

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.

bei der Produktion, auch Konstruktions- oder Planungsfehler wie der Einsatz von unzureichend dimensionierten Komponenten (z. B. zu schwaches Netzteil) oder systematische Produktions-Fehler (z. B. fehlerhafte Einstellung einer automatischen Fertigungsanlage). Daneben gibt es auch den „menschlichen Faktor“. Gerade bei neuen oder neuartigen Produkten oder Systemen ist häufig eine mehr oder weniger langer Lernphase des Installations- und Bedien-Personals zu beobachten, die tatsächlich zur Beeinträchtigung bis hin zum Ausfall führen, jedoch mit zunehmender Erfahrung praktisch nicht mehr auftreten.

Durch geeignete Tests während der Entwicklung eines Systems oder Produktes zur Marktreife oder auch vor der Übergabe einer konkreten Installation an den Kunden können Konstruktions- und Fertigungsfehler weitgehend erkannt und beseitigt werden. Üblicherweise wird dabei auch das „Burn-in“-Verfahren eingesetzt, bei dem man Komponenten oder Systeme unter gerade noch zulässigen Extrem-Bedingungen betreibt, um sicher zu stellen, dass die Anforderungen auch in solchen Fällen erfüllt werden.

Bei entsprechend sorgfältig und umfassend ausgeführten Tests nimmt die Anzahl der frühen Fehler in der Regel bereits am Anfang des Lebenszyklus eines Systems sehr rasch ab, so dass sie im realen Betrieb kaum noch vorkommen. Im Vergleich mit den Fehlern anderer Ursachen können diese Fehler im Allgemeinen deswegen vernachlässigt werden.

Zufällige Fehler

Zufällige Fehler sind Fehler, die unerwartet und unabhängig von Alter oder der Betriebsdauer einer Komponente oder eines Systems auftreten. Ihre Ursache ist im Allgemeinen zwar technisch zu erklären, jedoch im Einzelfall nicht vorhersehbar. Als Ursachen kommen einerseits rein statistische Abweichung in den grundlegenden Materialeigenschaften in Frage. Andererseits werden üblicherweise Komponenten verwendet, die definierten, jedoch nicht beliebig hohen Qualitätsansprüchen genügen. Diese Qualitätsansprüche orientieren sich sowohl an der erforderlichen Zuverlässigkeit der Komponenten, als auch an den Kosten. Bei Komponenten geringerer Qualität muss meist mit einer höheren Anzahl zufälliger Fehler gerechnet werden, die zum Beispiel auch auf eine bewusst eingeschränkte Fertigungsqualität zurückzuführen sein können.

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten zufälliger Fehler ist über die gesamte Lebensdauer einer Komponente oder eines Systems zu jedem Zeitpunkt gleich. Ihr absoluter Beitrag zur Fehlerhäufigkeit eines Gesamt-Systems bleibt also über die Lebensdauer des Systems konstant.

Verschleißfehler

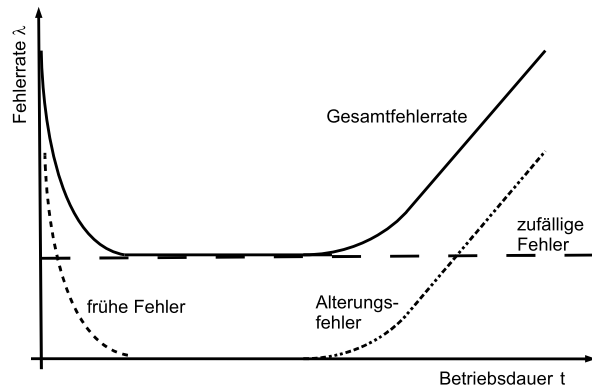
Verschleißfehler (auch als Alterungsfehler bezeichnet) entstehen im Laufe der Betriebsdauer durch normalen Verschleiß im Rahmen der üblichen Beanspruchung und der Bedingungen, unter denen eine Komponente oder ein System zulässigerweise betrieben wird. Infolgedessen treten diese Fehler normalerweise erst dann auf, wenn sich die Betriebsdauer der zu erwartenden Lebensdauer für die Komponente oder das System annähert.

Wenn wir ein Gesamt-System im zeitlichen Verlauf betrachten, dann liegt der Anteil der verschleißbedingten Fehler über einen gewissen Zeitraum praktisch bei Null. Das heißt nach dem Ende der Phase der „Kinderkrankheiten“ bleibt die gesamte Fehlerrate praktisch konstant, da sie (fast) ausschließlich durch zufällige Fehler bestimmt wird. Kennzeichnend für einsetzenden Verschleiß ist es, dass die Fehlerrate ab einem Zeitpunkt deutlich und kontinuierlich ansteigt. Durch normale Alterungs-Prozesse (z. B. mechanische Abnutzung, Veränderungen durch thermische Belastung) sind Komponenten nach einer bestimmten Betriebsdauer entweder vollständig defekt, oder sie verändern ihre Eigenschaften in einer Weise, dass sie ihre Funktion nicht mehr mit der erforderlichen Präzision erfüllen und deshalb als fehlerhaft gelten.

Summe der Fehlerraten – Badewannenkurve

Wenn wir die Fehlerraten aller genannten Fehlertypen für die Betriebsdauer eines Systems oder einer Komponente addieren, erhalten wir den in Abb. 2.1 dargestellten zeitlichen Verlauf der gesamten Fehlerrate. Wegen der typischen Form wird dieser Verlauf auch als „Badewannenkurve“ bezeichnet. Die Fehlerrate wird mit λ bezeichnet. Die Badewannenkurve stellt also λ in Abhängigkeit von der Zeit dar.

Abb. 2.1 Zeitlicher Verlauf der Summe aller Fehlerraten (Badewannenkurve)



Die Grundlage für die in diesem Buch dargestellten Überlegungen zur Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit bilden ausschließlich die zufälligen Fehler. Alle Aussagen gelten also nur für den zeitlichen Bereich, in dem sowohl frühe Fehler als auch Alterungsfehler keine Rolle spielen. Dieser Bereich entspricht dem mittleren Plateau des Kurvenverlaufs. Zwar treten zufällige Fehler auch am Anfang und am Ende der Lebensdauer auf. Der Betrieb eines Systems wird jedoch während dieser Zeiträume eher durch die beiden anderen Fehlertypen beeinträchtigt. Den mittleren Teil des Kurvenverlaufs könnte man auch als die Zeit des „Normalbetriebs“ bezeichnen. Während dieser Zeit kann der Betrieb durch normale und planbaren Wartungs- und Reparaturmaßnahmen aufrecht erhalten werden. Nur diesen Zeitraum können wir mit den im Folgenden gezeigten statistischen Methoden korrekt erfassen. In den frühen und späten Phasen der Betriebsdauer müssen andere Methoden zur Aufrechterhaltung des Betriebs eingesetzt werden, zum Beispiel Beseitigen der frühen

Fehler durch Tests und Vermeiden der Verschleißfehler durch rechtzeitigen Austausch der bedrohten Anteile.³

2.2.1 Definition und Einheit der Fehlerrate

Die Fehlerrate λ ist definiert durch die Anzahl Fehler pro Zeiteinheit. Die für die Berechnung der Fehlerrate eingesetzte Zeit ist die tatsächliche Betriebsdauer des betrachteten Objekts. Die Zeit, die seit der ersten Inbetriebnahme des Objekts tatsächlich vergangen ist, ist dabei unerheblich. Wenn also ein Objekt nur während 10 % der Zeit tatsächlich in Betrieb ist, dann wird zum Beispiel innerhalb von zehn Jahren nur eine tatsächliche Betriebsdauer von einem Jahr erreicht. Wenn innerhalb dieser Zeit ein Fehler auftritt, dann ist die daraus resultierende Fehlerrate also 1 Fehler pro Jahr und nicht etwa 1 Fehler in 10 Jahren.

In der Elektrotechnik wird häufig die Einheit FIT (Failures In Time) verwendet. 1 FIT steht dabei für 1 Fehler in 10^9 Betriebsstunden, also in etwa 114 000 Jahren. Auf den ersten Blick erscheint diese Einheit recht unhandlich, denn Systeme mit einer Lebensdauer von 114 000 Jahren sind doch eher unrealistisch. Wir betrachten hier jedoch nicht derart langlebige Systeme, sondern statistische Phänomene. Die Betriebsdauer bezieht sich im Allgemeinen nicht auf ein einzelnes Objekt, sondern auf eine große Anzahl von Objekten, von denen jedoch nur sehr wenige fehlerhaft werden. Für einfache Bauteile (z. B. Widerstände, Kondensatoren), die als Massenprodukte produziert werden, ist es dann durchaus realistisch, 10 000 Stück über 10 000 Stunden zu beobachten. Die gesamte Betriebsdauer für diese Menge gleicher Objekte ist damit 10^8 kumulative Betriebsstunden. Wenn wir während dieser Zeit innerhalb dieser Menge einen Fehler beobachten, dann erhalten wir eine Fehlerrate von 10 FIT, also einen gut handhabbaren Zahlenwert.

Wir werden später sehen, dass bei umfangreichen Systemen, die aus vielen Einzelkomponenten bestehen, selbst kleine FIT-Werte der Einzel-Komponenten in Summe zu Fehleraten führen, die Fehler im Abstand von durchaus übersichtlichen Zeiträumen wie Tagen oder Wochen erwarten lassen. Wir werden deshalb weitgehend die Einheit FIT verwenden. Die Berechnungen können jedoch mit jeder anderen Einheit, die Fehler pro Zeiteinheit beschreibt, ohne Einschränkung ebenso vorgenommen werden.

2.2.2 Fehlerrate, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Systemen

Ein zentrales Ziel dieses Buches ist es zu beschreiben, wie Systeme, die aus mehreren oder vielen Komponenten bestehen, langfristig in einem vorgegebenen Rahmen funktionsfähig erhalten werden können. Da Fehler grundsätzlich nicht zu vermeiden sind, müssen wir also eine Strategie entwickeln, wie mit diesen Fehlern umzugehen ist.

³Die mathematischen Modelle, mit deren Hilfe frühe Fehler und Verschleißfehler in analoger Weise wie zufällige Fehler berechnet werden können, haben wir kurz in Abschn. 10.5 im Anhang zusammengestellt. Wir werden in diesem Buch jedoch nicht ausführlich darauf eingehen.

Frühe Fehler und Verschleißfehler können wir begrenzen, indem wir sie entweder systematisch finden (frühe Fehler) oder ebenso systematisch vermeiden (Verschleißfehler). Die zufälligen Fehler jedoch können wir ausschließlich durch statistische Methoden erfassen und auch nur auf Grund von statistischen Berechnungen Vorbereitungen treffen, um auf das Auftreten eines zufälligen Fehlers angemessen reagieren zu können.

Die unvermeidlichen zufälligen Fehler sind also im Dauerbetrieb eines Systems entscheidend für die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Systems. Je länger ein System ohne jeden Eingriff fehlerfrei funktioniert, desto zuverlässiger ist es. Je kürzer die Ausfallzeit des Systems durch auftretende zufällige Fehler im Vergleich zur gesamten Betriebsdauer ist, desto größer ist seine Verfügbarkeit.

Die Fehlerraten der in einem System verbauten Komponenten und damit die Fehlerrate des gesamten Systems sind die wichtigsten Grundlagen für die Planung und Vorbereitung von Wartungsmaßnahmen, die den Betrieb möglichst reibungsfrei aufrecht erhalten. Auf der Basis der Fehlerraten können wir im Rahmen der statistischen Genauigkeit vorher sagen, wie viele Fehler von welcher Art zu erwarten sind und wie viele Ersatzteile wir für die entsprechenden Reparatur-Maßnahmen vorrätig haben sollten. Wir können außerdem sehr gut abschätzen, wie viel Zeit im Durchschnitt vergeht, ehe das System wieder fehlerfrei funktioniert.

Ehe wir uns also mit der Anwendung der Fehlerraten für Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeits-Berechnungen beschäftigen, müssen wir zunächst sehr genau betrachten, wie wir Fehlerraten zuverlässig bestimmen können.

2.3 Messen von Fehlerraten

Die Fehlerrate λ von zufälligen Fehlern⁴ ist, wie wir bereits festgestellt haben, grundsätzlich über die gesamte Betriebsdauer gleich. Die Fehlerrate selbst ist der Anteil von Objekten aus einer Gesamtmenge, die innerhalb eines definierten Zeitraums fehlerhaft wird. Wenn wir also eine gleich große Menge von Objekten über einen immer gleich langen Zeitraum beobachten, dann können wir immer die zumindest ungefähr gleiche Zahl von fehlerhaften Objekten erwarten.

Die einfachste Methode, eine Fehlerrate zu bestimmen, ist es also, eine hinreichend große Menge von Objekten über einen hinreichend langen Zeitraum zu beobachten und die Anzahl der Fehler festzustellen, die innerhalb dieses Zeitraums auftreten. Zusätzlich erhalten wir dabei noch die Information über die tatsächliche Lebensdauer der fehlerhaft gewordenen Objekte.

Die wichtigste Randbedingung für eine solche Beobachtung ist, dass die Objekte unter genau den Bedingungen betrieben werden, die für ihren regelmäßigen Einsatz definiert sind. Fehlerraten gelten für im Allgemeinen nur für die Bedingungen, unter denen sie

⁴ Sofern nicht etwas anderes angegeben ist, werden wir ab hier ausschließlich zufällige Fehler betrachten, ohne das jeweils ausdrücklich zu erwähnen.

gemessen werden. Werden Objekte unter anderen Bedingungen betrieben, dann ist damit zu rechnen, dass die bestimmten Fehlerraten mehr oder weniger deutlich abweichen.

Wenn wir die hier beschriebene Grundsituation für eine Messung von Fehlerraten mathematisch formulieren, dann können wir den Zusammenhang zwischen der Anzahl der Fehler, der Zeit und der Anzahl beobachteter Objekte so schreiben:

$$\frac{c}{\Delta t} = \lambda \cdot n \quad (2.1)$$

In dieser Gleichung ist c die Anzahl der im Zeitraum Δt fehlerhaft gewordenen Objekte, n die insgesamt beobachtete Zahl von Objekten (die Grundgesamtheit) und λ die Fehler-rate. Die Fehlerrate ist also ein Proportionalitätsfaktor, der den Zusammenhang zwischen der Grundgesamtheit und der Anzahl der Fehler pro Zeiteinheit beschreibt.

Um die Fehlerrate konkret zu bestimmen, können wir entweder ein eigenes Experiment durchführen, in dem wir Objekte ausschließlich zu diesem Zweck betreiben. Wir können aber auch Daten sammeln, die während des normalen Betriebs der Objekte ohnehin anfallen. Der zweite Weg ist im Normalfall der wirtschaftlich günstigere. Er birgt jedoch die Gefahr, dass Daten nicht vollständig oder nicht korrekt erfasst werden. Grundsätzlich sind jedoch beide Ansätze gleichwertig und unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Organisation des Vorgehens. Wir werden das Sammeln der Daten allgemein als „Experiment“ bezeichnen, unabhängig von der konkreten Vorgehensweise.

Das Basis-Experiment

In unserem einfachen Basis-Experiment nehmen wir an, dass wir eine Grundgesamtheit n von Objekten über einen definierten Zeitraum τ beobachten. Wir stellen dabei für jedes fehlerhafte Objekt den genauen Zeitpunkt t_i fest, an dem dieses Objekt fehlerhaft geworden ist. Nach Ablauf des Zeitraums τ beenden wir das Experiment, unabhängig von der Anzahl c der bis dahin aufgetretenen Fehler.

In diesem Experiment können wir zwei Fälle unterscheiden. Im ersten Fall ersetzen wir jedes fehlerhafte Objekt unmittelbar durch ein fehlerfreies. Wir haben also zu jedem Zeitpunkt tatsächlich n fehlerfreie Objekte (die kurze, für den Austausch benötigte Zeit wollen wir vernachlässigen). Im zweiten Fall ersetzen wir fehlerhafte Objekte nicht; nach Ende des Experiments verfügen wir also noch über $n - c$ fehlerfreie Objekte.

In einer ersten Variante gehen wir zunächst davon aus, dass im Experiment alle fehlerhaften Objekte unmittelbar ersetzt werden. Diese Annahme ist insofern auch realistisch, weil genau das in der Regel in einem realen System auch geschehen wird, um das System als Ganzes funktionsfähig zu erhalten. Da das Auftreten der Fehler rein zufällig ist, ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers für jedes einzelne Objekts zu jedem Zeitpunkt gleich. Diese Wahrscheinlichkeit ist insbesondere auch unabhängig vom Alter bzw. der bereits erreichten Betriebsdauer des Objekts. Die Wahrscheinlichkeit ist somit insbesondere auch für die neu hinzugefügten Objekte gleich groß wie für die Objekte mit der bis zu diesem Zeitpunkt längsten Betriebsdauer. Es ist also in jedem Fall die Anzahl der Fehler, die innerhalb einer bestimmten Zeitspanne auftreten, proportional zur Anzahl der vorhandenen Komponenten.

In Anlehnung an Gl. 2.1 können wir für die Anzahl c der in einem Zeitraum τ als fehlerhaft beobachteten Objekte schreiben

$$c = \hat{\lambda} \cdot n \cdot \tau \quad (2.2)$$

wobei $\hat{\lambda}$ für den Schätzwert der Fehlerrate steht, den wir im Laufe unseres Verfahrens möglichst genau an die tatsächliche Fehlerrate λ annähern wollen.⁵ Der aus dem Experiment der Dauer τ gewonnene Schätzwert der Fehlerrate ergibt sich also zu

$$\hat{\lambda} = \frac{c}{\tau \cdot n} \quad (2.3)$$

Die Gleichung 2.3 können wir auch einfach so interpretieren, dass die Fehlerrate der Quotient aus der Anzahl der beobachteten Fehler und der kumulativen Betriebsdauer $\tau \cdot n$ aller am Experiment beteiligten Objekte ist.

In der zweiten Variante unseres Experiments ersetzen wir die fehlerhaften Objekte nicht. Um in diesem Fall die (kumulative) Betriebsdauer zu bestimmen, müssen wir berücksichtigen, dass die nicht ersetzten fehlerhaften Objekte tatsächlich nur bis zum Zeitpunkt ihres Ausfalls zur Betriebsdauer beitragen. Wir benötigen daher die tatsächliche Lebensdauer t_i jedes einzelnen fehlerhaften Objekts, also die Zeit, die vom Start des Experiments bis zu seinem Ausfall verstreicht. Zur Summe aller t_i addieren wir die Betriebsdauern der Objekte, die bis zum Ende des Experiments fehlerfrei geblieben sind. Damit können wir

$$\hat{\lambda} = \frac{c}{\sum_{i=1}^c t_i + (n - c) \cdot \tau} \quad (2.4)$$

als Näherung für $\hat{\lambda}$ verwenden, wobei c die Anzahl der beobachteten Fehler ist, t_i die beobachtete tatsächliche Lebensdauer des fehlerhaften i -ten Objekts und τ die gesamte Dauer unseres Experiments.

Das reale Experiment

Wir haben bereits im vorangegangenen Abschnitt festgestellt, dass wir für die Bestimmung der Fehlerrate grundsätzlich von einer Stichprobe ausgehen müssen. Für das Ergebnis ist daher mit einer nicht unwesentlichen Unsicherheit zu rechnen (siehe Fußnote 5). Mit der Beschreibung eines „realen“ Experiments wollen wir in diesem Abschnitt zeigen, wie wir

⁵Zwischenbemerkung: Ziel dieses Abschnitts ist es zu zeigen, unter welchen Bedingungen wir im Experiment Daten für die Fehlerrate sammeln können. Wir sollten uns jedoch bereits jetzt bewusst machen, dass es sich bei einem solchen Vorgehen lediglich um eine Stichprobe handelt. Die Ergebnisse von Stichproben liefern im Allgemeinen zwar einen Wert „in der Nähe“ des wahren Wertes, weichen aber üblicherweise von diesem wahren Wert mehr oder weniger stark ab. Wie wir mit dieser Tatsache umzugehen haben, werden wir später in den Kap. 4 „Erwartungswerte für das Auftreten von Fehlern“ und 9 „Vertrauensbereich für Fehlerraten“ genauer betrachten. Deswegen führen wir hier bereits den Begriff „Schätzwert“ für das Ergebnis der in einem einzigen Experiment bestimmten Fehlerrate λ ein. Diesen Schätzwert bezeichnen wir mit $\hat{\lambda}$.

zuverlässige Werte für eine Fehlerrate unter Bedingungen, wie sie gerade in der Phase der Markteinführung eines neuen Produktes typisch sind, erhalten können.

Das Grundproblem besteht darin, dass wir einem Kunden oder Anwender auch für ein neues Produkt zum Lieferzeitpunkt einen realistischen Wert für die Fehlerrate angeben müssen. Häufig handelt es sich bei einem solchen Produkt um ein einerseits sehr langlebige und andererseits auch selten fehlerhaftes Objekt, das zudem möglicherweise auch nur in vergleichsweise kleinen Stückzahlen produziert wird. Wir müssen also in einer frühen Phase der Vermarktung zwangsläufig mit kleinen Werten für eine kumulierte Betriebsdauer und mit einer geringen Zahl beobachteter Fehler auskommen.

In einer solchen Situation ist natürlich die Gefahr groß, dass der zunächst durch ein einfaches Experiment gewonnene Schätzwert $\hat{\lambda}$ zufällig deutlich zu hoch oder deutlich zu niedrig ist. Beides kann für den Einsatz und die Vermarktung des Objektes zu erheblichen Nachteilen führen. Ist der Wert zu hoch, dann stellt er möglicherweise einen Wettbewerbsnachteil dar. Ist der Wert zu niedrig, dann wird die Anzahl der Reklamationen höher sein als kalkuliert, und damit auch die Kosten für diese Reklamationen.

Also brauchen wir eine Lösung, mit der wir frühzeitig vertretbare Werte für die Fehlerrate erhalten können, aber längerfristig die Risiken durch die unvermeidliche Ungenauigkeit minimieren. Das einfachste Verfahren dafür ist, dass wir uns schrittweise der tatsächlichen Fehlerrate annähern.⁶ Den ersten Schätzwert $\hat{\lambda}$ für die Fehlerrate können wir in diesem Fall zum Beispiel durch Labor-Versuche im Rahmen von Tests gewinnen. Danach können wir sowohl weitere eigene Tests durchführen, als auch Daten sammeln, die im realen Einsatz des Objektes anfallen.

Der wesentliche Punkt dieses Verfahren ist, dass wir die schrittweise gesammelten Daten in eine einzige Berechnung einbeziehen. Wir addieren also alle aufgetretenen Fehler und alle individuellen Betriebsdauern zu einer einzigen Fehlerzahl und einer einzigen kumulativen Betriebsdauer. Mit anderen Worten „verlängern“ wir das Basis-Experiment, indem wir mehrere unabhängige Stichproben vornehmen und gemeinsam auswerten.⁷

Grundlage dieser Vorgehensweise ist zunächst das einfache Sammeln von Daten. Diese Daten enthalten Informationen aus verschiedenen Quellen über die Anzahl n_i von Objekten, den zugehörigen Beobachtungszeitraum τ_i und die Anzahl c_i der innerhalb dieses Beobachtungszeitraums aufgetretenen Fehler. Aus jedem einzelnen dieser „Daten-Tupel“ können wir mit Hilfe der beschriebenen Methoden ein $\hat{\lambda}_i$ berechnen, indem wir einfach die Anzahl der Fehler durch die kumulierte Betriebsdauer dieser Objekte dividieren:

$$\hat{\lambda}_i = \frac{c_i}{\tau_i \cdot n_i} \quad (2.5)$$

⁶Ein mit Hilfe der Vertrauenswahrscheinlichkeit verbessertes Verfahren ist in Kap. 9 beschrieben.

⁷Ein „klassischer Fehler“ bei diesem Verfahren ist es, dass bevorzugt „besonders gute Daten“ für die Berechnung gesammelt werden. Wir müssen sicher stellen, dass die gesammelten Daten tatsächlich zufällig entstanden sind und möglichst auch alle Varianten des praktischen Einsatz unseres Objektes angemessen repräsentieren.

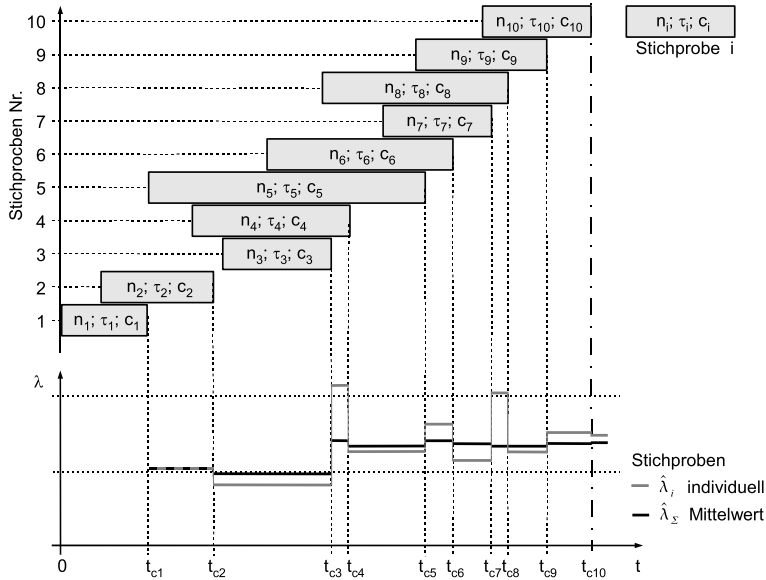


Abb. 2.2 Reales Experiment – Ausweitung des Basis-Experiments

In Abb. 2.2 sind die Ergebnisse für unsere Berechnung auf der Basis realer Daten dargestellt. Im oberen Bereich sehen wir die Zeiträume, über die wir Daten gesammelt haben. Im unteren Bereich sehen wir die Ergebnisse, die wir erhalten, wenn wir jeweils nach Ende einer solchen Periode der Datensammlung neue Werte für die Fehlerraten berechnen.

Der individuell für das jeweils i -te Daten-Tupel berechnete Wert $\hat{\lambda}_i$ schwankt offensichtlich erheblich, obwohl wir in jedem Fall Daten verwendet haben, die sich auf den gleichen Typ von Objekten beziehen, die auch unter gleichen Bedingungen betrieben wurden. Wenn wir also den Fehler begehen würden, immer nur die Fehlerraten zu verwenden, die sich aus den neuesten verfügbaren Daten ergeben, so wäre zum Beispiel die aus der Stichprobe Nummer 3 gewonnene Fehlerrate mehr als doppelt so hoch wie die Fehlerrate aus Stichprobe Nummer 2. Als Konsequenz würden wir in den Zeiträumen zwischen t_{c3} und t_{c4} einerseits und zwischen t_{c2} und t_{c3} mit völlig unterschiedlichen Werten für λ agieren.

Diesen „Fehler“ wollen wir jetzt korrigieren. Ein grundlegendes Prinzip der Statistik ist es, dass ein in einer Stichprobe erhaltenes Ergebnis umso weniger vom tatsächlichen Wert abweicht, je größer die Stichprobe im Vergleich zur Grundgesamtheit ist. Die „Grundgesamtheit“ ist in unserem Fall die Menge aller Objekte vom gleichen Typ, die in der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft im Einsatz waren, sind beziehungsweise noch sein werden.

Die Art und Weise, wie wir die genannten Daten sammeln, ist willkürlich. Wir wählen für jede unserer Stichprobe irgendeine Menge von Objekten aus, die für eine willkürlich gewählte Zeit beobachtet werden. Im Normalfall wird diese Auswahl aus praktischen Gründen geschehen, indem wir zum Beispiel unsere Kunden um Daten über ihre Beob-

achtungen der letzten Zeit bitten. Wir könnten aber genau so gut größere Stichproben definieren, für die wir die Daten mehrere Quellen zusammen fassen, um einen besseren Querschnitt zu bekommen. Das für einen bestimmten Zeitpunkt bestmögliche Ergebnis erhalten wir, wenn wir alle bis zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Daten in einer einzigen Auswertung zusammenfassen. Wenn zu diesem Zeitpunkt ν Daten-Tupel verfügbar sind, dann erhalten wir einen verbesserten Schätzwert $\hat{\lambda}_{\Sigma}(\nu)$ als

$$\hat{\lambda}_{\Sigma}(\nu) = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} c_i}{\sum_{i=1}^{\nu} (\tau_i \cdot n_i)} \quad (2.6)$$

Im unteren Teil von Abb. 2.2 ist dieser Wert für $\hat{\lambda}_{\Sigma}$ nach Abschluss jeder einzelnen Stichprobe neu berechnet und eingezeichnet. Obwohl die einzelnen Daten-Tupel erhebliche Schwankungen für die individuellen Werte $\hat{\lambda}_i$ liefern, sehen wir, dass bereits nach wenigen Schritten der Mittelwert $\hat{\lambda}_{\Sigma}$ einen vergleichsweise stabilen Wert annimmt. Statistische „Ausreißer“ in den einzelnen Daten-Tupeln haben kaum noch einen Einfluss. Wir können also davon ausgehen, dass dieser stabile Mittelwert am rechten Ende der Darstellung sehr nahe am wirklichen Wert für die Fehlerrate λ liegt.

Den wirklichen Wert für die Fehlerrate λ können wir dann bestimmen, wenn wir die Daten aller jemals eingesetzten Objekte verwenden. Das setzt jedoch voraus, dass alle „Experimente“ abgeschlossen sind. Diese Bedingung ist nur dann erfüllt, wenn keines der Objekte mehr in Betrieb ist und somit auch keines mehr fehlerhaft werden kann. Es ist offensichtlich, dass eine auf diese Weise bestimmte Fehlerrate λ zwar exakt ist, aber keinen praktischen Nutzen mehr hat, da sie nur für nicht mehr verwendete Objekte gilt. Eine Näherung für den wirklichen Wert von λ können wir jedoch quasi-mathematisch als Grenzwert für die Auswertung von beliebig vielen Daten-Tupeln darstellen:

$$\lambda = \lim_{\nu \rightarrow \infty} \hat{\lambda}(\nu) \quad (2.7)$$

Dabei ist die Verwendung von „ ∞ “ im eigentlichen Sinne mathematisch nicht korrekt, da es sich immer um endliche (wenn auch möglicherweise sehr große) Zahl von Objekte und Stichproben handeln wird. ∞ ist hier so zu verstehen, dass der Umfang aller Stichproben sich der Grundgesamtheit annähert.

Das gleiche Verfahren können wir auch anwenden für den zweiten Fall, bei dem wir die fehlerhaften Komponenten nicht ersetzen. Die Summe aller Fehler und aller Betriebszeiten ergeben in diesem Fall

$$\hat{\lambda}(\nu) = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} c_i}{\sum_{i=1}^{\nu} [\sum_{j=1}^{v_i} \tau_j + \tau_i \cdot (n_i - c_i)]} \quad (2.8)$$

Das tatsächliche λ erhalten wir auch hier durch den Grenzübergang $\nu \rightarrow \infty$.

Wir müssen uns hier noch einmal bewusst machen, dass die Fehlerrate λ für jedes einzelne Objekt die Basis für alle folgenden Berechnungen der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bildet. Eine möglichst sorgfältige Bestimmung von λ ist somit unabdingbar. Ein einfaches Beispiel für die aus der Ungenauigkeit von gemessenen Fehlerraten folgende

Ungenauigkeit der Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ (siehe Kap. 3) haben wir im Anhang gerechnet (Abschn. 10.1).

2.4 Abhängigkeit der Fehlerrate von Betriebsbedingungen

Bereits im Abschn. 2.1 hatten wir festgestellt, dass wir einen Fehler allgemein als Abweichung von den für ein Objekt spezifizierten Eigenschaften definieren. Wir hatten auch bereits darauf hingewiesen, dass die zulässigen Betriebsbedingungen für das Objekt Bestandteil dieser Spezifikation sind. Das bedeutet, dass wir Fehlerraten nur dann messen können, wenn die beobachteten Objekte tatsächlich und ausschließlich unter diesen Bedingungen betrieben werden.

In der Realität dürfen wir jedoch nicht übersehen, dass auch diese zulässigen Betriebsbedingungen häufig einen sehr weiten Bereich umfassen. Innerhalb dieses Bereichs kann ein Objekt sehr unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt sein, die die Fehlerrate in wesentlichem Umfang beeinflussen. Es ist insbesondere nicht zu erwarten, dass sich die Fehlerrate sprunghaft ändert, sobald ein oder mehrere Parameter den zulässigen Bereich über- oder unterschreiten. Vielmehr wird sich im Allgemeinen die Fehlerrate kontinuierlich mit einem beeinflussenden Parameter ändern.

Um diesem Verhalten Rechnung zu tragen, muss in solchen Fällen die Fehlerrate auch innerhalb des Bereichs der normalen Betriebsbedingungen in Abhängigkeit von den Größen bestimmt werden, die diesen Einfluss ausüben. Bei elektrischen Bauteilen können das beispielsweise die umgesetzte elektrische Leistung P und/oder die Temperatur T und/oder eine auf andere Weise definierte Belastung (Stress) S sein. Diese Liste ist jedoch keineswegs vollständig und kann je nach Art und Funktion der betrachteten Komponente fast beliebige Parameter umfassen. Wenn wir diese Parameter berücksichtigen, erhalten wir die Fehlerrate als Funktion einer oder mehrerer dieser Größen zum Beispiel als

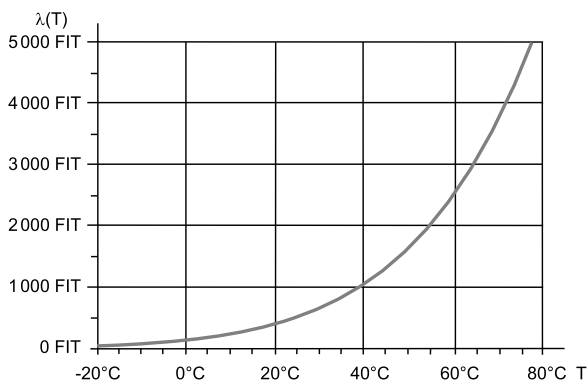
$$\lambda = \lambda(T, P, S) \quad (2.9)$$

In der Realität sind es meistens nur eine oder zwei Größen, die den wesentlichen Einfluss ausübt und deren Berücksichtigung deshalb hinreichend ist. Als Ergebnis unserer Messungen von λ erhalten wir auf diese Weise also keinen festen Wert, sondern eine Kennlinie, die λ in Abhängigkeit von mindestens einem Parameter beschreibt. Abbildung 2.3 zeigt ein Beispiel für die Abhängigkeit der Fehlerrate einer typischen Laser-Diode von der Betriebstemperatur.

Für den Fall, dass ein Objekt unter konstanten Bedingungen betrieben wird, können wir also den gültigen Wert für λ aus einer solchen Kennlinie ablesen und unser Problem damit lösen. Falls das Objekt jedoch unter variablen Bedingungen betrieben wird, müssen wir versuchen, den zeitlichen Verlauf dieser Bedingungen zu modellieren und daraus zum Beispiel einen Mittelwert für λ zu berechnen, der im längerfristigen Betrieb des Objekts zu erwarten ist.

Temperaturabhängigkeit wird in den meisten Fällen als Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur definiert. Den Hintergrund dafür bilden in der Regel die Umweltbedin-

Abb. 2.3 Fehlerrate λ einer Laser-Diode in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur T



gungen, also zum Beispiel der Betrieb in verschiedenen Klimazonen oder die regelmäßig in einem Raum durch Abwärme des betriebenen Systems zu erwartende Temperatur. Da im Allgemeinen während des Betriebs ein Temperatúrausgleich mit der Umgebung stattfindet, stellt sich innerhalb des betrachteten Objekts eine Gleichgewichtstemperatur ein, die ausschließlich von der (leichter zu messenden) Umgebungstemperatur abhängt. Es ist also meist nicht erforderlich, die für die Fehlerrate eigentlich ursächliche tatsächliche innere Temperatur des Objekts zu bestimmen.

In einigen Fällen ist es jedoch der variable Betrieb eines Objekts selbst, der die Temperaturschwankungen auslöst. Dabei ist dann die innere Temperatur des Objekts größeren Schwankungen unterworfen, da insbesondere bei schnellen Änderungen des Betriebszustands ein Temperatur-Ausgleich mit der Umgebung nicht oder nur sehr eingeschränkt stattfindet. Es ist hier also sinnvoll, den zeitlichen Verlauf der aus dem Verlauf der Temperatur folgenden Fehlerrate zu berücksichtigen und daraus einen Mittelwert zu bilden.

Einen anderen Fall berechnen wir als Beispiel im Anhang (Abschn. 10.2.1). Bei einem gängigen Dioden-Laser ist die innere Temperatur in nicht-linearer Weise abhängig von der aufgenommenen elektrischen Leistung. Die eigentliche Nutz-Leistung des Lasers ist jedoch die optische Leistung, also die Menge des ausgesandten Lichts. Wir werden einen Weg herleiten, wie wir die Fehlerrate in Abhängigkeit von der optischen Leistung berechnen können.

2.5 Internationale Standards für Fehlerraten

Bisher haben wir Fehlerraten unserer Objekte auf eine sehr empirische Weise hergeleitet. Mit dieser Methode erhalten wir ebenso korrekte wie nachvollziehbare Ergebnisse. Wir haben jedoch nicht näher spezifiziert, wie genau die Methode aussehen soll, sondern nur allgemein „normale Betriebsbedingungen“ vorausgesetzt. Bereits im Abschn. 2.4 haben wir gesehen, dass innerhalb der zulässigen Betriebsbedingungen durchaus mit nicht unerheblichen Schwankungen der Fehlerrate zu rechnen ist. Wir können zwar die Bedingungen, unter denen wir die Fehlerrate bestimmt haben, genau beschreiben. Es bleibt aber das Problem, dass unsere Werte möglicherweise nicht mit den Werten von ähnlichen Produkten

vergleichbar sind. Da wir jedoch im Allgemeinen in einem Markt agieren, ist es nützlich, dafür zu sorgen, dass die Kennzahlen gleichartiger Produkte tatsächlich vergleichbar sind.

Dieses Problem wird durch die Anwendung von Standards gelöst, die sowohl die Methoden als auch die Auswertung der Ergebnisse definieren. Die Anwendung standardisierter Methoden wird nicht nur in vielen Fällen von Kunden gefordert, sie bringt auch Vorteile für den Hersteller eines Produktes. Einerseits müssen keine eigenen Größen und Methoden aufwändig definiert und auf ihre tatsächliche Aussagekraft hin überprüft werden, andererseits ist es auch von Vorteil, die Kennzahlen der eigenen Produkte auf diese Weise mit denen der Wettbewerber vergleichen zu können.

Es gibt eine ganze Reihe von Standards, die für verschiedene Zwecke und von verschiedenen Institutionen oder Firmen definiert wurden. Neben der Aussage über eine tatsächliche Fehlerrate ist es deshalb meist wichtig zu wissen, nach welchem Standard (oder sonstigen Verfahren) dieser Wert gemessen wurde.

Wenn wir selbst eine Fehlerrate bestimmen wollen, dann ist es von Vorteil, wenn wir uns an einem bekannten Standard orientieren, falls nicht ohnehin gefordert ist, nach einem vorgegebenen Standard zu arbeiten. Es wird in den wenigsten Fällen so sein, dass ein einziger der verfügbaren Standards für jedes unserer Probleme die optimale Methode bietet. Wir müssen also möglicherweise zunächst den am besten geeigneten Standard auswählen und gegebenenfalls die Untermenge bestimmen, die für unser Produkt sinnvoll und notwendig ist. Wir müssen vielleicht auch kritisch hinterfragen, ob tatsächlich alle Details eines geforderten Standards erfüllt werden müssen, um die tatsächlich notwendige Qualität unseres Produktes sicher zu stellen. Auch wenn es grundsätzlich technisch möglich sein sollte, alle Anforderungen zu erfüllen, so können gerade die im Vergleich zum tatsächlichen Einsatzfall eines Produktes zu hoch gegriffenen Anforderungen sehr hohe Kosten verursachen, ohne einen angemessenen Nutzen zu erzeugen.

Über die Definition von Methoden hinaus liefern Standards auch für viele einfache und grundlegende Bauteile, wie sie vor allem in der Elektrotechnik eingesetzt werden, bereits gute Werte für Fehlerraten. Dabei werden auch die wichtigsten Einflüsse der Betriebsbedingungen berücksichtigt, so dass wir in vielen Fällen auf eine eigene Messung der Fehlerraten von Standard-Bauteilen (z. B. Widerstände, Kondensatoren, Dioden, Transistoren) verzichten können. Derartige Standard-Fehlerraten werden wir auch im bereits erwähnten Beispiel für die Berechnung der Fehlerrate einer Laser-Diode im Anhang nutzen (siehe Abschn. 10.2.1).

Im Rahmen dieses Buches können wir nur einen kurzen Einblick in die grundsätzlichen Möglichkeiten gewinnen, die Standards bieten. In der Praxis wird man im Allgemeinen nicht umhin können, die geforderten oder geeigneten Standards im Detail zu studieren.

2.5.1 Quellen für Standards

Standards, so wie wir sie hier verstehen wollen, werden von verschiedenen Institutionen definiert. Wir wollen hier nur sehr kurz einige relevante Standards erwähnen und einige typische Leistungen betrachten, ohne um Vollständigkeit bemüht zu sein. Die Standards

selbst sind im Allgemeinen öffentlich zugänglich und normalerweise problemlos im Internet zu finden, wenn auch in der Regel nicht kostenfrei.

Konkret haben wir in diesem Buch die Erfahrungen verarbeitet, die wir unter anderem mit Standards gesammelt haben, die im Bereich Elektronik und Elektrotechnik eine mehr oder weniger große Rolle spielen. In diesem Bereich arbeitet beispielsweise die „International Electrotechnical Commission“, kurz IEC, als ein Normierungsgremium. Aus dieser Quelle stammt der weit verbreitete Standard IEC 61 709, der sich mit Fehlerraten und Zuverlässigkeit von elektronischen Bauteilen beschäftigt. Ein sehr umfassender Standard ist MIL-HDBK-217, der aus dem amerikanischen Militärbereich kommt. MIL-HDBK-217 bietet verschiedene Alternativen sowohl für die Erfassung der Fehlerrate selbst als auch für ihre Abhängigkeit von Umweltbedingungen und tatsächlicher Belastung von Objekten an. Aktuell wird die Erfüllung des MIL-HDBK-217 nach wie vor gelegentlich gefordert. Allerdings wurde die Pflege dieses Standards offensichtlich zwischenzeitlich eingestellt; somit könnte dieser Standard möglicherweise in einiger Zeit obsolet werden.

Häufig entwickeln sich auch ursprünglich firmeninterne Vorgehensweisen zu einem „Pseudo-Standard“, der innerhalb einer Branche allgemein verwendet wird oder zumindest weit verbreitet ist. Solche „Pseudo-Standards“ basieren meist auf den Standards offizieller Gremien, sind jedoch für spezielle Anforderungen genauer definiert oder optimiert. So sind zum Beispiel im Bereich der Telekommunikation die Standards Telcordia SR-332 der US-amerikanischen Firma Telcordia und SN 29 500 der Siemens AG weit über die Ursprungs-Firmen hinaus bekannt und werden zumindest von institutionalisierten Kunden als Grundlage weltweit anerkannt.

2.5.2 Leistung der Standards

Standards bieten im Allgemeinen die Festlegung von Größen und die Methoden zu ihrer Bestimmung und Interpretation an. Je nach ursprünglichem Einsatzgebiet kann das mehr oder weniger detailliert, mehr oder weniger umfassend, mehr oder weniger zwingend sein. Standards geben nicht notwendigerweise Antwort auf genau die gleichen Fragen, und auch die Antworten auf gleiche Fragen sind nicht notwendigerweise gleich. Das ist nicht unbedingt ein Nachteil. Einerseits erhalten wir durch weniger detaillierte und zwingende Vorgaben mehr Freiheit zur Anpassung an unsere konkrete Problemstellung. Andererseits entsteht dadurch auch eine Vielfalt, die uns die Auswahl der jeweils für unser Problem günstigsten Vorgabe erlaubt.

In den folgenden Abschnitten werden wir auf einige für uns relevante und typische Inhalte von Standards näher eingehen, jedoch ohne sie ausdrücklich bestimmten Standards zuzuordnen.

Größen und Methoden

Die wesentliche Größe der nachfolgenden Berechnungen für Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit ist die Fehlerrate λ . Wir verwenden in diesem Buch in den meisten Fällen die Einheit FIT, die 1 Fehler pro 10^9 Betriebsstunden entspricht. Das ist für unsere Zwecke

eine recht handliche Einheit, aber natürlich ist sie nicht zwingend. Üblich ist es zum Beispiel auch, die Fehlerrate pro 1 Million Betriebsstunden anzugeben. Im Allgemeinen wird die Einheit der Fehlerrate von der Größenordnung dieser Fehlerrate abhängen. Für die erwähnten Standard-Bauteile (Widerstände, etc.) sind typische Fehlerraten häufig kleiner als 1 FIT. Wenn wir aber beispielsweise bei einer herkömmlichen Glühlampe erwarten müssen, dass nach 20 000 Stunden etwa 50 % der Lampen fehlerhaft sind, dann entspricht das einer Fehlerrate von etwa $3,5 \cdot 10^{-5}$ pro Stunde. Wir würden also hier vielleicht eher eine Einheit wählen, die einem Fehler in 100 000 Stunden entspricht.

Die Methode, die wir für die Messung von Fehlerraten beschrieben haben, wird als Bauteilzähltechnik („Parts Count Prediction“) bezeichnet. Sie ist weit verbreitet und für viele Einsatzfälle sehr gut geeignet. Doch auch sie ist nicht die einzige. Unsere Voraussetzung ist, dass alle Komponenten unter „definierten Bedingungen“ betrieben werden, für die sie ausgelegt sind. In vielen Fällen sind diese Bedingungen hinreichend eng definiert und die Komponenten entsprechend robust, so dass Variationen der Betriebsbedingungen nur einen geringen Einfluss haben. Dann ist diese Methode einfach und sicher einzusetzen.

Wenn wir eine bestimmte Qualität garantieren müssen, dann können wir auch an Sicherheit gewinnen, wenn wir die Objekte unter einem gewissen Stress betreiben, also unsere Daten unter Bedingungen gewinnen, die nahe an den Grenzen der zulässigen Belastung liegen. Dieses Vorgehen hat jedoch den Nachteil, dass wir die Qualität unserer Objekte möglicherweise als zu gering angeben, wenn man sie im Vergleich zu „üblichen“ (eher mittleren) Belastung betrachtet. Das ist aus technischer Sicht zwar eher kein Problem, kann jedoch im Hinblick auf Kunden und den Wettbewerb mit anderen Anbietern nachteilig wirken.

Als Alternative zur Bauteilzähltechnik bietet sich die Bauteilbelastungstechnik („Parts Stress Prediction“) an, die die tatsächliche Belastung mit berücksichtigt und die Fehlerraten in Abhängigkeit von dieser Belastung bestimmt.

Umwelt- und Betriebsbedingungen

Wir nehmen hier allgemein an, dass die Objekte unter den für diese Objekte generell definierten Umwelt- und Betriebsbedingungen betrieben werden. Diese Vorgehensweise ist in Übereinstimmung mit gängigen Standards und liefert sehr brauchbare und nützliche Resultate. Trotzdem können, wie bereits erwähnt, verschiedene zugelassene Bedingungen zu unterschiedlichen Werten für die Fehlerrate führen.

Verschiedene Standards sehen vor, ganz bestimmte Umwelt- und Betriebsbedingungen ausdrücklich zu berücksichtigen und diese Bedingungen in die Fehlerraten einzurechnen bzw. dafür die Fehlerraten auszuweisen.

Fehlerraten für Standard-Bauteile

Einige Standards bieten bereits konkrete Werte für Fehlerraten von verbreiteten Bauteilen an. Dabei handelt es sich im Normalfall um gängige Komponenten von Produkten, die nach üblichen Verfahren als Massenprodukte hergestellt werden. Diese Bauteile sind selbst so standardisiert, dass sie sich sowohl im Herstellungsverfahren als auch in der Qualität

auch dann kaum unterscheiden, wenn sie von verschiedenen Herstellern stammen. Daher können Fehlerraten ebenfalls als Standard-Fehlerraten angenommen werden.

Darüber hinaus sehen einige Standards die Möglichkeit vor, konkrete Betriebs- und Umwelt-Bedingungen in die Fehlerraten in Form von Multiplikations-Faktoren einzurechnen. Sie gehen dabei von einer Referenz-Fehlerrate λ_{Ref} aus, die unter sehr genau definierten Bedingungen bestimmt wurde. Für Abweichungen von diesen Betriebs- und Umweltbedingungen werden zusätzliche Umrechnungsfaktoren angegeben, die dann die Berechnung einer Fehlerrate in Abhängigkeit von den diese Bedingungen beschreibenden Parametern ermöglichen. So könnten wir zum Beispiel eine Gesamt-Fehlerrate erhalten als

$$\lambda_{gesamt} = \lambda_{Ref} \cdot \pi_T \cdot \pi_P \cdot \pi_Q \cdot \pi_S \cdot \pi_E \quad (2.10)$$

bei der die Temperatur (mit dem Faktor π_T), die umgesetzte elektrische Leistung (π_P), ein spezifischer Qualitätsfaktor (π_Q), die Belastung (Stress, π_S) und ein allgemeiner Umweltfaktor (π_E) in die Berechnung eingehen. Einige dieser Faktoren werden wir in unserem Praxis-Beispiel zum Dioden-Laser verwenden (siehe Abschn. 10.2.1).

Die Faktoren π_x sind für viele Fälle in der entsprechenden Referenz-Literatur der Standards verfügbar. Faktoren, die im konkreten Fall nicht von Bedeutung sind, können gleich 1 gesetzt werden.

Damit schließen wir unseren kurzen Exkurs zu den Standards und auch das Kapitel zu Fehlerraten ab. Wenn wir im Weiteren uns mit der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Systemen beschäftigen, dann können wir die Fehlerrate λ als gegebene Größe betrachten, unabhängig von der Methode ihrer Bestimmung.

Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme

Eine Einführung in die Praxis

Eberlin, S.; Hock, B.

2014, XIII, 194 S. 69 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-03572-3