

2	Die Zuverlässigkeit elektronischer Geräte	27
2.1	Allgemeine Einführung	27
2.2	Grundlagen	28
2.2.1	Begriff der Wahrscheinlichkeit	28
2.2.2	Begriff der Zuverlässigkeit	29
2.2.2.1	Zuverlässigkeitskenngrößen	31
2.2.3	Wichtige mathematische Modelle	32
2.3	Elektronische Geräte	33
2.3.1	Allgemeine Bemerkungen	33
2.3.1.1	Redundanz	35
2.3.2	Ausfallraten von Bauelementen	36
2.3.2.1	Drift	37
2.3.2.2	Näherung für die Ausfallraten	37
2.3.2.3	Derating	39
2.3.2.4	Genauigkeit von Ausfallratenangaben	40
2.3.3	Elektronische Geräte ohne Reparatur	41
2.3.4	Elektronische Geräte mit Reparatur	45
2.3.5	Wartung elektronischer Geräte	46
2.4	Anwendungsbeispiel	47
2.5	Maßnahmen zur Zuverlässigkeitserhöhung	53

2 Die Zuverlässigkeit elektronischer Geräte

2.1 Allgemeine Einführung

An elektronische Geräte in industriellen Gewinnungs-, Fertigungs- oder Rechenprozessen wird die Forderung nach hoher *Betriebszuverlässigkeit* und *Brauchbarkeitsdauer* gestellt. Ein Geräteausfall hat im allgemeinen Produktionsausfall oder -ausschuß zur Folge. Die damit verbundenen Kosten sind oft erheblich höher als die Anschaffungskosten des gestörten Gerätes.

Wie noch gezeigt wird, steigt mit der *Zuverlässigkeit* der Geräte auch deren *Preis*. Andererseits nehmen beim Kunden mit steigender Zuverlässigkeit die zusätzlichen Kosten für *Wartung* und *Reparatur* während der Nutzungsdauer ab. Untersucht man die Abhängigkeit der *Gesamtkosten* von der Gerätezuverlässigkeit, so ergibt sich für den Kunden ein *Kostenoptimum* nach Bild 2.1.

Das Minimum der Zuverlässigkeits-Kosten-Relation schwankt für eine eingeführte Technologie meist nur innerhalb eines kleinen Bereiches. Sinkt die Zuverlässigkeit, so übersteigen die *Wartungskosten* die Kundenerwartung oder die geplanten *Garantiekosten* des Herstellers. Außerdem wird das Unternehmen seinen guten Ruf und damit Marktanteile verlieren, wenn die Zuverlässigkeit seiner Produkte gegenüber denen der Konkurrenz geringer ist.

Liegt die Zuverlässigkeit eines Produktes über den Markterwartungen — ohne sonstige technische Fortschritte zu bieten —, so wird es unter Umständen so teuer, daß es nicht mehr gewinnbringend abzusetzen ist. Optimal ist die Weiterentwick-

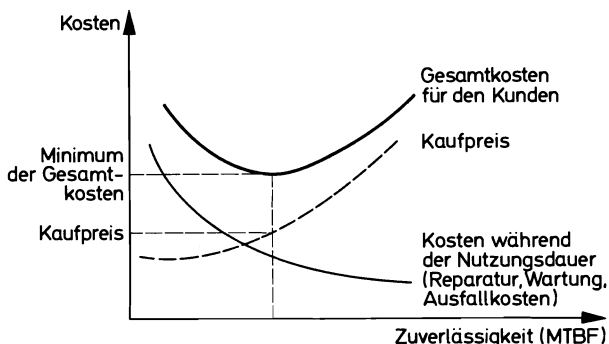


Bild 2.1 Prinzipieller Zusammenhang zwischen Kosten und Zuverlässigkeit

lung in Richtung steigender Zuverlässigkeit bei sinkenden Kosten. Bei Geräten der Raumfahrttechnik ist selbstverständlich die maximal erreichbare Zuverlässigkeit anzustreben, da Wartung und Reparatur nach der Inbetriebnahme nicht mehr möglich sind.

Zuverlässigkeitsangaben weisen prinzipiell in die Zukunft. Da die Kennwerte der Zuverlässigkeit stochastischer (zufälliger) Art sind, ist eine fehlerfreie Arbeitsweise nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorherzuberechnen.

Zuverlässigkeit bedeutet die Beibehaltung bestimmter Eigenschaften während einer gewissen, vorausbestimmten Zeitspanne. Im Gegensatz zur *Qualität* ist sie daher, streng genommen, nur im praktischen Einsatz meßbar. Als Qualität bezeichnet man die Übereinstimmung von Eigenschaften mit den vorher festgelegten Wünschen (Spezifikationen).

Die Anforderungen an elektronische Geräte hinsichtlich Funktionsumfang, Genauigkeit, Verarbeitungsgeschwindigkeit usw. steigen ständig. Durch die steigende Komplexität besteht die Gefahr, daß die Geräte störanfälliger werden — damit liegt ein Zielkonflikt vor. Um trotzdem hohe Zuverlässigkeit zu erreichen, muß ein *Zuverlässigkeitsbewußtsein* entwickelt werden, das den gesamten Werdegang der Geräte beeinflusst.

Zuverlässigkeit muß in die Geräte hineingebaut werden, ausgehend von der Schaltungsentwicklung über Bauelementeauswahl und -dimensionierung, Konstruktion bis hin zur Fertigung und Kontrolle. Zunächst sind aber sorgfältig die Forderungen an die Geräte zu klären, damit nicht mit großem Aufwand Eigenschaften erzeugt werden, die niemand braucht.

2.2 Grundlagen

2.2.1 Begriff der Wahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit spielt in der Theorie der Zuverlässigkeit eine wichtige Rolle. Hier soll für den Praktiker eine anschauliche Erklärung dieses Begriffes am Beispiel des Würfels gegeben werden.

Es werden sichere, unmögliche und zufällige Ereignisse unterschieden. Ein *sicheres Ereignis* E liegt vor, wenn es unter bestimmten Bedingungen immer eintritt. Kann es nie eintreten, so ist es ein *unmögliches Ereignis*. Bei einem *zufälligen Ereignis* besteht die Möglichkeit des Auftretens oder des Nichtauftretens.

Beispielsweise sei bei 100 Würfeln mit einem Würfel das zufällige Ereignis $E \llcorner 4$ liegt oben \gg 15mal aufgetreten. Mit dem Bruch $15 : 100 = 0,15$ läßt sich die *relative Häufigkeit* $H(E)$ der Ereignisse E in der betreffenden Wurfserie angeben.

$$H(E) = \frac{a}{n} \quad (2.1)$$

a ist die Anzahl des Auftretens von E bei n Versuchen.

Berechnet man bei einer größeren Serie von Versuchen die relative Häufigkeit eines Ereignisses E , so zeigt sich eine gewisse Gesetzmäßigkeit. Die ermittelten relativen Häufigkeiten für die Zahlen 1 bis 6 eines Würfels schwanken um einen festen Wert. Die Abweichungen von diesem Wert werden bei einer wachsenden Zahl von Würfeln immer kleiner (Bild 2.2).

Dieser Wert wird als *Wahrscheinlichkeit* für das Eintreffen des Ereignisses E , das heißt für das Würfeln der bestimmten Zahl, bezeichnet. Von Wahrscheinlichkeit kann man erst dann sprechen, wenn wiederholte Beobachtungen am gleichen Objekt und unter gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt wurden. Bei einer ausreichend großen Anzahl n von Versuchen, bei denen das Ereignis E m -mal eingetreten ist, kann die relative Häufigkeit $m : n$ als Zahlenwert für die Wahrscheinlichkeit $P(E)$ gewählt werden.

$$P(E) = \frac{m}{n} \tag{2.2}$$

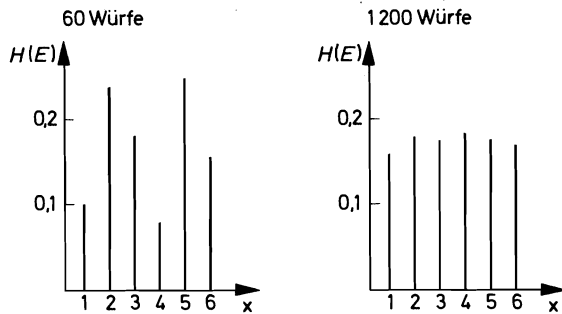


Bild 2.2 Relative Häufigkeit $H(E)$ beim Würfeln

2.2.2 Begriff der Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit wurde zuerst definiert als die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Produkt

- eine geforderte Funktion
 - unter festgelegten Funktions- und Umgebungsbedingungen
 - während einer bestimmten Zeitdauer
- ausführt.

Die Zuverlässigkeit ist demnach eine Wahrscheinlichkeit, wobei der Zeitraum eine wesentliche Rolle spielt. Es ist einleuchtend, daß bei genügend langer Betriebszeit jedes Gerät irgendwann einmal ausfallen wird, also die Zuverlässigkeit Null hat. Zuverlässigkeitsangaben sind auf eine Zeitspanne zu beziehen, andernfalls haben sie keinen Sinn.

Die Funktionstüchtigkeit von Bauelementen und Geräten hängt wesentlich von Belastung, Temperatur, Feuchte, Vibration usw. ab. Daher ist bei Zuverlässigkeitsangaben grundsätzlich auch die Angabe der Funktions- und Umgebungsbedin-

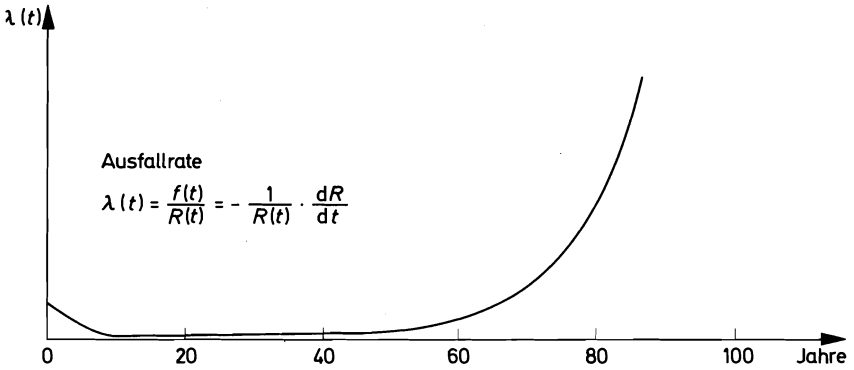
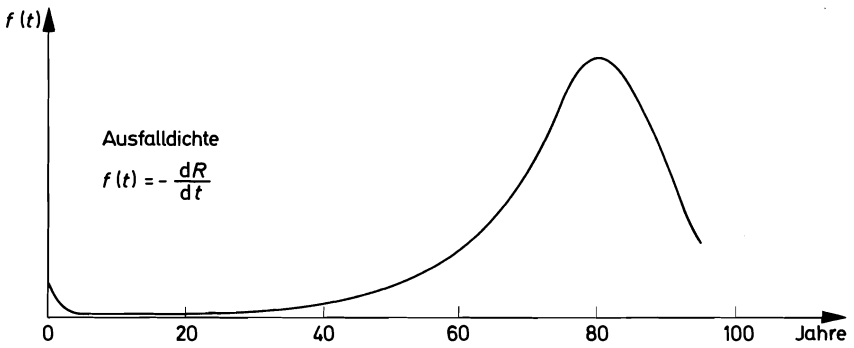
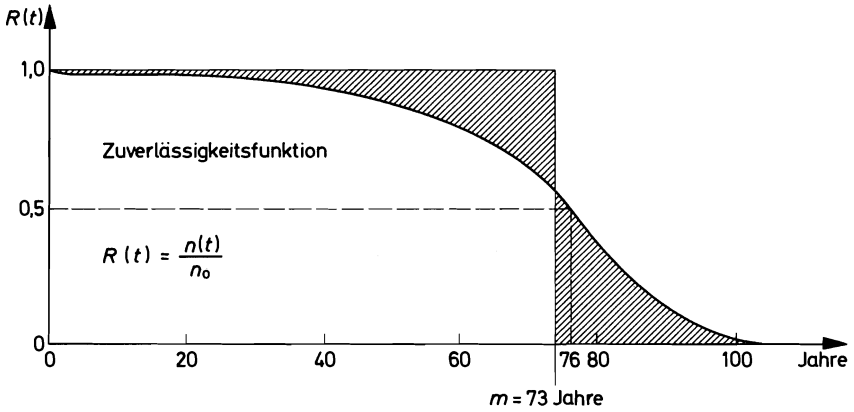


Bild 2.3 Lebensdauerkurve eines menschlichen Kollektivs (nach [2.10] und [2.5.1])

gungen, bei denen das jeweilige Objekt betrieben werden soll, erforderlich.

Der Begriff *Ausfall* wird in der obigen Definition nicht erklärt, obwohl er für die Beurteilung der Zuverlässigkeit von entscheidender Bedeutung ist. Da Ausfallkriterien stets von den speziellen Anforderungen an ein Gerät in seiner jeweiligen Einsatzart abhängig sind, lassen sich diese nicht generell festlegen. Um dem abzuhelfen, wurde in DIN 40041 [2.7] der Begriff der Zuverlässigkeit allgemeiner definiert: «Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, innerhalb der vorgegebenen Grenzen denjenigen durch den Verwendungszweck bedingten Anforderungen zu genügen, die an das Verhalten ihrer Eigenschaften während einer gegebenen Zeitdauer gestellt sind.»

2.2.2.1 Zuverlässigkeitskenngrößen

Zur Veranschaulichung der wichtigsten Kenngrößen soll die Lebensdauerkurve des Menschen herangezogen werden (Bild 2.3). DIN 40041 bezeichnet als *Zuverlässigkeitsfunktion* eine mathematische Funktion, die den Zusammenhang zwischen einer Zuverlässigkeitskenngröße und der Zeit wenigstens näherungsweise wiedergibt. Häufig wird als Kenngröße die *Lebensdauerverteilung* bzw. *Bestandsfunktion* verwendet.

Zuverlässigkeit (reliability) wird definiert als

$$R(t) = \frac{n(t)}{n_0} \quad (2.3)$$

mit $n(t)$ als Bestand zur betrachteten Zeit t und dem Anfangsbestand n_0 .

Für das in Bild 2.3 dargestellte menschliche Kollektiv gilt, daß nach 76 Jahren nur noch 50% des Anfangsbestandes lebt. Oder anders ausgedrückt: Für einen bestimmten Menschen beträgt die Wahrscheinlichkeit, 76 Jahre alt zu werden, 50%. Es ist nur noch die Wahrscheinlichkeit des Überlebens angebar, welche natürlich mit wachsender Zeit sinkt. Wann der Tod eines bestimmten Menschen eintritt, ist völlig ungewiß.

Der arithmetische Mittelwert der Lebensdauerverteilung wird als *mittlerer Ausfallabstand* m oder MTBF (mean time between failure) bezeichnet.

$$m = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (2.4)$$

Der MTBF-Wert kann als Kenngröße zur Zuverlässigkeitskurzbeschreibung von Geräten oder zum Vergleich verschiedener Geräte oder Entwürfe verwendet werden. Er ist aber nur bedingt als «mittlere Lebensdauer» zu verstehen (siehe 2.3.3). Beim betrachteten menschlichen Kollektiv beträgt der mittlere Ausfallabstand $m = 73$ Jahre, dabei ist der Bestand auf etwa 55% abgesunken.

Die *Ausfallwahrscheinlichkeit* $F(t)$ ist die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Element bis zur Zeit t ausfällt.

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2.5)$$

Die *Ausfalldichte* (genauer Ausfallwahrscheinlichkeitsdichtefunktion) $f(t)$ gibt an, wie sich die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ mit der Zeit ändert.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (2.6)$$

Die *Ausfallrate* $\lambda(t)$ ist die Ausfalldichte $f(t)$, bezogen auf die im betrachteten Augenblick noch brauchbaren Elemente $R(t)$.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = - \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Trägt man die Ausfallrate in Abhängigkeit ihres Hauptausfallparameters auf (z.B. Zeit, Temperaturzyklen, Lastspiele), so erhält man oft den in Bild 2.4 dargestellten Verlauf der «*Badewannenkurve*». Sie läßt sich unterteilen in die drei Abschnitte

- *Frühausfälle* mit abnehmender Ausfallrate (Einlaufabschnitt),
- *Zufallsausfälle* mit konstanter Ausfallrate (normale Nutzungsperiode),
- *Verschleißausfälle* mit zunehmender Ausfallrate (Abnutzungsphase).

Die Frühausfälle sollten möglichst noch im Prüffeld des Herstellers auftreten und beseitigt werden. Bei elektronischen Geräten ist der Haupteinflußparameter im allgemeinen die Zeit.

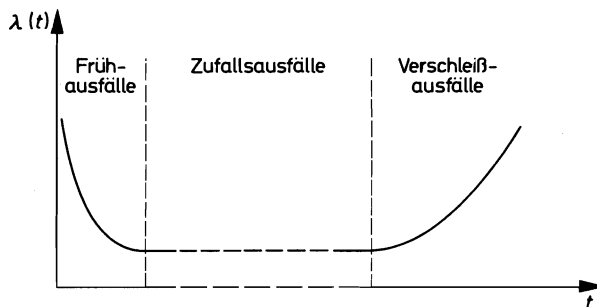


Bild 2.4 «Badewannenkurve» der Ausfallrate $\lambda(t)$

2.2.3 Wichtige mathematische Modelle

Um die im praktischen Betrieb auftretenden Lebensdauerverteilungen einer mathematischen Behandlung zugänglich zu machen, müssen sie durch geeignete mathematische Funktionen beschrieben werden. Häufig verwendete Arten von *Wahrscheinlichkeitsverteilungen* sind grafisch in Bild 2.5 dargestellt.

Mit der *Exponentialverteilung* kann die Bestandsabnahme durch reine Zufallsausfälle beschrieben werden. Diese treten während der Nutzungsperiode bei alterungsfreien elektronischen Bauelementen auf. Treten überwiegend Verschleißaus-

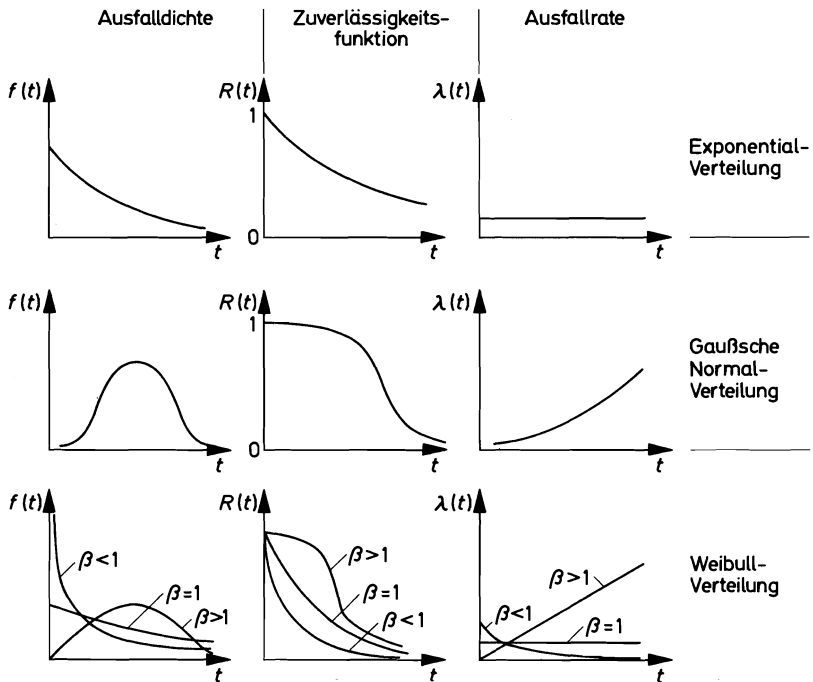


Bild 2.5 Verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen

fälle auf (Elektronenröhren, Elektromotoren, Kohlebürsten, Relais und ähnliche Elemente), so ist die *Gaußsche Normalverteilung* anwendbar.

Kompliziertere Lebensdauerverteilungen lassen sich als Summe von *Weibull-Verteilungen* annähern. Diese sind durch ihre Formparameter β gut an vorgegebene Kurvenverläufe anzupassen. Die Exponentialverteilung ist dabei als Spezialfall enthalten. Der Verlauf der «Badewannenkurve» kann durch eine Summe von drei Weibull-Funktionen gut angenähert werden.

Von den genannten Wahrscheinlichkeitsverteilungen ist die Exponentialverteilung mathematisch besonders gut handhabbar. Da sie bei Zuverlässigkeitsabschätzungen elektronischer Geräte im allgemeinen ausreicht, wird sie im folgenden ausschließlich verwendet.

2.3 Elektronische Geräte

2.3.1 Allgemeine Bemerkungen

Hier werden nur solche Geräte behandelt, die frei sind von Entwicklungs-, Konstruktions- und Fertigungsfehlern; dieses gilt sowohl für die Hardware als auch für

die Software. Die nach der Einlaufphase auftretenden Fehler unterliegen dann im wesentlichen dem Zufall und sind nach den Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung behandelbar.

Es muß jedoch einschränkend darauf hingewiesen werden, daß die Zuverlässigkeit eines Gerätes nicht im Sinne eines Garantiewertes berechnet werden kann. Der Grund dafür liegt weniger in der Theorie der Zuverlässigkeit als in der Ungenauigkeit der Ausfallratenangaben. Je nachdem, welche Ausfallratenquellen verwendet werden, lassen sich günstige Zahlenwerte für die Ausfallkenngrößen ermitteln. Würde man, mit der gleichen Berechtigung, Ausfallratenangaben aus anderen Quellen verwenden, so könnte man durchaus um Zehnerpotenzen besser oder schlechter liegen.

Trotzdem sind *Zuverlässigkeitsanalysen* sinnvoll. Sie geben dem Entwickler wertvolle Hinweise für die Auswahl und Dimensionierung von Bauelementen, außerdem lassen sich Schwachstellen erkennen. Ferner können verschiedene Systementwürfe hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit miteinander verglichen werden. Voraussetzung ist dabei allerdings, daß grundsätzlich einheitliche Ausfallraten verwendet werden. Ausfallratenangaben aus unterschiedlichen Quellen sind wertlos.

Auf diese Gegebenheiten ist besonders bei Verkaufsgesprächen hinzuweisen, wenn beispielsweise ein Kunde auf einen günstigeren MTBF-Wert, den ein Mitbewerber «anbietet», hinweist. Beim Vergleich verschiedener Angebote sollte der Kunde grundsätzlich die Ausfallraten, mit denen gerechnet werden soll, vorschreiben.

Nach DIN 40042 [2.8] unterscheidet man Nenn-, Prüf-, Entwurfs- und Betriebszuverlässigkeit. In den folgenden Betrachtungen wird die *Entwurfzuverlässigkeit* zugrunde gelegt. Diese ist eine «aufgrund des Entwurfs und der verwendeten Teile unter Ausschaltung von Fertigungsfehlern durch Rechnung ermittelte Zuverlässigkeitsangabe».

Mit der Berechnung der Entwurfzuverlässigkeit sollte man schon in einem frühen Entwicklungsstadium beginnen, denn sie kann Hinweise auf Schwachstellen geben und damit die Schaltungs- und Bauelementeauswahl sowie die leistungsmäßige Dimensionierung günstig beeinflussen. Die Berechnung ist parallel zum Entwicklungsfortschritt weiterzuführen, um einen ständigen Überblick über die augenblicklich dem Gerät eigene Entwurfzuverlässigkeit zu besitzen.

Bei elektronischen Geräten gibt es im allgemeinen keine «Lebensdauer», da technisch gesehen jede Störung behoben werden kann. Durch eine entsprechende Betriebsorganisation kann ein Gerät im Prinzip beliebig lange verwendet werden. In der Praxis ergibt sich ein Ende der Brauchbarkeits- oder Verwendungsdauer dadurch, daß die Störungsbehebung oder der Betrieb des Gerätes im Laufe der Zeit nicht mehr wirtschaftlich ist.

Für reparierbare Geräte wird daher der Begriff Ausfall durch den Begriff Störung ergänzt. Erweitert man die Kenngrößen um den Begriff Verfügbarkeit, so erhält man für die Praxis ein handliches Maß für die Zuverlässigkeit.

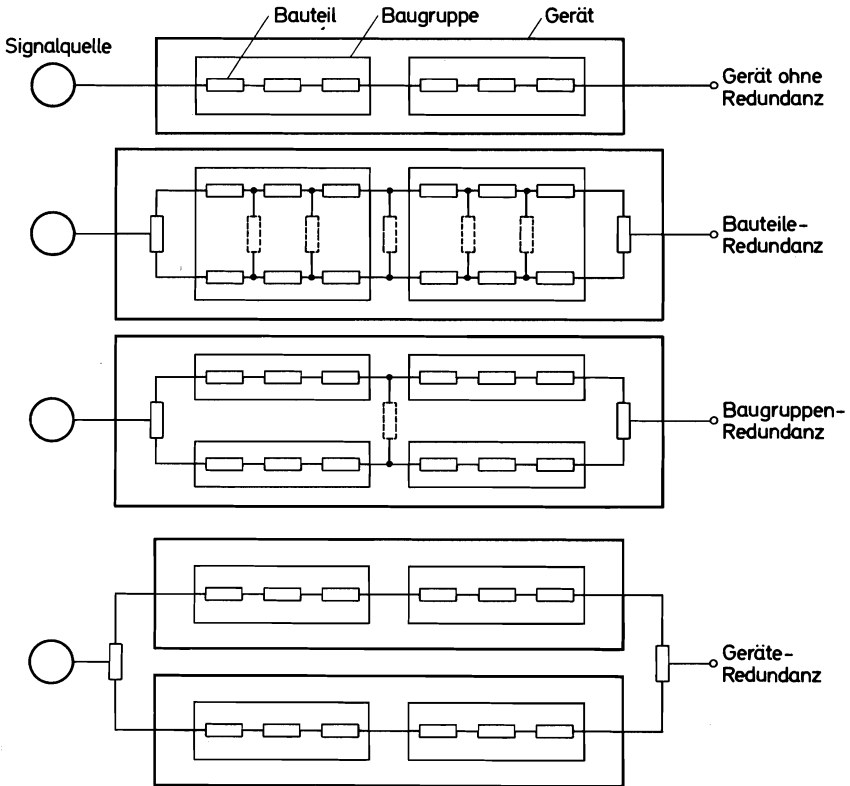


Bild 2.6 Redundante Übertragungsnetzwerke (nach [2.11])

2.3.1.1 Redundanz

Läßt sich trotz sorgfältiger Dimensionierung der Schaltung und Auswahl besonders zuverlässiger Bauelemente eine gewünschte Entwurfszuverlässigkeit nicht erreichen, müssen Redundanzverfahren verwendet werden. Unter *Redundanz* versteht man den Einsatz überzähliger, für die prinzipielle Funktion nicht notwendiger Bauteile oder Baugruppen (Bild 2.6). Diese überzähligen Komponenten sollen die Zuverlässigkeit erhöhen.

Dem Signal sollen durch die Redundanz mehrere parallele Wege geboten werden, damit es beim Ausfall eines Elementes eine Ausweichmöglichkeit hat. Befindet sich zum Beispiel in einem Leitungszug ein unzuverlässig schließender Schalter, so kann durch Parallelschalten weiterer Schalter diese Unzuverlässigkeit verkleinert werden. Das Entsprechende gilt für unzuverlässig öffnende Schalter; hier können weitere Schalter in Reihe geschaltet werden. Kombiniert man vier Schalter in Reihen-Parallel-Schaltung, so kann sowohl die Unzuverlässigkeit des Öffnens

als auch des Schließens vermindert werden. Das Prinzip dieser «Quadredundanz» zeigt Bild 2.7 am Beispiel von vier Dioden.

Die Redundanz kann in der untersten Ebene, also bei den Bauelementen (zum Beispiel im einfachsten Fall durch geeignete Parallelschaltung) angewendet werden, oder auf höherer Ebene bei den Baugruppen, Geräten oder der Anlage. Die Redundanz-Elemente nennt man «aktiv» oder «heiß», wenn sie während der Betriebszeit ständig in Funktion sind. Sie werden mit «passiv» oder «kalt» bezeichnet, wenn sie erst in dem Augenblick eingesetzt werden, in dem sie tatsächlich nötig sind. Im letzteren Fall ist eine Einrichtung erforderlich, die den Fehler eines Bauteils erkennt und ein entsprechendes Umschaltorgan betätigt.

Da Vereinfachungen bei der Untersuchung der Zuverlässigkeit redundanter Systeme zu Fehlschlüssen führen können, wird hier aus Platzgründen auf die Behandlung dieses umfangreichen Komplexes verzichtet. Umfangreiche Darstellungen finden sich in [2.1], [2.3] und [2.4].

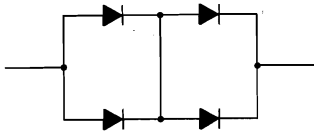


Bild 2.7 Diodenschaltung mit Quadredundanz

2.3.2 Ausfallraten von Bauelementen

Auf die typische Abhängigkeit der Ausfallrate von der Zeit wurde bereits im Abschnitt 2.2.2 hingewiesen (Bild 2.4). Verschiedenen Quellen ist zu entnehmen, daß nach einer «Einbrennzeit» von 300 bis 500 Stunden (2 bis 3 Wochen Dauerbetrieb) die Ausfallrate auf wenige Prozent des ursprünglichen Wertes gesunken ist. Das Ende der Frühausfälle sollte mit dem Verlassen des Prüffeldes beim Hersteller übereinstimmen.

Die einfache mathematische Behandlung mit Hilfe der Exponentialverteilung ist nur für den Bereich der Zufallsausfälle zulässig, das heißt für den geradlinigen Teil der «Badewannenkurve». Die Bezeichnung «Zufallsausfälle» ist nicht besonders glücklich gewählt, denn jeder Ausfall hat irgendwelche Ursachen. Der Zufallsbegriff ist hierbei statistisch zu verstehen und entspricht der Annahme, daß der Zeitpunkt des Ausfalls eines bestimmten Bauelementes nicht vorausgesagt werden kann.

Früher oder später wird die Ausfallrate jedes Produktes zeitabhängig. Die Zuverlässigkeit hängt dann von der akkumulierten Betriebszeit ab und kann dann nicht mehr mit der Exponentialfunktion beschrieben werden. Bei elektronischen Bauelementen können beispielsweise die inneren Anschlüsse durch häufige thermische Wechselbeanspruchungen ermüden und dadurch im Laufe der Zeit Anlaß für erhöhte Ausfälle geben. Ebenso entstehen Undichtigkeiten an Gehäusen, wodurch die umgebende Atmosphäre bzw. deren Verunreinigungen das Bauelement verändern können.

2.3.2.1 Drift

Die Definition der Zuverlässigkeit nach DIN 40041 enthält eine Angabe über die Anforderungen, die an das Verhalten der Eigenschaften während einer gegebenen Zeitdauer gestellt sind. Das bedeutet, daß definiert werden muß, wann ein Bauelement ausgefallen ist. Während diese Angabe bei digitalen Bauelementen im allgemeinen relativ einfach ist, treten bei analogen Bauelementen und Geräten durch das Driftverhalten hier zusätzliche Probleme auf. *Drift* ist «die nicht sprunghaft zu einem Ausfall führende Änderung von Merkmalswerten im Laufe der Zeit bei bestimmter Beanspruchung».

Verursacht wird die Drift durch chemische und physikalische Vorgänge, die sich im Innern oder an der Oberfläche eines Materialstückes abspielen. Die Gesamtheit dieser Vorgänge und ihre Auswirkungen nennt man *Alterung* (siehe 2.3.5 und Bild 2.12).

Ein Änderungsausfall durch Drift muß nicht in gleicher Weise einen Ausfall einer Funktionseinheit hervorrufen wie ein Totalausfall (Unterbrechung oder Kurzschluß). Leider sind solche Angaben in den Datenblättern der Bauelemente nur sehr spärlich enthalten. Bei vielen Anwendern bestehen über diese Vorgänge keine oder falsche Vorstellungen.

2.3.2.2 Näherung für die Ausfallraten

Der Ausfall von Bauelementen wird beeinflusst durch die Betriebs- und Einsatzbedingungen. Für die Ausfallrate λ , die bei kleinen Werten durch folgende Näherung beschrieben werden kann

$$\lambda = \frac{\text{Anzahl der Ausfälle}}{\text{Anzahl der Prüflinge} \cdot \text{Testzeit}} \quad (2.8)$$

ist folgender Rechenansatz möglich:

$$\lambda = \lambda_B \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 + k_E \quad (2.9)$$

λ_B : Basisausfallrate

k_1 : Einsatzmultiplikator zur Berücksichtigung der Umgebungseinflüsse

k_2 : Multiplikator zur Berücksichtigung des Wertebereiches (z.B. des Widerstandswertes)

k_3 : schaltungsabhängiger Anwendungsmultiplikator

k_E : Umgebungsbeiwert zur Berücksichtigung der Umgebungseinflüsse.

Entsprechende Tabellen sind in [2.18] sowie in [2.1] zusammengestellt.

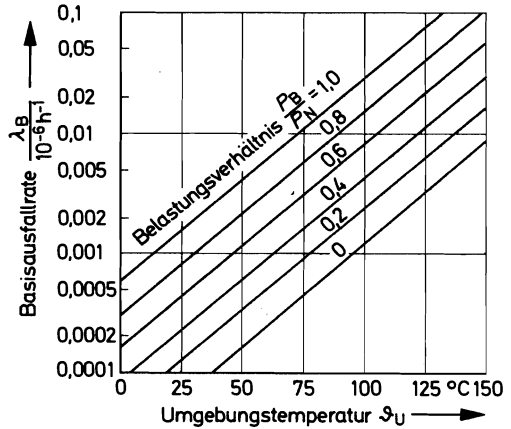
Man berechnet damit die *Betriebsausfallrate* über eine Anzahl von *Streibfaktoren*. Dieses ist möglich, wenn die Abhängigkeit der Ausfallrate von den einzelnen Belastungsfaktoren bekannt ist. Dieses Verfahren erlaubt den Einsatz von Ausfallraten-Datenbanken und ist damit eine Voraussetzung für eine Zuverlässigkeitsvorhersage mittels Rechner [2.15].

Tabelle 2.1 Ausfallraten für überschlägige Zuverlässigkeitsberechnungen

Die Werte gelten für $\vartheta_U = 50\text{ °C}$ und 50% Belastung bei stationärem Betrieb. Bei $\vartheta_U = 75\text{ °C}$ und 80% Belastung (Leistung und Spannung) sind die Ausfallraten um den Faktor 5 zu erhöhen. Für Fahrzeugbetrieb gilt ebenfalls ein Faktor 5.

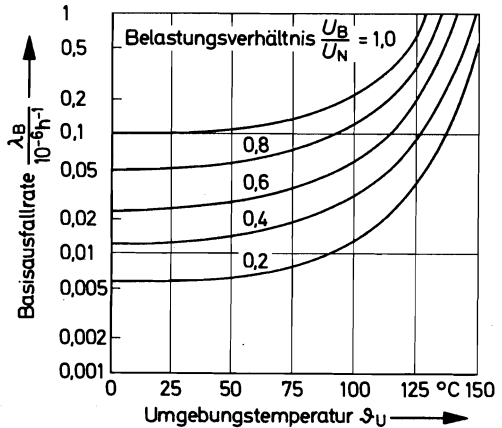
Bauelemente	λ 10^{-6} h^{-1}	Bauelement	λ 10^{-6} h^{-1}
1. Integrierte Schaltkreise			
Digitale, bipolar		Tantal (trocken)	0,05
< 100 Gatter (MSI)	0,2	Keramiktrimmer	0,02
> 100 Gatter (LSI)	0,25	Lufttrimmer	0,2
Digitale, MOS		Durchführung	0,01
< 100 Gatter (MSI)	0,1		
> 100 Gatter (LSI)	0,15	6. Widerstände	
Analoge	0,2	Masse	0,002
Hybride: Summe der Einzelausfallraten		Kohleschicht	0,001
		Metallschicht	0,002
		Draht	0,01
2. Transistoren			
Si, Universal	0,006	Draht (variabel)	0,2
Si, Leistung	0,06	Schicht (variabel)	0,5
FET	0,05	Thermistor	0,05
Ge, Universal	0,15		
Ge, Leistung	0,75	7. Induktivitäten	
		HF-Spulen	0,03
3. Dioden			
Si, Universal	0,005	Transformator (vergossen)	0,1
Si, Leistung	0,05	Transformator (unvergossen)	0,5
Si, Zener	0,04		
Ge, Universal	0,02	8. Verbindungen	
LED	0,01	Steckerfassung	0,1
		Steckkontakt (seltene Steckung)	0,01
4. Sonstige Halbleiter			
7-Segment-Anzeige	0,2	Steckkontakt, Koax (seltene Steckung)	0,05
Optokoppler	0,2	Klemmkontakt auf Leiterplatte (seltene Steckung)	0,03
Thyristor	0,05	Lötverbindung	0,005
		Wickelverbindung	0,0005
5. Kondensatoren			
Keramik	0,006	Kabelader (seltene Bewegung)	0,06
Glimmer	0,003		
Papier	0,01	9. Sonstige Bauelemente	
Kunstfolien	0,03	Glühlampe	100
Al-Elektrolyt	0,5	Glimmlampe	10
		Nixie-Anzeige	100

Bild 2.8 Ausfallratenverlauf von Massewiderständen nach MIL-R-11/RC 07/12
 P_B = Verlustleistung im Betrieb
 P_N = Nennleistung



Für eine Reihe von Bauelementen gibt es *Unterlastungskurven*, welche die Abhängigkeit der Basisausfallrate von der Belastung darstellen. Die Bilder 2.8 und 2.9 zeigen typische Verläufe für Massewiderstände und trockene Tantalkondensatoren. Das Ansteigen der Ausfallrate mit der Temperatur und der elektrischen Belastung (Leistung, Spannung) ist typisch für alle elektronischen Bauelemente.

Bild 2.9 Ausfallratenverlauf von trockenen Tantalkondensatoren nach MIL-C-28855
 U_B = Betriebsspannung
 U_N = Nennspannung



2.3.2.3 Derating

Aus den Bildern 2.8 und 2.9 ergibt sich auch, daß durch Herabsetzung der Belastung oder der Temperatur um 50% die Ausfallrate jeweils um fast eine Zehnerpotenz gesenkt werden kann. Dieses als *Derating* bezeichnete Verfahren ist eine der wichtigsten Methoden zur Erhöhung der Zuverlässigkeit. Durch die Überdimensionierung steigt allerdings der Preis der Bauelemente.

Eine besondere Bedeutung für die Größe der Ausfallraten hat die Temperatur. Bisher zögerten die Konstrukteure oft, die Temperatur im Innern eines Gerätes durch einen Ventilator herabzusetzen, da die Lebensdauer dieser mechanischen Geräte zu gering war. Inzwischen wurden hier sehr brauchbare Werte erreicht, so daß hierdurch ein Mittel zur Erhöhung der Zuverlässigkeit zur Verfügung steht. Außerdem kann es günstiger sein, einen Lüfter vor dem Ende seiner voraussichtlichen Lebensdauer (zum Beispiel ein Jahr bei Dauerbetrieb) auszutauschen und dafür eine Erhöhung der Zuverlässigkeit der elektronischen Bauelemente zu erhalten, als in kürzeren Abständen elektronische Fehler zu beheben.

2.3.2.4 Genauigkeit von Ausfallratenangaben

Ausfallratenangaben für Bauelemente werden von Herstellern, Verbrauchern und Behörden gemacht. Dabei zeigt es sich häufig, daß zwar diese Angaben anscheinend mit höchster Genauigkeit veröffentlicht werden, daß aber in den meisten Fällen nichts über die funktions- und umweltbedingten Beanspruchungen gesagt wird, denen diese Bauelemente während des Beobachtungszeitraumes unterworfen waren.

Die einfache Aussage «die Ausfallrate eines Schichtwiderstandes beträgt $3 \cdot 10^{-9}$ Ausfälle/h» ist unzureichend. Mindestens folgende Daten sollten angegeben werden [2.1]:

- Betriebs- und Versuchsbedingungen (funktionell: z.B. elektrische und magnetische Belastungen. Umgebungsbedingt: z.B. Umgebungstemperatur, Luftfeuchte, mechanische und Strahlungseinflüsse).
- Ausfallkriterien (Total- oder Driftausfall, Grenzwerte angeben).
- Beobachtungszeitraum und gegebenenfalls Beanspruchungszyklen.
- Vertrauensbereich (Bereich, der mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit den wahren Wert enthält) der Ausfallrate, ermittelt aus der Zahl der Ausfälle.

Da diese Voraussetzungen häufig nicht veröffentlicht werden, findet man in der Literatur Ausfallratenangaben, die sich um mehrere Zehnerpotenzen unterscheiden. Trotzdem kann man, wenn Angaben aus einer Quelle verwendet werden, vergleichende Zuverlässigkeits- und Schwachstellenanalysen mit einer gewissen Näherung durchführen. Das gilt auch für Konzeptüberprüfungen.

Häufig verwendete Quellen sind [2.17], [2.18] und [2.19]. In Tabelle 2.1 sind Ausfallraten zusammengestellt, die vom Verfasser für überschlägige Zuverlässigkeitsabschätzungen und Konzeptvergleiche verwendet werden. Die Werte für variable Widerstände, Stecker und bewegte Leitungen sind selbstverständlich von der Anzahl und der Art der Betätigungen abhängig, was in der Tabelle nicht berücksichtigt wurde.

Lebensdauerwerte von Schaltern und Relais lassen sich nicht direkt angeben, da sie außer von den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, Verunreinigungen der Luft, Stoß- und Vibrationsbelastung) noch von der Art der Kontaktbelastung abhängig sind.

Die in Tabelle 2.2 angegebenen typischen *Lebensdauern von Schaltern und Relais* sind als zulässige mechanische Schaltspiele anzusehen. Beträgt beispielsweise die typische Lebensdauer eines Relais $10 \cdot 10^6$ Schaltspiele, so entspricht dieses einer Ausfallrate $\lambda = 0,1 \cdot 10^{-6}$ Ausfälle/Schaltspiel. Dieser Wert ist mit den Schaltspielen/Zeiteinheit zu multiplizieren, z.B. 1000 Schaltspiele/Stunde. Dann beträgt die Ausfallrate für die gewählten Zahlen $\lambda = 10^3$ Schaltspiele/Stunde $\cdot 0,1 \cdot 10^{-6}$ Ausfälle/Schaltspiel = 10^{-4} Ausfälle/Stunde.

Die Ausfallraten in Tabelle 2.1 sind in $10^{-6} \cdot \text{h}^{-1}$ angegeben, was als ‰/1000 h oder ‰/10 000 h interpretiert werden kann. Nimmt man die Dauer eines Jahres in grober Näherung mit 10 000 Stunden an (genauer 8800 h), so können die Werte auch als prozentualer Ausfall pro Jahr (% p.a.) angesehen werden.

Tabelle 2.2 Typische Lebensdauern von Schaltern und Relais

Bauelement	Anzahl der Schaltspiele $\cdot 10^6$		
	min.	typisch	max.
Drucktastenschalter	0,01	0,1	10
Relais, Starkstrom	1	2	10
Relais, Schwachstrom	1	10	100
Reed-Relais, DIL-Gehäuse	5	10	1000
Reed-Kontakt, trocken	0,5	50	5000

Zusammenfassend kann gesagt werden: Ausfallraten sind das Ergebnis umfangreicher Statistiken, aber auch nicht mehr. Sie beinhalten keineswegs die Empfehlung an den Entwickler, sie unbedenklich zu verwenden. Vielmehr wird man bei einer genauen Analyse immer auf die entsprechende Kurvenschar des betreffenden Bauelementes mit den Parametern Temperatur und Belastung sowie auf anzuwendende Streifaktoren zurückgreifen müssen.

2.3.3 Elektronische Geräte ohne Reparatur

Die Zuverlässigkeit eines Gerätes hängt von der Zuverlässigkeit der einzelnen Bauelemente ab, die durch ihr Zusammenwirken die Gerätezuverlässigkeit ergeben.

Zur Abschätzung der Zuverlässigkeit wird angenommen, daß der Ausfall eines Bauelementes zum völligen Versagen der Gesamtfunktion führt. Zur Vereinfachung der Betrachtung wird eine Funktionsminderung ausgeschlossen.

Sind R_1 bis R_n die Zuverlässigkeiten der Einzelelemente 1 bis n , so gilt für die Zuverlässigkeit des Gesamtgerätes

$$R_S = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \dots \cdot R_n \quad (2.10)$$