügbarkeit und Reparatur

Die wichtigste Anwendung von Fehlerraten und den daraus berechneten Wahrscheinlichkeiten für Fehlerzustände und Ausfälle von Systemen ist die Berechnung der Verfügbarkeit von Systemen. Die Verfügbarkeit beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein System zu einem beliebigen Zeitpunkt in einem funktionsfähigen Zustand befindet. Diese Aussage ist gleichbedeutend damit, dass das System während des durch diese Wahrscheinlichkeit beschriebenen Anteils der gesamten Zeit funktionsfähig ist. Der entscheidende Unterschied zur Berechnung der Zuverlässigkeit eines Systems ist, dass wir bei der Verfügbarkeit Systeme betrachten, die im Falle eines Fehlers unmittelbar wieder repariert werden. Aus Sicht der Verfügbarkeit wird das System also wieder in den Anfangszustand zurück versetzt.

Zunächst leiten wir in Kap. 5 intuitiv die Wahrscheinlichkeit her, mit der sich das System in funktionsfähigem Zustand befindet. Hier gehen wir von den bekannten Fehlerraten und den daraus hergeleiteten Werten der MTBF aus. Zusätzlich müssen wir die Zeit für die Reparatur selbst und die damit verbundenen Aktivitäten mit einbeziehen, die vom Auftreten des Fehlers bis zur vollständigen Wiederherstellung der Systemfunktion vergeht (MDT, mean down time). Diese Vorgehensweise eignet sich jedoch nur für einfache Konfigurationen.

In Kap. 7 betrachten wir die Verfügbarkeit von netzwerk-artigen Strukturen, wie sie typischerweise nicht nur in echten Netzwerken auftreten, sondern auch in anderen umfangreichen Konfigurationen, in denen Komponenten abhängig voneinander betrieben werden. Anhand typischer elementarer Schaltungen wird die Systematik entwickelt, nach denen sichere Ergebnisse berechnet werden können. Auch diese Vorgehensweise erreicht mit der Komplexität von Systemen vergleichsweise bald die Grenzen der Einsatzfähigkeit.

Ab Abschn. 7.4 zeigen wir deshalb Algorithmen, die unabhängig von der Komplexität einer Konfiguration sicher zum richtigen Ergebnis führen. Diese Algorithmen können auch vergleichsweise einfach automatisiert werden und als Grundlage für eine systematische Vorgehensweise dienen.

Verfahren nach Markov

Das Verfahren nach Markov, das wir in Kap. 6 vorstellen, bietet ein mathematisches Modell, mit dessen Hilfe sowohl die Zuverlässigkeit als auch die Verfügbarkeit von System aus mehreren Komponenten berechnet werden können. Die zugrunde liegende Analyse führt zu einem System von Differentialgleichungen, das mit Hilfe von Standard-Methoden gelöst werden kann. In einfachen Fällen, bei denen nur wenige Komponenten beteiligt sind, ist eine analytische Lösung möglich. Für zwei bzw. drei Komponenten zeigen wir das konkrete Lösungsverfahren als Beispiel. In komplexeren Fällen wird man eher zu rechnergestützten numerischen Verfahren greifen, die nicht Gegenstand dieses Buches sind.

Die Ergebnisse des Markovs-Verfahrens sind identisch mit denen, die in den vorangegangenen Kapiteln auf intuitive Weise hergeleitet wurden. Zusätzlich wird jedoch ein zeitabhängiger Anteil für die Verfügbarkeit erhalten, der insbesondere in einer Anfangsphase des Betriebs eines Systems relevant sein kann.

Ersatzteile

Um ein System tatsächlich innerhalb einer vorgegebenen Zeit reparieren zu können, ist es erforderlich, dass benötigte Ersatzteile möglichst unmittelbar zugreifbar sind. Mit Hilfe der vorher berechneten Erwartungswerte für das Auftreten von Fehlern ist jetzt möglich, Vorhersagen zu treffen, wie viele Ersatzteile bestimmter Art innerhalb eines gegebenen Zeitraums benötigt werden. Dabei wird auch die Zeit berücksichtigt, die für die Wiederbeschaffung und/oder Reparatur eines Ersatzteils bzw. einer fehlerhaften Komponente erforderlich ist. Darüber hinaus betrachten wir einfache Modelle, wie eine optimale Lagerhaltung von Ersatzteilen aufgebaut werden kann (Kap. 8).

Anhang

Im Anhang sind einige Spezialfälle und Ergänzungen zusammengestellt, die nicht notwendigerweise für das vollständige Verständnis des Themas erforderlich sind, die jedoch als Beispiel für eine konkrete Vorgehensweise in komplexeren Fällen dienen. Darüber hinaus finden sich ausführliche Berechnungen, die im vorderen Teil nur als Ergebnis verwendet werden. Schließlich sind Hinweise auf Verfahren zum Berechnen von Fehlerarten (frühe Fehler, Verschleißfehler) aufgenommen, die nicht Gegenstand des vorliegenden Buches sind, die jedoch in diesem Zusammenhang zumindest erwähnt werden sollten.

Die exakte Definition des Begriffs „Fehler“ und die möglichst genaue Bestimmung der Fehlerraten sind die Basis für alle weiteren Berechnungen von Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Auch wenn die Bestimmung von Fehlerraten zunächst trivial erscheinen mag, so können die Folgen von (auch organisatorisch bedingten) Ungenauigkeiten wirtschaftlich sehr nachteilig sein. Wirtschaftliche und organisatorische Vorteile können sich im Gegenzug aus der Kenntnis und der geeigneten Verwendung einschlägiger Standards, die in der Industrie häufig gefordert werden und/oder zumindest allgemein anerkannt sind, ergeben.

2.1 Definition eines Fehlers

Ehe wir uns mit Fehlerraten,¹ also der relativen Anzahl von Fehlern, die bei einer definierten Menge von Objekten innerhalb einer Zeitspanne auftreten, beschäftigen, müssen wir zunächst definieren, was genau wir unter einem Fehler verstehen. Die erste und wesentlichste Einschränkung für unsere Betrachtungen haben wir bereits erwähnt: wir betrachten in diesem Buch ausschließlich Hardware.

In unserem Sinne soll ein „Objekt“ genau dann fehlerhaft sein, wenn es seine erwartete Funktion nicht erfüllt. Ein solches „Objekt“ kann in diesem Zusammenhang eine beliebig einfache oder komplexe technische Anordnung sein. Es kann also sowohl ein äußerst einfaches Bauteil sein, z. B. ein Widerstand oder ein Kondensator, oder eine ganze Industrieanlage, die aus zahlreichen Elementen besteht, die ihrerseits bereits aus einer Vielzahl von komplexen Untereinheiten aufgebaut sind.

Der am einfachsten zu identifizierende Fall eines Fehlers ist sicher der, wenn ein Objekt vollständig funktionsunfähig ist. Ein Fehler liegt jedoch auch dann vor, wenn das Objekt

¹Im Sprachgebrauch und in der Literatur sind statt Fehler und Fehlerrate auch die Begriffe Ausfall und Ausfallrate üblich. Wir ziehen hier den Begriff Fehler vor, da wir als Fehler auch einen Zustand sehen wollen, der nicht mit einer vollständigen Unbrauchbarkeit, also einem vollständigen „Ausfall“, eines Objektes einher geht.

zwar grundsätzlich seine Funktion ganz oder teilweise erfüllen kann, jedoch nicht im geforderten Umfang. Ein Beispiel dafür ist, dass ein Drucker zwar korrekte Ausdrücke in der geforderten Qualität liefert, jedoch statt der zugesicherten 10 Seiten nur 5 Seiten pro Minute ausdruckt. Ein anderes Beispiel ist, dass ein technisches Gerät nicht die erforderlichen Kennlinien für Eingangs- und Ausgangs-Funktionen erreicht.

Wesentlicher Bestandteil der Definition eines Fehlers ist also die Spezifikation der Fähigkeiten, die ein Objekt haben muss, und die korrekte Bedienung des Objektes. Dazu gehört im Allgemeinen sowohl die Definition der Leistung des Objekts (also z. B. die Anzahl der Seiten, die ein Drucker pro Minute druckt), als auch die Bedingungen, unter denen diese Leistung erbracht wird. Typische Bedingungen für den Betrieb technischer Geräte sind zum Beispiel die Spannen für die zulässige Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Umgebung, aber auch die Qualität der Stromversorgung oder die Art der Eingangs-Signale. Nur solange ein technisches Gerät tatsächlich unter zulässigen Bedingungen betrieben wird und solange kein Bedienfehler vorliegt, kann überhaupt eine fehlerfreie Funktion erwartet werden. Und nur in diesem Fall kann eine Abweichung von spezifizierten Eigenschaften sicher als Fehler gewertet werden.

2.2 Fehlertypen und Fehlerraten

Bereits aus der allgemeinen Lebenserfahrung wissen wir, dass Fehler an einem technischen Gerät zu jedem Zeitpunkt auftreten können. Bei sehr neuen oder neuartigen Geräten müssen wir schlimmstenfalls damit rechnen, dass noch nicht alle „Kinderkrankheiten“ beseitigt sind. Wenn wir ein Gerät so lange betreiben, dass seine zu erwartende Lebensdauer erreicht wird, müssen wir vermehrt mit dem Auftreten von verschleiß-bedingten Fehlern rechnen. Aber auch zu jedem anderen Zeitpunkt kann unerwartet ein Fehler auftreten.

Demzufolge unterscheiden wir verschiedene Arten von Hardware-Fehlern, je nach Zeitpunkt und Ursache ihres Auftretens während der Betriebsdauer einer Komponente oder eines Systems. Wenn wir die gesamte Fehlerrate eines Systems betrachten, dann liefern diese verschiedenen Arten von Fehlern je nach Zeitpunkt also verschieden hohe Beiträge. Die Fehlerrate ist dabei die Anzahl der innerhalb eines definierten Zeitraums auftretenden Fehler im Verhältnis der Anzahl der insgesamt betrachteten Komponenten, also die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers. Zunächst wollen wir hier einfach die wichtigsten Fehlertypen definieren: frühe Fehler, zufällige Fehler und Verschleißfehler.

Frühe Fehler

Was wir hier als „frühe Fehler“ („Kinderkrankheiten“) bezeichnen, sind solche Fehler, die praktisch ausschließlich am Anfang des Lebenszyklus² eines Produktes auftreten und für diese Phase typisch sind. Typische Ursachen dafür sind, neben sporadischen Fehlern

²Der Begriff „Lebenszyklus“ kann sich je nach Betrachtungsweise sowohl auf den anfänglichen Betrieb eines bestimmten Produktes oder einer bestimmten Anlage als auch auf die Markteinführungsphase einer Produktserie beziehen.