

auf den Pegel zu senken, der trotz Rauschen und anderen Störungen gerade noch eine sichere Übertragung gewährleistet.

3.2.3 Zuverlässigkeit Integrierter Schaltungen

Die Bedeutung der Zuverlässigkeit für die Elektronik ist im Überblick bereits dargestellt worden. Von der Mikroelektronik, die besonders in Luft- und Raumfahrt sowie in Systemen mit großer Schaltelementezahl ihre erste Anwendung findet, wird besonders hohe Lebensdauer gefordert, zumal die Ersatzkosten bei den irreparablen Integrierten Schaltungen höher sind.

Die Zuverlässigkeit beschreibt das Auftreten oder Nichtauftreten von Ausfällen (Totalausfälle, unzulässige Veränderungen) und wird in der Regel vom Begriff der Lebensdauer abgeleitet.

Die Lebensdauer t_e/h eines (irreparablen) Bauelementes ist meist als die Betriebszeit definiert, die im Mittel von Beanspruchungsbeginn bis zum Ausfall verstreicht (meantime to failure MTTF), also die Gesamtfunktionsdauer. Bei (reparablen) Anordnungen aus mehreren Bauelementen (Geräten aber auch Testsätzen, sog. „Losen“ von Bauelementen) wird darüberhinaus der Begriff der mittleren Funktionsdauer t_m/h zwischen aufeinanderfolgenden Ausfällen (meantime between failure MTBF) verwendet. Diese kann sich mit dem Alter (durch Abnutzung und Reparaturen geringerer Zuverlässigkeit) ändern und ist meist kleiner als die Funktionsdauer bis zum ersten Ausfall (MTTF). — Die Zahl der Ausfälle je Stunde Funktionsdauer wird als Ausfallrate λ/h^{-1} bezeichnet. Bei Bauelementen wird sie häufig sinnvoller aber weniger übersichtlich als Prozentsatz der Ausfälle eines Loses in 1 oder 1000 Funktionsstunden angegeben.

Funktionsdauer und Ausfallrate sind reziprok proportional.

Die Ausfallrate einer (reparablen) Anordnung (Funktionsblock, Baugruppe, Gerät, Anlage) aus i Elementen (Schaltelemente, Funktionsblöcke, Baugruppen, Geräte) ist gleich der Summe aller Ausfallraten λ_{e1} bis λ_{ei} unter der Annahme, daß jedes Element für die Funktion der Anordnung notwendig ist (nichtredundante Schaltung) und daß die Elemente hinsichtlich der Ausfallmechanismen voneinander unabhängig sind. (Keine Kettenreaktionen und Lawineneffekte durch die der Ausfall eines Elementes die Ausfälle anderer verursacht):

$$\lambda = \sum_{k=1}^i \lambda_{ek} \quad 3.2.3(1a)$$

Bei gleichgroßen Ausfallraten λ_e aller Elemente ist

$$\lambda(\lambda_e = \text{const}) = i\lambda_e \quad 3.2.3(1b)$$

Die zugehörige mittlere Funktionsdauer (MTBF) einer Anordnung aus i Elementen ist

$$t_m = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{i \sum_{k=1} \lambda_{ek}} \quad 3.2.3 (2a)$$

Bei gleichgroßen Ausfallraten λ_e , d. h. gleichgroßer mittlerer Funktionsdauer (MTBF) und gleichgroßer Lebensdauer t_e (MTTF) aller Elemente ist

$$t_m (\lambda_e = \text{const}) = \frac{1}{i \lambda_e} = \frac{t_e}{i} \quad 3.2.3 (2b)$$

Tabelle 3-1 gibt Anhaltswerte für λ_e einiger konventioneller, diskreter Schaltelemente.

Tabelle A 3-1. Erfahrungswerte für die Ausfallraten λ_e konventioneller, diskreter Schaltelemente bei Einsatz in klimatisierten, stationären Anlagen (in mobilen Stationen steigt λ_e bis auf das Hundertfache)

	λ_e
Transistoren	10^{-7}
Dioden	$2 \cdot 10^{-8}$
Schichtwiderstände	$3 \cdot 10^{-9}$
Folienkondensatoren	$4 \cdot 10^{-9}$
Lötkontakte	$2 \cdot 10^{-9}$
Thermokompressionskontakte	$5 \cdot 10^{-10}$

Die Unübersehbarkeit der ursprünglichen Bauelementeeigenschaften und die Unvorhersehbarkeit aller nachträglichen Einwirkungen machen eine exakte Voraussage der Lebensdauer eines Bauelementes unmöglich. Sein Schicksal ist ungewiß wie das eines Menschen. Die Lebensdauer kann nur mit den mathematischen Hilfsmitteln der Wahrscheinlichkeitsrechnung erfaßt und daher nur als statistischer Mittelwert angegeben werden. Solche Angaben können nur auf Grund einer großen Anzahl vorangegangener Einzelmessungen an gleichartigen Prüflingen, also auf Grund von Erfahrungswerten gemacht werden. Treffende Funktionsdauer vorhersagen sind schon bei lang erprobten Schaltelementen schwierig, wo also umfangreiche Erfahrungen vorliegen. Noch ungenauer müssen die Vorhersagen sein, die auf Grund der Extrapolation weniger oder nur kurzzeitig angestellter Messungen gemacht werden. Trotzdem kann auf solche Vorhersagen wegen der raschen Folge in der sich heute die neuen Entwicklungen ablösen nicht verzichtet werden. Würde man beispielsweise mit dem Einsatz von Germanium-Transistoren solange gewartet haben, bis eine genügende Anzahl von Schaltelementen eine 5- bis 10-jährige Lebensdauer bewiesen hätte, so wären sie erst in den 60er Jahren zum Einsatz gekommen, in denen der Silizium-Planartransistor, der in vieler Hinsicht vorteilhafter ist, bereits ins Fertigungsstadium eingetreten ist.

Es sind deshalb verschiedene Überlegungen angestellt worden, um die Prüfdauer abzukürzen und die Genauigkeit der Lebensdauervorhersagen zu verbessern. Die eine geht von der Annahme aus, daß sich im Betrieb unter erhöhten Beanspruchungen der zeitliche Verlauf des Betriebsverhaltens raffen läßt. Während dieser Weg bei mechanischen Komponenten, die einer stetigen Abnutzung unterliegen, zu treffenden Resultaten führt, liegen bei elektronischen Komponenten und Einrichtungen die Verhältnisse nicht so klar. Man ist sich darüber einig, daß durch die erhöhte Beanspruchung nicht nur die „Frühausfälle herausgeprüft werden“, sondern auch zuvor guten Elementen derart geschadet werden kann, daß ihre Zuverlässigkeit unter das gewünschte Maß fällt, ohne daß dies von außen zunächst erkennbar wäre.

Andere Vorhersagen stützen sich auf statistische Zusammenhänge zwischen Lebensdauer des Einzelelementes und Ausfallrate eines großen Loses. Nach ausfallfreier Betriebszeit von 1000 Transistoren über 1000 Stunden darf aber nur dann angenommen werden, daß die Lebensdauer (MTTF) des Individuums im Mittel mindestens $1000 \times 1000 = 1$ Mio Stunden beträgt, wenn es sich um stetige Ausfallvorgänge handelt und wenn die Ausfallrate zeitlich konstant ist. Dies trifft aber, wie eingangs angedeutet, normalerweise nicht zu, vielmehr steigt meist die Ausfallrate mit zunehmendem Alter. Man denke an die mittlere Sterberate von jungen Menschen, die so gering ist, daß (bei Betrachtung einer nicht zu kleinen Gruppe) ein großer Prozentsatz hunderte von Jahren überleben müßte, was einer biblischen mittleren Lebenserwartung (MTTF) entspräche. Erst die Kenntnis des Verlaufes der Sterberate setzt in die Lage, aus der augenblicklichen Sterberate auf die mittlere Lebensdauer zu schließen. Das erfordert aber, daß zunächst eine nicht zu kleine Gruppe von Individuen bis zum Lebensende beobachtet wurde. Vorher wären Lebensdauerprognosen nur Mutmaßungen und entsprechend unsicher. Nicht anders ist es bei den elektrischen Schaltelementen. Schließlich gehen Überlegungen davon aus, daß bei Kenntnis der Physik und Chemie der Ausfallursachen und der Ausfallmechanismen bessere Vorausagen und zugleich auch Empfehlungen für die Fertigung besserer Elemente gemacht werden könnten. Die auf diesem Gebiet betriebenen Forschungen haben sich in den meisten Fällen als äußerst schwierig erwiesen und noch nicht zu den gewünschten Ergebnissen geführt.

Unter diesen Vorbehalten müssen die Zuverlässigkeitsangaben, die heute über mikroelektronische Schaltungen bekannt sind, verstanden werden.

Immerhin lassen sich relative Aussagen durch Vergleich der physikalischen Struktur der neuen mit der erprobter Elemente machen. So sprechen die geringe Zahl der Lötstellen, die hohe Zuverlässigkeit der durch Aufdampfen und Eintempnern dünner Metallfilme hergestellten Verbindungen, die hohe Unempfindlichkeit gegen mechanische Einwirkungen als Folge der geringen Massen und der hohen Festigkeit der Komponenten, sowie die Verminderung der Manipulation durch den großen Anteil der automatischen kollektiven Fertigungsschritte am Gesamtprozeß für höhere Zuverlässigkeit der Inte-