

## 4 Ausfallraten von Bauelementen

Um die Überlebenswahrscheinlichkeit elektronischer Komponenten entweder anhand der Markow-Kette von Bild 3.16 oder mit der Exponentialverteilung nach Gl.(3.150) beschreiben zu können, ist die Kenntnis der zeitunabhängigen Ausfallrate  $\lambda$  notwendig. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Gewinnung von Ausfallraten und der Ermittlung ihrer Einflußgrößen. Zahlenwerte können den im Anhang stehenden Tabellen A 6 bis A 13 entnommen werden.

### 4.1 Unterscheidung der Ausfallarten

Ausfallarten. In der deutschen Sprache werden die Begriffe "Fehler" und "Ausfall" oft synonym gebraucht. Da der Terminus Fehler (error) in der Meßtechnik schon als Abweichung vom wahren Wert definiert ist und in der Umgangssprache eine falsche Handlung zum Ausdruck bringt, wird hier die Funktionsunfähigkeit einer Komponente vorzugsweise mit Ausfall (failure, defect) bezeichnet. Dabei wird in Abhängigkeit von der Ursache, dem Umfang, und der Geschwindigkeit des Auftretens unterschieden zwischen

zufälligem Ausfall	und	deterministischem Ausfall
Totalausfall	und	Teilausfall (defect)
Sprungausfall (catastrophic failure)	und	Driftausfall, Ermüdungsausfall, (degradation failure).

Die Ausfallrate  $\lambda$  kennzeichnet nur zufallsbedingte Ereignisse. Deterministische oder systematische Ausfälle, die z.B. infolge einer Überlastung oder einer Falschbehandlung eintreten können, sind nicht eingerechnet.

In der Regel sind bei einem Bauteil mehrere Merkmale spezifiziert. Bei einem Operationsverstärker kann dies die Spannungsverstärkung, die Offsetspannung, der Offsetstrom, oder die Temperaturabhängigkeit sein. Entspricht das Bauteil auch nur bei einem Merkmal nicht mehr der Spezifikation, so wird es als unbrauchbar und damit als ausgefallen gewertet.

Die Sprungausfälle treten plötzlich auf, sind nicht vorhersehbar und werden deshalb als zufallsbedingt angesehen. Die Drift eines Parameters hingegen verläuft mit einer bestimmten Gesetzmäßigkeit. Dabei kann die zulässige Parameteränderung nicht allgemein spezifiziert werden. Die Grenze hängt von der jeweiligen Anwendung ab. Hier soll der Entwicklungsingenieur seine Schaltung so auslegen,

daß diese die während der angestrebten Nutzungsdauer auftretenden Parameteränderungen toleriert. Es ist also Aufgabe des Geräteentwicklers und nicht die des Bauelementeherstellers, die sogenannten Driftausfälle zu vermeiden. Diese werden deshalb im allgemeinen nicht in eine von der Zeit unabhängige Ausfallrate eingerechnet. Berücksichtigt sind lediglich die zufälligen, plötzlich auftretenden Total- und Teilausfälle.

Beispiel einer Parameterdrift. Als Beispiel einer Parameterdrift zeigt Bild 4.1 die relative Änderung des Wertes von Metallschichtwiderständen. Getestet wurden insgesamt 148 Exemplare. Im Bild sind der Mittelwert der Widerstandsänderung (Kurve a) und die Grenzen der Verteilung eingetragen. 90 % der untersuchten Widerstände liegen zwischen den Kurven b und c. Die Widerstandsänderungen steigen ungefähr mit der Wurzel aus der Betriebszeit. In den Datenblättern ist oft die nach  $t_0 = 1000$  h eingetretene Widerstandsänderung spezifiziert. Damit läßt sich die Widerstandsänderung zum Zeitpunkt  $t$  aus der folgenden Beziehung bestimmen:

$$\left[\frac{\Delta R}{R}\right]_t = \left[\frac{\Delta R}{R}\right]_{t_0} \sqrt{\frac{t}{t_0}}. \quad (4.1)$$

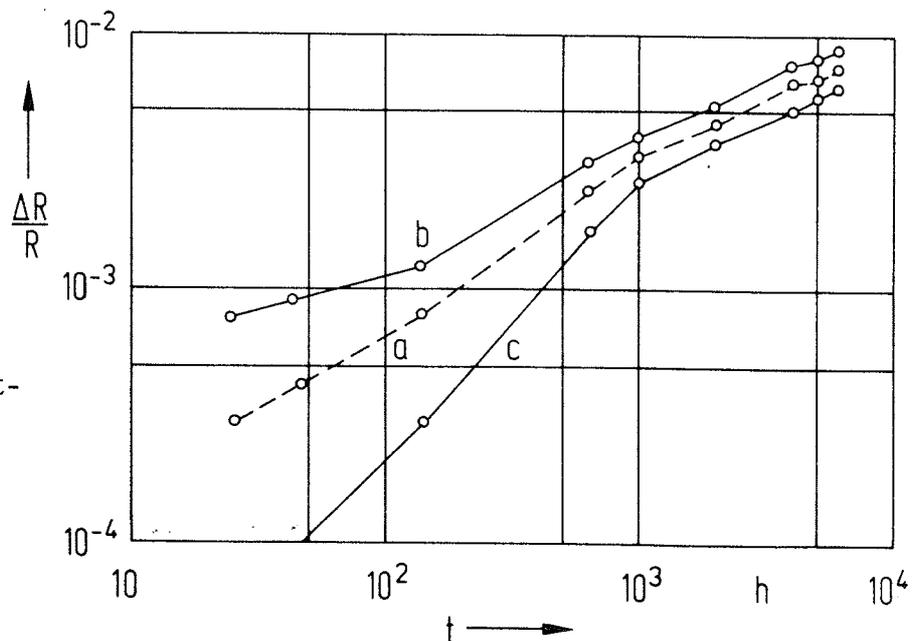


Bild 4.1:  
Drift von 15-kΩ-Schicht-  
widerständen /4.13/  
a Mittelwert,  
b und c 90 % Bereich

Prinzipielle Ausfallmechanismen bei Halbleiterbauelementen /4.5 - 4.12/. Die Ausfallmechanismen können im Halbleiterchip, in seinen Anschlüssen oder seinem Gehäuse liegen (Bild 4.2; Tabelle 4.1). Das Gehäuse

Tab. 4.1 Ausfallmechanismen bei Halbleiterbauelementen

	Ort	Ausfallmechanismen
1	Gehäuse	Undichtigkeit, Eindringen von Feuchtigkeit und Verunreinigungen
2	Anschlüsse	unterbrochene Bond-Drähte, lose Bonddrahtstückchen und Fremdkörper, Kurzschlüsse zwischen den Bond-Drähten, fehlerhafte Verbindungen zwischen dem Gold-Draht und der Aluminium-Metallisierung (Goldpest)
3	Kristall	Risse, mechanische Spannungen zwischen Kristall und Gehäuse
4	Oxydschicht	Löcher, elektrischer Durchschlag
5	Leiterbahnen	Unterbrechung bei Masken- oder Ätzfehler, Verengung und Unterbrechung der Leiterbahnen bei Abtragen des Aluminiums (Elektromigration), Kurzschlüsse infolge von Whiskern

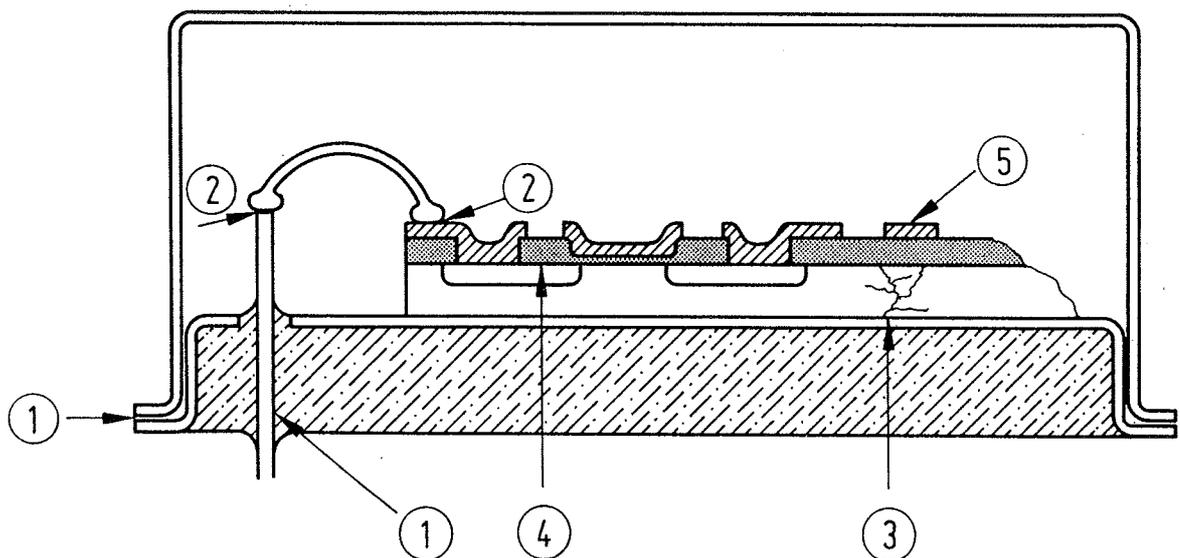


Bild 4.2: Fehlermöglichkeiten an integrierten Schaltungen;  
die Ziffern beziehen sich auf die Zeilen der Tabelle 4.1

- schützt den Chip vor einer mechanischen Zerstörung,
- vor Feuchtigkeit und schädigenden Gasen,
- leitet die im Chip entstehende Wärme nach außen ab und
- ermöglicht die Handhabung und den Anschluß.

Bei einem Metall-/Keramik-Gehäuse befindet sich der Chip in einer Gasatmosphäre, während er in dem Plastikgehäuse allseitig mit einem Kunststoff umpreßt ist. Temperaturänderungen und unterschiedliche Temperatúrausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien können zu Rissen in der Umhüllung führen, wodurch ihre Dichtigkeit verloren geht. Bei plastikgekapselten Bauelementen kommt hinzu, daß das Material Wasserdampf aufnimmt und wieder abgibt. Erreicht die Feuchtigkeit die Chipoberfläche, so kann sie durch eine anodische oder kathodische Oxidation zerstört werden.

Relative viele Ausfälle gehen auf eine fehlerhafte Verbindung zwischen dem Halbleiter und den Anschlüssen zurück. Die Bonddrähte können reißen, von der Metallisierung abheben und zu Unterbrechungen oder Kurzschlüssen führen. Wird ein Golddraht auf eine Metallisierung aus Aluminium aufgebracht, so sind zwei unterschiedliche Materialien zu verbinden. Hohe Temperaturen an der Anschlußstelle begünstigen die sogenannte Goldpest. Die Gold-Aluminium-Verbindung ist so spröde, daß die Bondstelle schon bei einer geringen Beanspruchung bricht.

Wird der Halbleiterchip unsachgemäß auf dem Gehäuseboden befestigt, so kann er infolge mechanischer Spannungen reißen. Die Oxidschicht, welche die aktiven Teile der Schaltung von den Leiterbahnen isoliert, kann schon fehlerhaft gefertigt sein oder durch eine elektrostatische Entladung zerstört werden. Eine zu hohe Stromdichte führt zu einem Massentransport in den Leiterbahnen. Deren Material (Aluminium) wandert von der Stelle des tieferen Potentials zu der des höheren (Elektromigration). Dabei nimmt einerseits der nutzbare Leiterquerschnitt ab (eventuell Ausfall durch Unterbrechung), andererseits wachsen an den Endpunkten des Materialtransports Whisker, die zu Kurzschlüssen führen können.

Die Feuchte, die Temperatur und die elektrische Beanspruchung sind auch Streßparameter für die übrigen in der Elektronik benutzten Bauteile wie Widerstände, Kondensatoren und Induktivitäten.

#### 4.2 Ermittlung der Ausfallraten

Die Ausfallraten werden aus Lebensdauer-Untersuchungen gewonnen. Ein Schätzwert  $\hat{\lambda}$  ergibt sich aus Gl.(3.204)

$$\hat{\lambda} = \frac{k}{nt_k}, \quad (4.2)$$

in der  $n$  die Zahl der eingesetzten,  $k$  die der ausgefallenen Elemente und  $t_k$  die Zeit bis zum Ausfall der  $k$ -ten Einheit (Betriebszeit) bedeuten.

#### 4.2.1 Laboruntersuchungen

Lebensdauertests lassen sich im Labor und im Prüffeld durchführen. Dabei sind die Versuchsbedingungen, wie z.B. die thermische und elektrische Belastung und die Umgebungseinflüsse, genau bekannt. Nachteilig ist, daß sehr viele Bauelementestunden  $nt_k$  notwendig sind, um die niedrigen Ausfallraten der modernen Bauelemente zu bestimmen. So waren unter den Annahmen des Beispiels 3.9.3 insgesamt  $11,9 \cdot 10^7$  Bauteilestunden notwendig, um für die Ausfallrate eine obere Grenze  $\lambda_0 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ h}^{-1}$  mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 0,75 angeben zu können. Ein derartiger Versuch dauert entweder zu lange oder ist wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen.

Aus diesem Grunde werden - wie später noch erläutert wird - die Tests bei erhöhten Temperaturen durchgeführt. Die von der Temperatur abhängigen Schadensmechanismen wirken sich früher aus; die Lebensdauern und die zu ihrer Bestimmung notwendigen Zeiten sind kürzer. Anschließend kann dann auf die bei Normaltemperatur zu erwartende Lebensdauer zurückgerechnet werden. Dieser Schluß ist allerdings mit einigen Unsicherheiten behaftet.

Die in Labortests ermittelten Ausfallraten enthalten die Frühausfälle der Bauelemente. Der Bereich der konstanten Ausfallrate wird unter Umständen überhaupt nicht erreicht.

#### 4.2.2 Auswertung von Felddaten

Vorgehensweise. Hersteller und Betreiber von Meß- und Automatisierungseinrichtungen führen umfangreiche Betriebs-, Schadens- und Reparaturstatistiken. Diese informieren über die Zahl der in einem System (z.B. Kommunikationsnetz) oder in einer Anlage (z.B. Kraftwerk, Chemiebetrieb) eingesetzten Geräte, über die in diesen Geräten verwendeten Bauelemente und deren Betriebszeiten. Außerdem werden die ausgefallenen und reparierten Bauelemente benannt. Statistisch gesehen stehen hier Stichproben mit sehr vielen Elementen zur Verfügung, so daß sich im Prinzip auch niedrige Ausfallraten mit nur geringen Unsicherheiten gewinnen lassen.

Bei der Auswertung von Betriebserfahrungen ist im allgemeinen die jeweilige elektrische oder thermische Belastung der Bauelemente nicht bekannt. Damit läßt sich der Einfluß dieser Größen auf die Ausfallrate nicht bestimmen und es werden nur über die einzelnen Betriebsbedingungen gemittelte Ausfallraten erhalten.

Problematisch ist weiterhin, daß bei dieser Art Lebensdauertest nur die Komponentenausfälle erfaßt und in die Ausfallrate eingerechnet werden, die zuvor ein Versagen der Gerätefunktion zur Folge hatten und erkennbar geworden sind. Andernfalls hätte ja kein Grund bestanden, sich mit dem Gerät zu beschäftigen oder es zu reparieren. Selbst wenn die Schadens- und Reparaturberichte korrekt geführt sind, können so systematische Fehler entstehen. Insbesondere wird die Zahl  $k$  der ausgefallenen Einheiten nicht exakt ermittelt. Dabei treten gegenläufige Effekte auf. Die einen täuschen eine zu niedrige, die anderen eine zu hohe Zahl von Ausfällen vor /4.14/.

Effekte, die die Zahl der Ausfälle unterbewerten. Die Zahl der Bauelementeausfälle wird unterschätzt, da nicht jeder Bauelementeausfall einen Geräteausfall nach sich zieht. In die Statistiken werden aber nur die Bauelementeausfälle aufgenommen, die vorher ein Versagen der Gerätefunktion zur Folge hatten. Die anderen bleiben unentdeckt und gehen nicht in die Berechnung der Ausfallrate ein. Wie Ausfalleffektanalysen zeigen, können mehr als ein Drittel aller Bauteileausfälle unerkannt bleiben (Tabelle 6.1). Die wichtigsten Gründe hierfür sind:

- nicht alle der in einem Gerät enthaltenen Bauelemente sind beim jeweiligen Anwendungsfall im Einsatz. Manche Geräte enthalten mehrere mögliche Empfindlichkeits-, Meß- oder Zeitbereiche, von denen jeweils nur einer angewählt ist. Mehr noch läßt sich bei Steuerungssystemen beobachten, daß nicht alle Funktionen einer Baugruppe ausgenutzt, nicht alle Ein- oder Ausgänge beschaltet werden. Der Ausfall eines Bauelements in einem nicht genutzten Geräteteil wird nicht bemerkt.

- die Teilausfälle wirken sich nur sehr unterschiedlich aus. Hier hängt es von der jeweiligen Schaltung ab, ob die Änderung eines Bauelementparameters zu einem Ausfall der Schaltung führt. Diese erfüllt unter Umständen noch ihre Aufgabe, obwohl bei einer Einzelprüfung das Bauelement als ausgefallen erkannt werden würde. Ein Widerstand in einem UND-Gatter darf zum Beispiel seinen Wert um mehr als 30 % ändern, ohne daß das Gatter funktionsunfähig wird. Werden die Silber-Nickel-Kontakte eines Relais oder Koordinatenschalters mit einer Spannung von 60 V anstelle von 10 V abgefragt, so reduzieren sich die Kontaktstörungen um den Faktor 20 /4.15/.

- Ein Teil der Bauelemente eines Geräts legt das dynamische Verhalten fest. Ein Ausfall einer hierfür benutzten Komponente führt unter Umständen zu einer

anderen Zeitkonstante oder Schaltzeit, beeinträchtigt aber nicht die sonstige Funktion und bleibt somit unentdeckt.

- Weiter werden Bauelemente zur Verbesserung der elektromagnetischen Verträglichkeit eingesetzt, wie z.B. Überspannungsableiter, Schutzdioden, Strombegrenzungswiderstände oder Kondensatoren. Diese Bauelemente können defekt sein, ohne daß die Schaltung ausfällt. Die defekten Bauelemente erscheinen nicht in den Reparaturprotokollen.

- Schwierig sind auch die Ausfälle zu entdecken, die im Meldeteil der eingesetzten Geräte liegen. Der Ausfall der Überwachungseinrichtung bleibt häufig so lange unbemerkt, so lange nicht ein Ansprechen der überwachten Funktion notwendig ist.

- Bauelementeausfälle in logischen Schaltungen führen dazu, daß der Signalausgang ständig auf hohem oder tiefem Potential liegt. Ein derartiger Ausfall wird erst bei einem notwendigen Signalwechsel gefunden.

Effekte, die die Zahl der Ausfälle überbewerten. Die Angabe einer von der Zeit unabhängigen Ausfallrate setzt Zufallsausfälle voraus. Die Reparaturberichte geben aber nicht immer die Ausfallursache an oder sie klassifizieren nach anderen Kriterien. So unterscheiden einige - um die Frage der Gewährleistung zu klären - nur zwischen Ausfällen, die der Hersteller zu vertreten hat und solchen, die zu Lasten des Anwenders gehen. Die für unsere Aufgabenstellung wichtigen deterministischen Ausfallursachen, wie zum Beispiel Ausfälle infolge

- einer fehlerhaften Auslegung,
- einer schlechten Fertigung,
- einer unzulässigen Anwendung,
- eines falschen Einsatzes und
- einer unsachgemäßen Behandlung

werden nicht hervorgehoben und sind im allgemeinen in die Ausfallrate eingerechnet.

Davon sind insbesondere die Behandlungsfehler nicht zu vernachlässigen. Analysen von reparierten Leiterplatten zeigen, daß die an den Ein- und Ausgängen einer Schaltung sitzenden Transistoren bis zu 8 mal häufiger ausfallen als die dazwischen liegenden. Die defekten Transistoren sind in der Regel durch Überlastung zerstört und es darf angenommen werden, daß ein Großteil dieser Überlastungen auf versehentliche Kurzschlüsse bei der Fehlersuche zurückgeht /4.16/. Ein ähnliches Ergebnis

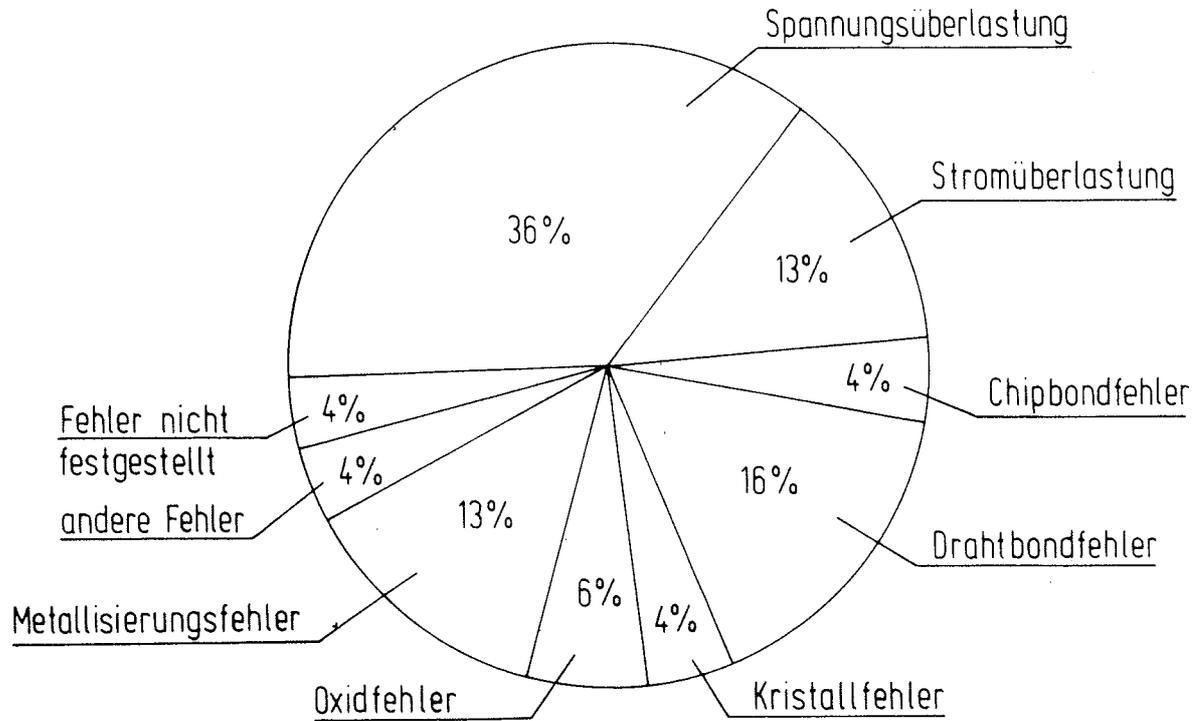


Bild 4.3: Aufteilung der Fehler bei ausgefallenen integrierten Schaltkreisen /4.17/;  
49 % der Ausfälle hat der Anwender, 47 % der Hersteller zu vertreten

zeigt die Fehleranalyse von ausgefallenen integrierten Halbleiterschaltungen (Bild 4.3). Hier läßt sich ungefähr die Hälfte aller Ausfälle auf eine Spannungs- oder Stromüberlastung zurückführen. Diese ist von dem Anwender und nicht von dem Bauelementhersteller zu vertreten /4.17/.

Weitere, nicht probabilistische Ausfallursachen sind

- Folgeausfälle und
- unnötig ausgewechselte Bauelemente.

Die Folgeausfälle werden nicht immer als solche erkannt und damit als unabhängige Zufallsausfälle gewertet. Zur Beschleunigung von Reparaturen werden häufig die Fehler nicht genau lokalisiert und Bauelemente werden ersetzt und in den Reparaturstatistiken geführt, ohne daß sie ausgefallen waren.

Eingrenzung der Unsicherheiten. Die Frage entsteht, ob die erwähnten gegenläufigen Effekte sich kompensieren, oder ob eine systematische Fehleinschätzung in der einen oder anderen Richtung übrig bleibt. Als Antwort kann für den Bereich der Steuerungstechnik in Kraftwerken auf umfangreiche Untersuchungen zurückgegriffen werden.

In den Kraftwerken Pleinting und Schwandorf, die mit den Baugruppen des Steuerungssystems Geamatic ausgerüstet sind, und in dem Kraftwerk Aschaffenburg, welches das Decontic Steuerungssystem enthält, wurden alle eingesetzten Baugruppen nach einer fünfjährigen Betriebszeit ausgebaut und mit Hilfe eines Prüfautomaten sorgfältig durchgemessen /4.18, 4.19/. Der Prüfumfang war dem bei der Fertigungsendkontrolle vergleichbar. Bei dieser generellen Untersuchung wurden rund noch einmal soviele Fehler gefunden wie in den vorausgegangenen fünf Jahren insgesamt aufgetreten waren. Dieses Ergebnis läßt den Schluß zu, daß über alle Bauelemente gemittelt, höchstens die Hälfte der Ausfälle unentdeckt bleiben. Die aus den Betriebserfahrungen gewonnenen Ausfallraten sind also im Schnitt um den Faktor 2 zu niedrig. Dieser Faktor dürfte bei Dioden größer, bei Transistoren geringer sein.

#### 4.2.3 Ausfallraten für neue Produkte

Bei neuen Produkten liegen zunächst noch keine Lebensdauertests vor. Hier können Erfahrungen, die an bereits eingesetzten Produkten gewonnen wurden, auf die neu entwickelten oder gefertigten übertragen werden. Dies ist jedoch nur zulässig, wenn die Bauelemente strukturell ähnlich sind. Im einzelnen sind dabei die in der Tabelle 4.2 erwähnten Parameter zu beachten.

### 4.3 Einflußgrößen der Ausfallrate

Die Ausfallrate eines Bauteils hängt von verschiedenen Größen wie zum Beispiel von

- der Vorbehandlung und Selektion,
- der Temperaturbelastung,
- der elektrischen Beanspruchung und
- den Umweltbedingungen

ab. Diese Einflüsse werden in diesem Abschnitt diskutiert. Dabei wird dem Modell des MIL HDBK 217 D /4.1/ gefolgt, das wahrscheinlich die umfangreichste Sammlung von Ausfallraten darstellt. Dort sind die Einflußgrößen als Faktoren einer Basis-Ausfallrate angegeben. Mit den Bezeichnungen

$\lambda_b$  Basisausfallrate

$\pi_Q$  Qualitätsfaktor (Vorbehandlung und Selektion)

$\pi_T$  Temperaturfaktor

Tab. 4.2 Definition der strukturellen Ähnlichkeit /4.2/

Komponente	Parameter	strukturell ähnlich, wenn
Chip	Technologie (BIP, MOS)	gleich
	Design	gleich
	Metallisierung	gleich
	Eingangsschutzstruktur	gleich
	Passivierungsverfahren	gleich
	Betriebsspannung	gleich
	Chipfläche	Unterschied $\leq 50 \%$
	Anzahl der Transistorfunktionen	Unterschied $\leq 50 \%$
Aufbau	Chipbefestigung (kleben, legieren)	gleich
	Kontaktierung (Materialart, Durchmesser, Kontaktierart)	gleich
		gleich
Gehäuse	Anschlüsse (Material, Oberfläche)	gleich
	Anschlüsse Anzahl	$\leq$ Leittyp
	Gehäusematerial (Plastik, Keramik)	gleich
	Verschlußmaterial und -technik bei Hohlraumgehäusen	gleich

$\pi_p$  Streßfaktor, elektrische Belastung

$\pi_E$  Einfluß der Umgebungsbedingungen (environment)

ergibt sich die Ausfallrate  $\lambda$  einer Komponente zum Beispiel aus der Rechenvorschrift

$$\lambda = \lambda_b \pi_Q \pi_A \pi_T \pi_P \pi_E \cdot \pi_L \quad (4.3)$$

#### 4.3.1 Vorbehandlung und Selektion; quality factor

Qualitätssicherung, Qualitätsklassen. Die Bauelemente werden nach firmeninternen oder firmenübergreifenden Spezifikationen gefertigt. Die Herstellerfirmen haben dabei Qualitätssicherungssysteme eingerichtet, um Produkte mit gleichbleibend guter Qualität liefern zu können. Diese hängt ab von

- dem Entwurf,
- der Konstruktion,
- dem Material,
- der Herstellung und Verarbeitung,
- der Lagerung,
- und dem Transport.

Mängel in der Fertigung können den Keim zu einem verfrühten Ausfall der Bauelemente legen. Im Prinzip können die in der Tabelle 4.1 angesprochenen Fehlermöglichkeiten auftreten.

Durch eine gezielte Vorbehandlung und Prüfung wird versucht /4.20 - 4.27/, die vorgeschädigten Bauelemente zu finden und vor der Lieferung an den Kunden auszuwählen. Die Schärfe der Prüfung (screening) richtet sich dabei nach der für das Lieferlos angestrebten Zuverlässigkeit. Für Einzelhalbleiter zum Beispiel sind in der MIL Spezifikation STD-750 fünf Qualitätsstufen (quality levels) definiert. "P1" steht für Plastik-gekapselte Bauelemente; "L" für "lower", für normale Handelsware. Mit dem patentrechtlich geschützten Warenzeichen JAN dürfen die Produkte nur gestempelt werden, wenn

- die Bauelemente in ihren elektrischen, mechanischen und physikalischen Eigenschaften bestimmten MIL-Spezifikationen genügen,
- der Hersteller sich generell für die Fertigung der Bauteile qualifiziert hat und
- die Prüfung auf Übereinstimmung mit der geforderten Qualität stichprobenartig an dem Lieferlos durchgeführt ist.

Die bessere Qualitätsstufe JAN TX (testing extra) verlangt vor Auslieferung einen Betrieb bei erhöhten Temperaturen (burn in) und eine gezielte Auswahlprüfung nicht nur stichprobenartig, sondern an allen zu liefernden Bauteilen. Die Sichtprüfung vor dem Verschließen der IC's (visual precup inspection) kommt bei den TXV-Typen noch hinzu.

Ähnliche Qualitätsstufen sind auch für andere Bauelemente definiert. In der Tabelle 4.3 sind die jeweils anzuwendenden Spezifikationen, die darin erklärten Qualitätsklassen und die zugehörigen  $k_Q$ -Faktoren zusammengestellt. Diese Faktoren sind auf die höchste Qualitätsklasse bezogen. Die Ausfallrate eines plastikgekapselten Transistors ist also 10 mal so groß wie die eines Transistors mit der Qualitätsstufe JAN und dessen ist nochmals um den Faktor 10 größer als eines Transistors der Klasse JAN TXV.

Tab. 4.3 Normierte Qualitätsfaktoren  $k_Q$  nach MIL HDBK 217 D (1982). Die Zahlenwerte gelten nicht absolut, sondern sind auf die höchste Qualitätsklasse bezogen /4.20/.

Bauelement und Spezifikation	Qualitätsklassen und Qualitätsfaktoren									
Monolithische integrierte Schaltungen (MIL-M-38510, MIL-STD-883)	S 1	B 2	B-0 4	B-1 6	B-2 13	C 16	C-1 26	D 35	D-1 70	
Hybride integrierte Schaltungen (MIL-M-38510, MIL-STD-883)		B 1						D 60		
Diskrete Halbleiterbauelemente (MIL-S-19500, MIL-STD-750)		JANTXV 1	JANTX 2	JAN 10	Lower 50	Plastic 100				
Widerstände (ohne Pot.) (MIL-STD-199, MIL-STD-202)	S 1	R 3.3	P 10	M 33	NE 165	Lower 500				
Kondensatoren (MIL-STD-199, MIL-STD-202)	S 1	R 3.3	P 10	M 33	L 50	NE 100	Lower 333			

Die Tabelle 4.4 informiert über die bei den einzelnen Qualitätsklassen notwendige Vorbehandlung. Einige der dabei durchzuführenden Schritte werden im folgenden kurz erläutert.

Hochtemperaturlagerung. Die Hochtemperaturlagerung dient zur Stabilisierung der elektrischen und mechanischen Parameter. Die Bauelemente liegen mit den Anschlüssen auf einer Metallplatte in Wärmeschränken, ohne daß sie elektrisch betrieben werden.

Thermische Zyklen. Bei dieser Prüfung werden die Bauelemente Temperaturänderungsgeschwindigkeiten von mindestens 50°C/min ausgesetzt. Sie werden dadurch mechanisch beansprucht. Durch das unterschiedliche Wärmeleitungsvermögen und durch die unterschiedlichen Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Werkstoffe bauen sich mechanische Spannungen auf, welche die Schwachstellen in den Strukturen zerstören. Um diese Prüfung durchzuführen, sind Wärmeschränke mit zwei getrennten

Tab. 4.4 Verfahren zur Vorbehandlung von integrierten Schaltkreisen und diskreten Halbleiterbauelementen /4.20/

Vorbehandlung	Integrierte Schaltungen (MIL-STD-883)			Diskrete Halbleiterbauelemente (MIL-STD-750)	
	S	B	C	JAN TXV	JAN TX
Interne visuelle Kontrolle	100 %	100 %	100 %	100 %	-
Hochtemperaturlagerung	24 h/150°C	24 h/150°C	24 h/150°C	24 h/T <sub>max</sub>	24 h/T <sub>max</sub>
Thermische Zyklen	10 x -65/+150°C	10 x -65/+150°C	10 x -65/150°C	20 x T <sub>extr.</sub>	20 x T <sub>extr.</sub>
Konstante Beschleunigung	30000g/60s	30000g/60s	30000g/60s	20000g/60s	20000g/60s
Dichtigkeit (Fine/Gross Leak)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Teilchen Detektion	100 %	-	-	-	-
Reduzierte el. Prüfung	100 %	-	-	-	-
Hochtemp.-Rückw.-Bias (HRTB)	72 h/150°C	-	-	48 h/150°C	48 h/150°C
Reduzierte el. Prüfung	100 %	100 %	-	100 %	100 %
Burn in	249 h/125°C	160 h/125°C	-	168 h/T <sub>max</sub>	168 h/T <sub>max</sub>
Röntgenaufnahme	100 %	-	-	-	-
Externe visuelle Kontrolle	100 %	100 %	100 %	-	-

Kammern notwendig. Das Prüfgut kann dann direkt von der heißen Kammer in die kalte und umgekehrt gebracht werden (Zwei-Kammer-Schocktest). Manchmal werden auch zwei auf unterschiedlichen Temperaturen befindliche Flüssigkeitsbäder verwendet, in die das Prüfgut abwechselnd eingetaucht wird (Flüssigkeits-Schocktest).

Burn in. Der burn in ist eine Kombination von Hochtemperaturlagerung und elektrischem Betrieb. Ziel dieses Schrittes ist, durch die erhöhte Temperatur zeitraffend Frühausfälle hervorzurufen. Diese Prüfung ist zwar relativ aufwendig, aber sehr effektiv.

Konstante Beschleunigung. Dieser Schritt wird praktisch nur bei IC's in Keramikgehäusen durchgeführt. Er soll die mechanische Festigkeit der Anschlußdrähte, der Kontaktierung und der Verbindung zwischen Kristall und Gehäuse prüfen. Die IC's werden dabei in eine Zentrifuge gelegt und für eine Minute der angegebenen Beschleunigung ausgesetzt.

Dichtigkeitsprüfung. Auch dieses Verfahren wird nur bei IC's in Keramikgehäusen durchgeführt. Bei der Feinprüfung (fine leak) werden die gekapselten IC's zunächst für eine Stunde in eine Vakuumkammer mit einem Druck von 0,5 mmHg gelegt und dann 20 Stunden lang in einer Heliumatmosphäre von 5 bar gelagert. Nach einer Wartezeit in Luft von ca. 30 Minuten wird dann im Vakuum mit einem Massenspektrometer das ausfließende Helium gemessen und die Undichtigkeit wird bestimmt. Bei der Grobprüfung (gross leak) liegen die IC's zunächst eine Stunde lang in einer Unterdruckkammer mit einem Druck von etwa 5 mmHg, dann für drei Stunden in Fluorcarbon FC 72 bei einem Druck von 5 bar. Nach einer kurzen Wartezeit in Luft werden die IC's in ein Bad gelegt, wobei evtl. aufsteigende Blasen einen Ausfall kenntlich machen.

Wirksamkeit der verschiedenen Prüfungen. Die Bauelemente können aus verschiedenen Ursachen potentiell geschädigt sein. Um diese Schwachstellen zu finden, sind dann mehrere, unterschiedlich wirksame Tests erforderlich. Bei der Untersuchung von integrierten Schaltkreisen in Keramikgehäusen /4.21/ entdeckten die einzelnen Ver-

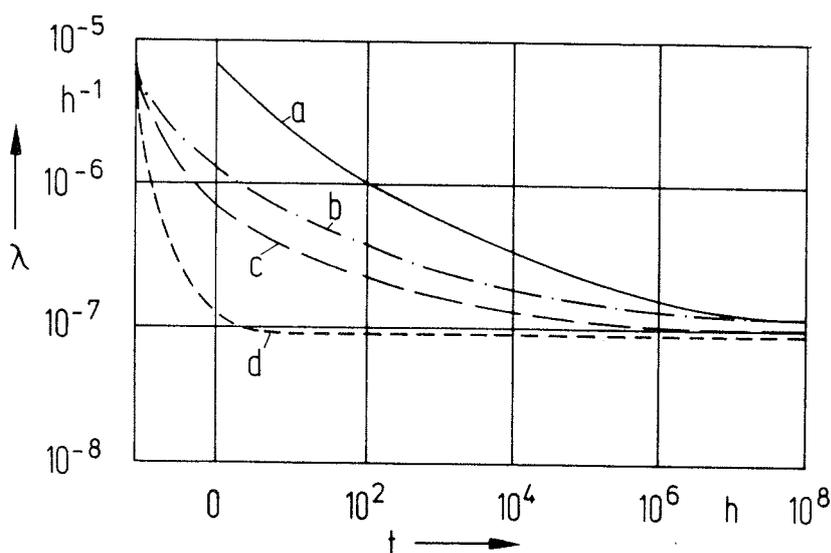


Bild 4.4: Einfluß der Vorbehandlung auf die Ausfallrate von integrierten Schaltkreisen /4.6/;

$t = 0$  Zeitpunkt der Auslieferung an den Kunden,

a ohne Vorbehandlung, b nur elektrische Tests,

c Hochtemperaturlagerung, Temperaturzyklen und elektrische Tests

d Hochtemperaturlagerung, Temperaturzyklen und burn in

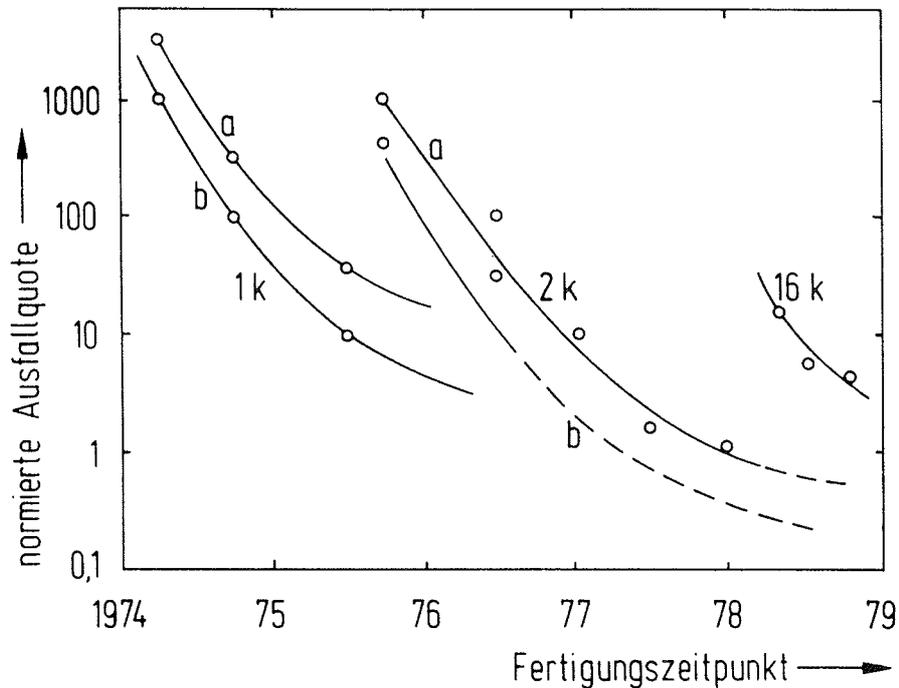


Bild 4.5: Lernkurve für LSI-Speicherschaltungen /4.28/;  
a ohne Vorbehandlung, b mit Vorbehandlung

fahrensschritte den folgenden Anteil von geschädigten Bauelementen:

Hochtemperaturlagerung	5 - 10 %
Thermische Zyklen	5 - 15 %
Burn in	50 - 70 %
Konstante Beschleunigung	5 - 10 %
Dichtigkeitsprüfung	10 - 20 %.

Bei einer sorgfältigen Vorbehandlung und Prüfung werden weitgehend alle geschädigten Bauelemente erkannt und eliminiert. Das dem Anwender gelieferte Los zeigt dann eine konstante, auf zufällig wirksam werdende Mechanismen zurückgehende Ausfallrate (Bild 4.4).

#### 4.3.2 Learning Factor

Es zeigt sich, daß nicht schon im ersten Versuch zuverlässige Elemente gefertigt werden können. Zunächst sind Störungen und Unvollkommenheiten in der Produktion zu erwarten, die durch die Qualitätsüberwachung erkannt und beseitigt werden. Mit zunehmender Erfahrung steigt die Zuverlässigkeit der Bauelemente und ihre Ausfallrate nimmt ab. Bei einer wesentlichen Änderung im Entwurf oder in der Technologie erfolgt

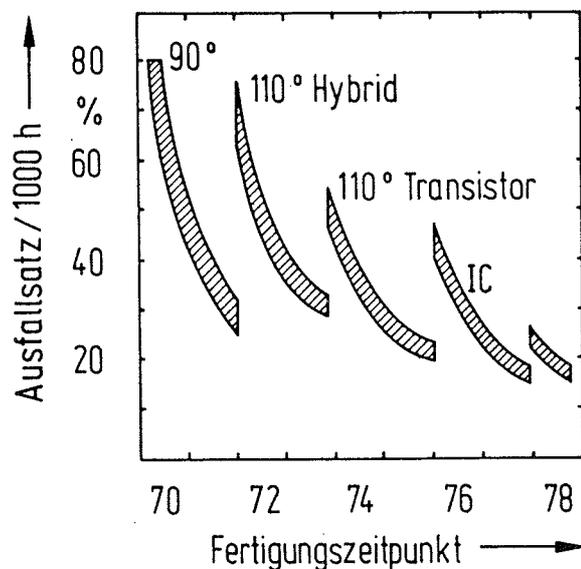


Bild 4.6: Lernkurve bei der Fertigung von Farbfernsehgeräten /4.29/

dann oft ein Rückschlag. Die Qualität der Produkte ist wieder schlechter, bis sie auch hier wieder in mehreren Schritten verbessert wird. Im allgemeinen entstehen die Sägezahn-Kurven von den Bildern 4.5 und 4.6.

Dieser Lerneffekt ist in der Ausfallratensammlung des MIL-Handbuchs durch den Learning-Factor  $k_L$  berücksichtigt, der unter gewissen Bedingungen bei integrierten Schaltkreisen den Wert 10 hat.

#### 4.3.3 Temperatureinfluß

Arrhenius-Gleichung. Die Geschwindigkeit vieler Prozesse, die zu einem Ausfall führen, steigt exponentiell mit der Temperatur. Für die Reaktionsrate  $r$  gilt die von Arrhenius gefundene Beziehung, in der  $A$  eine Konstante,  $E$  die Aktivierungsenergie (Ws),  $T$  die absolute Temperatur (K) und  $k$  die Boltzmann-Konstante  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Ws/K ist:

$$r = A e^{-E/kT} \quad (4.4)$$

Die Ausfallrate  $\lambda$  ist proportional der Reaktionsrate  $r$ . Mit dem Proportionalitätsfaktor  $B$  entsteht

$$\lambda = B e^{-E/kT} \quad (4.5)$$

$$\ln \lambda = \ln B - E/kT. \quad (4.6)$$

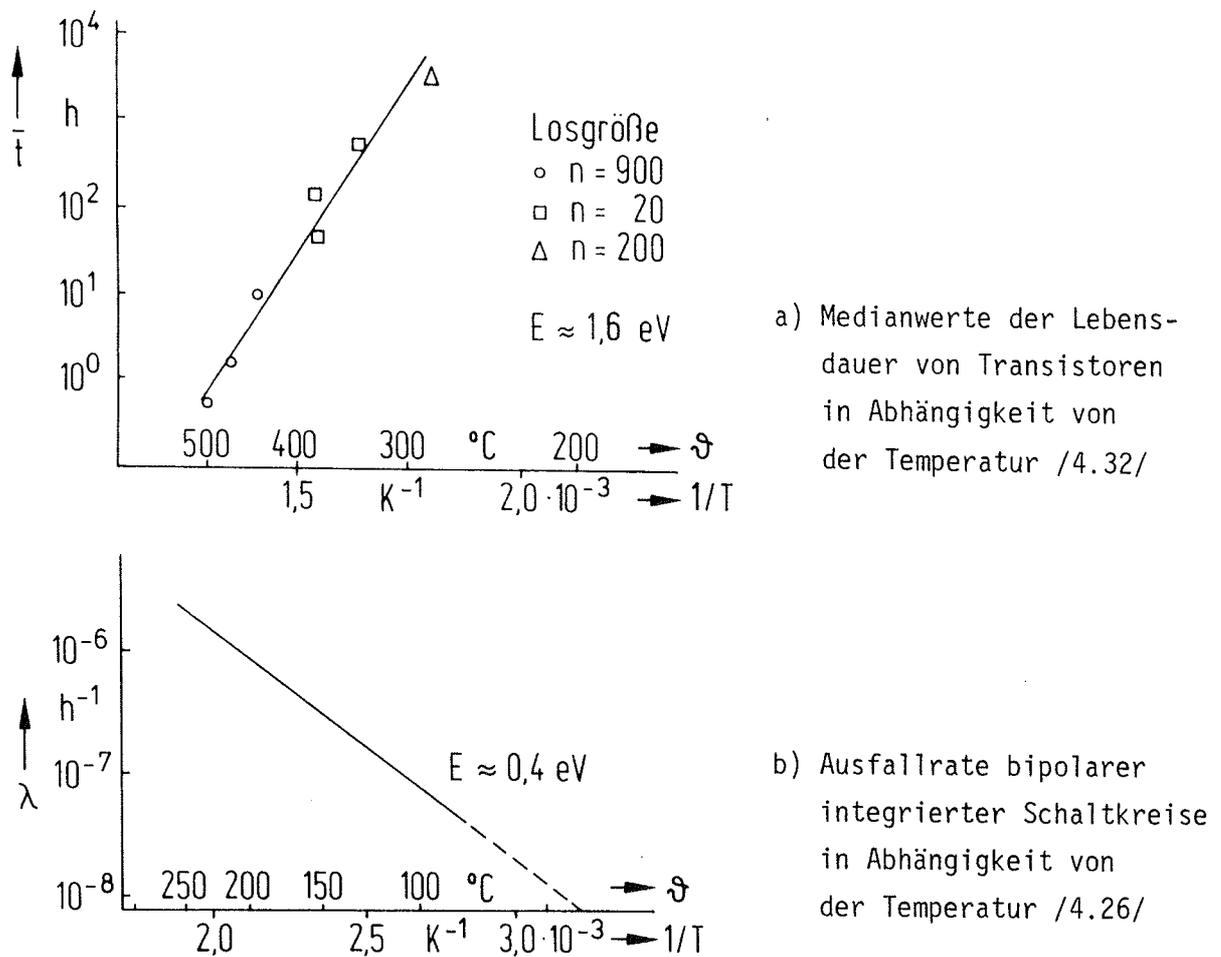


Bild 4.7: Grafische Darstellung des Gesetzes von Arrhenius

Wird anstelle der Ausfallrate die mittlere Lebensdauer  $\bar{t}$  eingeführt, so folgt

$$\ln 1/\bar{t} = -\ln \bar{t} = \ln B - E/kT \quad (4.7)$$

$$\ln \bar{t} = -\ln B + E/kT. \quad (4.8)$$

Die in den obigen Gleichungen stehenden Konstanten B und E sind für die einzelnen Bauelemente durch Versuche zu ermitteln. Dazu werden verschiedene Lose bei verschiedenen Temperaturen betrieben. Für jedes Los wird die mittlere Lebensdauer oder die Ausfallrate bestimmt. Werden diese Werte in Abhängigkeit von  $1/T$  in einem Koordinatenpapier mit logarithmisch geteilter Ordinate eingetragen, so können die Meßpunkte für die mittleren Lebensdauern durch eine steigende, die für die Ausfallraten durch eine fallende Gerade ausgemittelt werden (Bild 4.7). Die Lage dieser Geraden liefert die Aktivierungsenergie E. Diese liegt für integrierte Schaltungen etwa zwischen 0,4 eV (TTL in Keramikgehäusen) und 0,9 eV (CMOS in Plastikgehäusen).

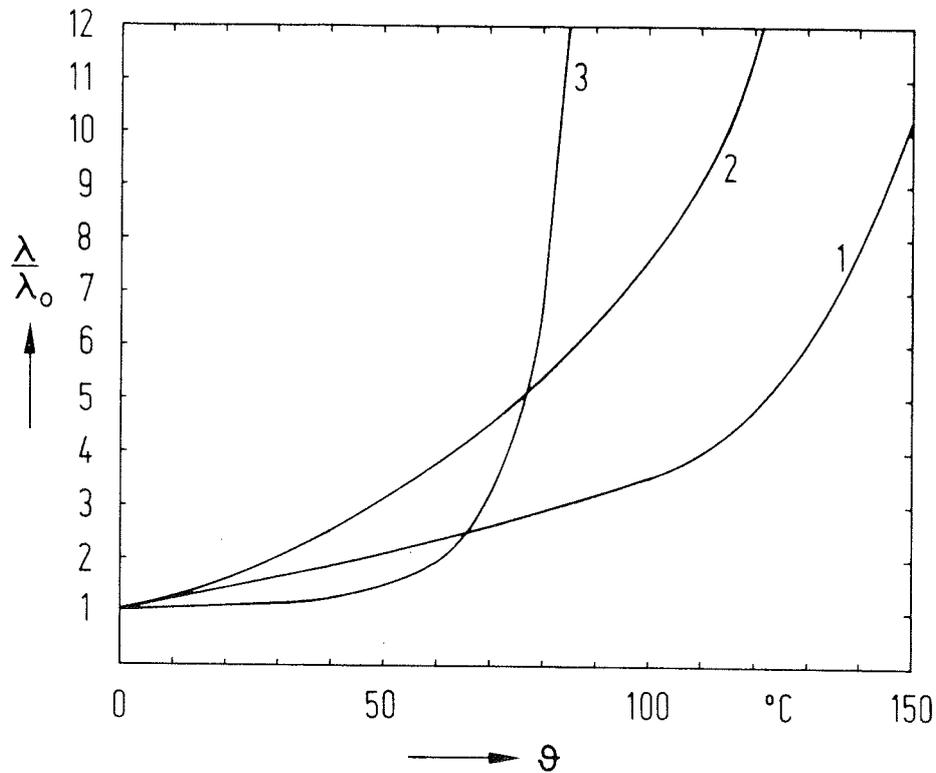


Bild 4.8: Relative Zunahme der Ausfallrate mit der Temperatur /4.1/  
 1 Silicium-PNP-Transistoren (Tab. 5.1.3.1-8)  
 2 Silicium-Dioden (Tab. 5.1.3.4-7)  
 3 Kondensatoren (Tab. 5.1.7.1-5)

Infolge dieser temperaturabhängigen Effekte nimmt die Ausfallrate bei Halbleitern mit der Temperatur zu (Bild 4.8 und 4.9). Dieser Anstieg ist besonders groß bei plastikgekapselten CMOS-IC's.

Beschleunigungsfaktor. Ist die Aktivierungsenergie  $E$  für eine Bauelementart bekannt, so läßt sich die in einem zeitraffenden Test bei erhöhter Temperatur ermittelte Ausfallrate  $\lambda_2$  auf die Ausfallrate  $\lambda_1$  bei niedrigerer Temperatur umrechnen. Der Beschleunigungsfaktor  $F$

$$F = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = e^{-\frac{E}{k} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad (4.9)$$

hängt von der Höhe und der Differenz der Temperaturen  $T_2$  und  $T_1$  ab. Nimmt die Temperatur von  $45^\circ \text{C}$  auf  $100^\circ \text{C}$  zu, so steigt die Ausfallrate der integrierten Schaltkreise von Bild 4.7b um den Faktor 7, bei einer Temperaturzunahme von  $100^\circ \text{C}$  auf  $150^\circ \text{C}$  um den Faktor 5.

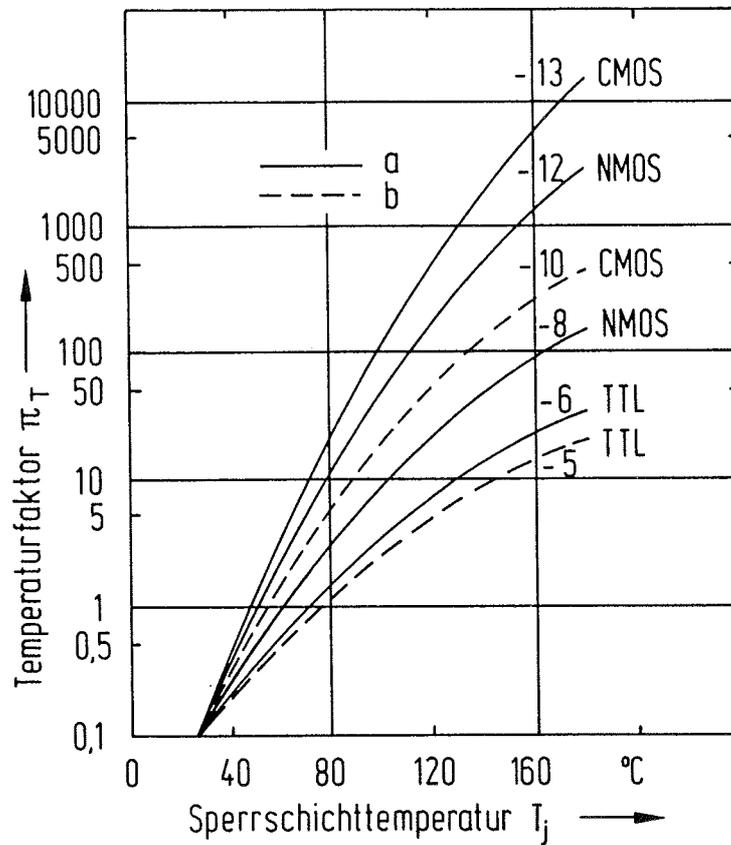


Bild 4.9: Temperaturfaktor  $\pi_T$  in Abhängigkeit von der Sperrschichttemperatur  $T_j$  für integrierte Schaltkreise /4.1, 4.20/.

a nonhermetic package (Plastik),

b hermetic package (Keramik oder Metall);

die in der Abbildung angegebenen Zahlen -xx sind die Endziffern der Tabellen 5.1.2.5-xx des MIL-Handbuchs.

Der Temperaturfaktor  $\pi_T$  steigt mit der Sperrschichttemperatur  $T_j$  nach der Beziehung

$$\pi_T = 0,1 e^{-x} \quad \text{mit } x = -A \left( \frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{279} \right)$$

$T_j$  Sperrschichttemperatur in °C

A Konstante aus der untenstehenden Tabelle (5.1.2.5-4):

	CMOS	NMOS	PMOS	LSTTL	TTL
hermetic	7532	6373	5794	5794	4635
nonhermetic	10429	9270	8111	6373	5214

Die Angabe eines Beschleunigungsfaktors ist nur dann sinnvoll, wenn die Ausfallmechanismen über den gesamten betrachteten Temperaturbereich die gleichen bleiben. Mit steigender Temperatur dürfen weder neue Ausfallursachen entstehen, noch dürfen bestehende Ursachen verschwinden. Die Extrapolation der bei erhöhten Temperaturen ermittelten Lebensdauern birgt also gewisse Unsicherheiten. Trotzdem kann auf diese zeitraffenden Tests bei erhöhten Temperaturen nicht verzichtet werden. Sie sind notwendig, um im Prüffeld die geringen Ausfallraten der elektronischen Bauelemente bestimmen zu können.

Sperrschichttemperatur. Die für den Ausfall der Halbleiter-Bauelemente maßgebende Temperatur ist die der Sperrschicht. Die Sperrschichttemperatur  $T_j$  läßt sich aus der Umgebungstemperatur  $T_u$  und aus der im Bauelement umgesetzten elektrischen Leistung  $P = UI$  ermitteln, wenn der thermische Widerstand  $R_{ju}$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ) zwischen Sperrschicht und der umgebenden Luft bekannt ist:

$$T_j = T_u + R_{ju} P . \quad (4.10)$$

Der thermische Widerstand kann den Datenblättern entnommen werden (Tab. 4.5). Bei integrierten Schaltkreisen wird er in der Regel für die Sperrschichten in der wärmsten Zone des IC's, z.B. in der Nähe der Ausgangsstufe, angegeben. Hat ein Transistor einen Wärmewiderstand  $R_{ju} = 450^{\circ}\text{C}/\text{W}$ , beträgt die Sperrschichttemperatur bei einer Umgebungstemperatur  $T_u = 70^{\circ}\text{C}$  und bei einer im Transistor umgesetzten Leistung  $P = 0,2\text{ W}$

$$T_j = 70^{\circ}\text{C} + 450 \cdot 0,2^{\circ}\text{C} = 160^{\circ}\text{C} . \quad (4.11)$$

Im Interesse der Zuverlässigkeit empfiehlt es sich, durch eine geringe elektrische Belastung und durch eine gute Wärmeableitung die Temperatur der Bauelemente niedrig zu halten. Die Ausfallraten der Dioden verdoppeln sich bei einer Temperaturerhöhung um  $10^{\circ}\text{C}$ ; die der Transistoren nimmt etwas weniger stark zu.

Tab. 4.5 Richtwerte für den thermischen Widerstand  $R_{ju}$  verschiedener Gehäuse /4.2/.

Gehäuse	Zahl der Anschlüsse	$R_{ju}$
DIL	6 - 8	150 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$
DIL	14 - 18	90 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$
DIL	22 - 48	70 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$
T05		140 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$

#### 4.3.4 Elektrische Belastung

Die elektrische Belastung eines Bauelements führt im allgemeinen zu erhöhten Temperaturen und damit schon zu einer vergrößerten Ausfallrate. Darüberhinaus werden durch Spannungen und Ströme aber auch andere, nicht temperaturbedingte Ausfallmechanismen aktiviert.

Elektrische Feldstärke. Bei den dünnen Oxidschichten der MOS-Transistoren von etwa 50 nm führt eine Spannung von 10 V zu einer Feldstärke von 2 MV/cm. Diese kann das Oxid an vorgeschädigten Stellen zerstören. Die Ausfallrate, die proportional dem Spannungs-Streßfaktor  $\pi_V$  von Bild 4.10 ist, nimmt mit der Versorgungsspannung ab. Im Interesse einer langen Lebensdauer ist also eine niedrigere Versorgungsspannung wünschenswert.

Entladung statischer Elektrizität. Eine besondere Gefahr für die elektronischen Bauelemente liegt in der Entladung statischer Elektrizität (ESD electrostatic discharge) /4.33, 4.34/. Je nach Art der Kleidung und des Fußbodenbelags werden an einer sich bewegenden Person Ladungen bis zu einer Spannung von mehr als 1000 V getrennt (Bild 4.11). Berührt die Person ein Bauelement, so erfolgt eine Entladung, die das Bauelement zerstören kann. Eine Spannung von 100 V ist dabei schon ausreichend, um die Komponente bleibend und vollständig zu schädigen. Diese Art des Ausfalls tritt nicht nur bei MOS-IC's, sondern auch bei bipolaren Schaltungen auf. Untersuchungen an ausgefallenen bipolaren Operationsverstärkern z.B. ergaben als häufigste Ursache für den Ausfall die Entladung statischer Elektrizität /4.11, S. 98. 89/

Stromdichte. Stromdichten in der Größenordnung von  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> führen zur Elektromigration insbesondere an den Stellen, an denen unterschiedliche Materialien zusammentreffen. Die Ausfallrate steigt etwa mit dem Quadrat der Stromdichte /4.10/.

Erhöhung der Lebensdauer durch Unterlastung. Im Interesse einer langen Lebensdauer sind die Bauelemente unterhalb ihrer Nennwerte zu betreiben. Durch diese Unterlastung wird oft ein erheblicher Gewinn an Zuverlässigkeit erreicht. Ein Maß für die Unterlastung ist der "derating factor", der als Quotient zwischen der tatsächlichen Größe und ihrem Nennwert zu verstehen ist.

So sollen, um große Lebensdauern zu erzielen, die Bauelemente unterhalb ihrer Nennwerte betrieben werden. Die Bilder 4.7 und 4.10 veranschaulichen, wie durch eine gewollte Unterlastung ein erheblicher Gewinn an Zuverlässigkeit erreicht werden kann.

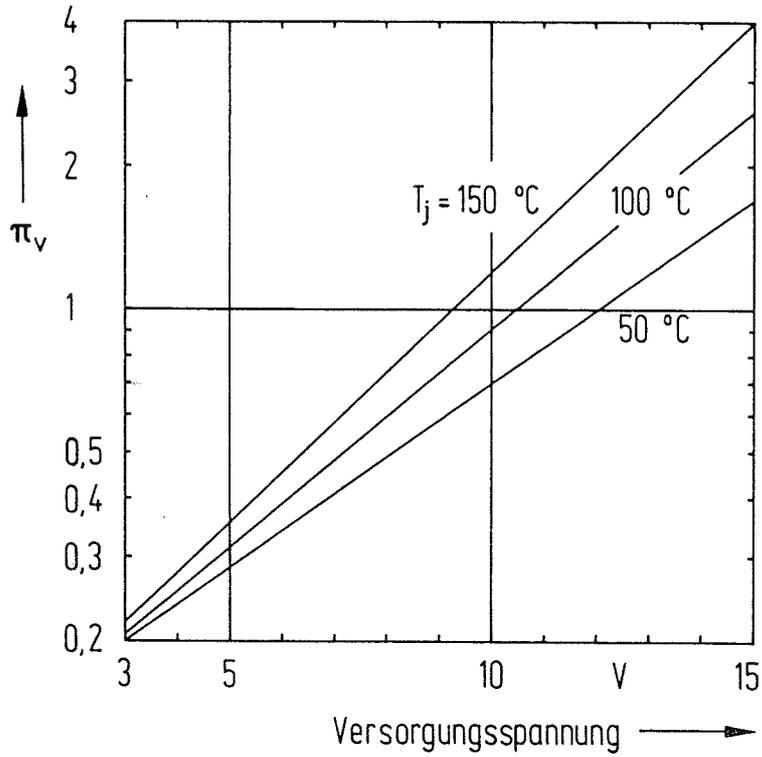


Bild 4.10: Spannungsfaktor  $\pi_V$  für CMOS-Schaltkreise mit Nenn-Versorgungsspannung zwischen 12 und 15,5 Volt (Tabelle 5.1.2.5-15 von /4.1/)

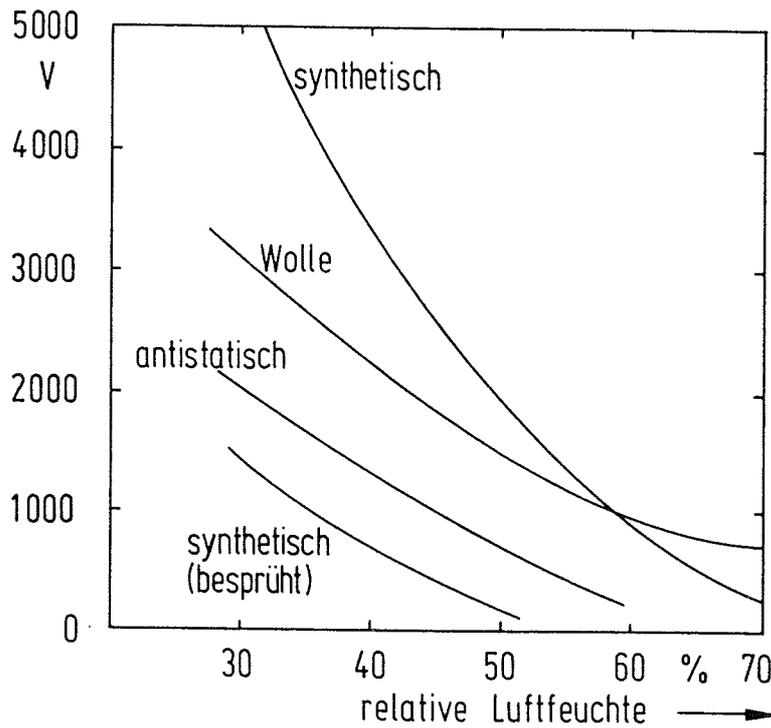


Bild 4.11: Elektrostatische Spannung, auf die sich eine Person während des Laufens über Teppiche verschiedener Stoffe aufladen kann /4.34/

Besonders effektiv ist die Unterlastung bei Komponenten, die einem Verschleiß unterliegen. Die Lebensdauer  $t$  von Glühlampen z.B. läßt sich aus der Nennlebensdauer  $t_0$ , der Nennspannung  $U_0$  und der Betriebsspannung  $U$  gemäß der folgenden Beziehung berechnen, wobei für den Exponenten  $n$  ein Zahlenwert zwischen 12 und 14 einzusetzen ist:

$$\frac{t}{t_0} = \left(\frac{U_0}{U}\right)^n. \quad (4.19)$$

Bei einer Unterlastung um 20 % steigt die Lebensdauer auf das 10-fache.

Die Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Unterlastung hat dann ihre Grenzen, wenn wegen der Unterlastung mehr Bauelemente eingesetzt werden müßten. In diesem Fall nimmt die Zuverlässigkeit infolge der gestiegenen Zahl von Komponenten wieder ab. Auch ist zu berücksichtigen, daß schwache Signale besonders leicht durch elektromagnetische Einstreuungen gestört werden können. Im Interesse einer sicheren Signalverarbeitung sollten die Signalpegel nicht zu niedrig gewählt werden. Weiterhin können insbesondere mechanische Teile bei einer Unter- oder Nichtbelastung ihre Funktionsfähigkeit verlieren. Längere Zeit nicht bewegte Wellen verschmutzen und werden schwergängig; nicht betätigte offene Kontakte oxidieren oder korrodieren. Höhere Spannungen oder Ströme sind dann notwendig, um die Schmutzschichten zu überwinden.

#### 4.3.5 Umgebungsbedingungen

Die Ausfallrate der Bauelemente hängt noch von den Umgebungsbedingungen ab.

- Hohe oder tiefe Temperaturen,
- häufige Temperaturwechsel,
- Taupunktunterschreitungen,
- aggressive Komponenten in der Umgebungsluft und
- Stöße, Beschleunigungen, Vibrationen

verkürzen die Lebensdauer. Diese Einflüsse werden in der Ausfallratensammlung des MIL-Handbuches insoweit berücksichtigt, als für die verschiedenen Umgebungsbedingungen Multiplikationsfaktoren für die Basisausfallrate angegeben sind. Für den industriellen Einsatz interessieren dabei insbesondere die beiden Klassen  $G_B$  (ground, benign) und  $G_M$  (ground, mobile):

Klasse  $G_B$  (ground, benign). Hier herrschen fast ideale Bedingungen. Die Bauelemente sind in ortsfest installierten Geräten untergebracht. Die entsprechenden Räume sind geheizt. Taupunktunterschreitungen treten nicht auf. Die Geräte werden von sachverständigem Personal gewartet. Diese Bedingungen können z.B. für Meß-, Steuer-, Regel- und Rechengерäte in Elektronikräumen von Industrieanlagen gelten.

Klasse  $G_M$  (ground, mobile and portable). Die Bauelemente sind Komponenten von tragbaren Geräten oder von Geräten in Landfahrzeugen. Stöße und Erschütterungen sind nicht zu vermeiden. Die entstehende Wärme wird unter Umständen weniger gut abgeführt. Die Geräte werden eventuell nur in größeren Zeitabständen von angelerntem Personal gewartet.

Diese beiden Umgebungsbedingungen sind bei den Ausfallraten der Tab. A 6 bis A 13 berücksichtigt.

## 4.4 Ausfallratensammlungen

### 4.4.1 Industrienormen

Die größeren Firmen der Elektroindustrie haben speziell die Lebensdauern ihrer eigenen Produkte verfolgt und die Ergebnisse in firmenspezifischen Datensammlungen festgehalten /z.B. 4.2 - 4.4/. Mit den dort angegebenen Erwartungswerten für die Ausfallraten weisen sie ihren Kunden die Zuverlässigkeit ihrer Erzeugnisse nach. Auf die Einflußgrößen der Ausfallraten wird unterschiedlich detailliert eingegangen. Geschieht dies, so werden praktisch immer die Modellvorstellungen des MIL-Handbuchs verwendet.

Früh- und Spätausfälle. Nach /4.2/ erstrecken sich die Frühausfälle von integrierten Schaltkreisen bis zu einer Betriebszeit von 5000 h. Danach hat die Ausfallrate ihren konstanten Wert erreicht. Dieser ist für die Phase der Frühausfälle mit einem der Faktoren von Tab. 4.6 zu multiplizieren.

Bei diskreten Halbleitern ist die Zeit der Frühausfälle nach etwa 1000 Stunden beendet. Vorher ist die Ausfallrate um die Faktoren der Tab. 4.7 größer.

Auch bei passiven Bauelementen wird mit Frühausfällen in den ersten 1000 Betriebsstunden gerechnet.

Tab. 4.6 Faktoren zur Berücksichtigung der Frühausfälle von integrierten Schaltkreisen /4.2/.

Betriebszeit	bipolare IC	MOS-IC
bis 100 h	30	150
100 bis 1000 h	15	25
1000 bis 5000 h	3	5
ab 5000 h	1	1

Tab. 4.7 Faktoren zur Berücksichtigung der Frühausfälle von Einzelhalbleitern /4.2/.

Betriebszeit	Transistoren, Dioden Leistungshalbleiter	optoelektronische Halbleiter
bis 100 h	20	300
100 bis 1000 h	3	60
ab 1000 h	1	1

Die Ausfallratensammlungen geben nicht die Betriebszeit an, nach der die Ausfallrate infolge von Verschleißausfällen wieder ansteigt. Untersuchungen an Meß-, Steuer- und Regelsystemen in Kraftwerken ließen auch nach einem 10-jährigen Betrieb keine Zunahme der Ausfallrate erkennen /4.14/. Nach /4.35/ sind für integrierte Schaltungen Spätschäden nicht vor etwa 50 Jahren zu erwarten.

Stillstandszeiten. Für die Zeit, während der die Bauelemente nicht in Betrieb sind, wird nach /4.41/ mit 10 % der Volllastausfallrate (Nennbedingungen) gerechnet.

#### 4.4.2 Military Handbook 217

Die am besten detaillierte Quelle für Ausfallraten ist das vom Department of Defense, Washington, herausgegebene Military Handbook MIL HDBK 217 /4.1/. Die erste Ausgabe erschien 1962, die Ausgabe C 1979 und die Fassung D 1982. Das MIL-HDBK ist eine herstellerübergreifende Sammlung von Ausfallraten. Die dort entwickelten Zuverlässigkeitsmodelle wurden für viele firmenspezifischen Ausfallratensammlungen übernommen. Bild 4.12 zeigt die Bereiche, in denen die Ausfallraten für verschiedene Komponenten liegen können.

Die Ausfallraten werden etwas allgemein für "both catastrophic and drift failures" angegeben. Die Grenzwerte, ab denen ein Bauelement als ausgefallen gilt, werden nicht genannt und können nur indirekt aus dem Studium weiterer MIL-Normen gefolgert werden. Vor Fehlinterpretationen versuchen sich die Herausgeber durch den folgenden Hinweis zu schützen:

"The failure rates presented apply to equipment under normal operating conditions, i.e., with power on and performing its intended functions in its intended environment. Extrapolation of any of the base failure rate models beyond the tabulated

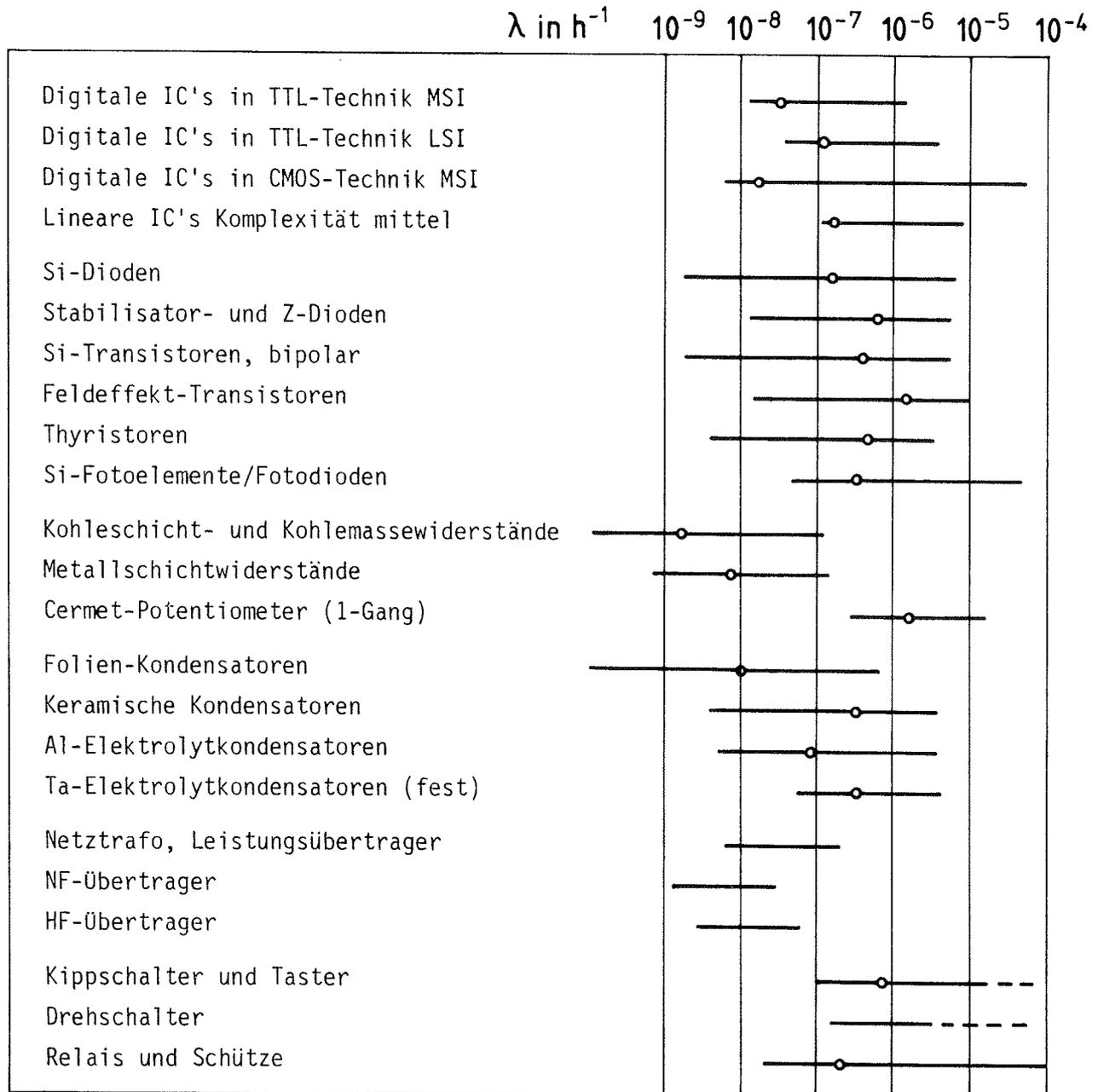


Bild 4.12: Bandbreite der Bauelement-Ausfallraten; die Kreise kennzeichnen die Ausfallraten für den normalen industriellen Einsatz

values, such as high or sub-zero temperature, or electrical stress values above 1.0 or at 0 or extrapolation of any associated modifiers is completely invalid."

Danach sind also die Ausfallraten des MIL-Handbuchs nicht bei Stillstandszeiten anzuwenden.

Diskrete Halbleiter. Mit den Faktoren

$\lambda_b$  Basisausfallrate  
 $\pi_E$  Umweltfaktor  
 $\pi_A$  Anwendungsfaktor  
 $\pi_Q$  Qualitätsfaktor  
 $\pi_R$  Leistungsfaktor  
 $\pi_{S2}$  Spannungsfaktor  
 $\pi_C$  Integrationsgrad-Faktor  
*Complexity*

läßt sich die Ausfallrate  $\lambda_p$  eines Bauelements (part) gemäß der folgenden Gleichung berechnen:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_A \pi_Q \pi_R \pi_{S2} \pi_C \text{ Ausfälle}/10^6 \text{ h.} \quad (4.21)$$

Die Basisausfallrate selbst ergibt sich aus der Gleichung

$$\lambda_b = Ae^x$$

$$\text{mit } x = \frac{N_T}{273 + T + \Delta T \cdot S} + \left( \frac{273 + T + \Delta T \cdot S}{T_M} \right)^P. \quad (4.22)$$

Hierin bedeuten

A Kalibrierfaktor

$N_T$ ,  $T_M$ , P Formparameter

T Betriebstemperatur (Umgebung oder Gehäuse) in °C

$\Delta T$  Differenz zwischen maximal zulässiger Temperatur bei Nulleistung und maximal zulässiger Temperatur bei Nennleistung

S Faktor für elektrische Belastung

Die für die Gln.(4.21) und (4.22) benötigten Faktoren oder Parameter können den Tabellen des MIL-Handbuchs entnommen werden. Um diese Arbeit dem Leser abzunehmen, sind in den Tabellen A 6 und A 10 des Anhangs Ausfallraten für einige diskrete Halbleiterbauelemente für die in der industriellen Technik geltenden Einsatzbedingungen zusammengestellt.

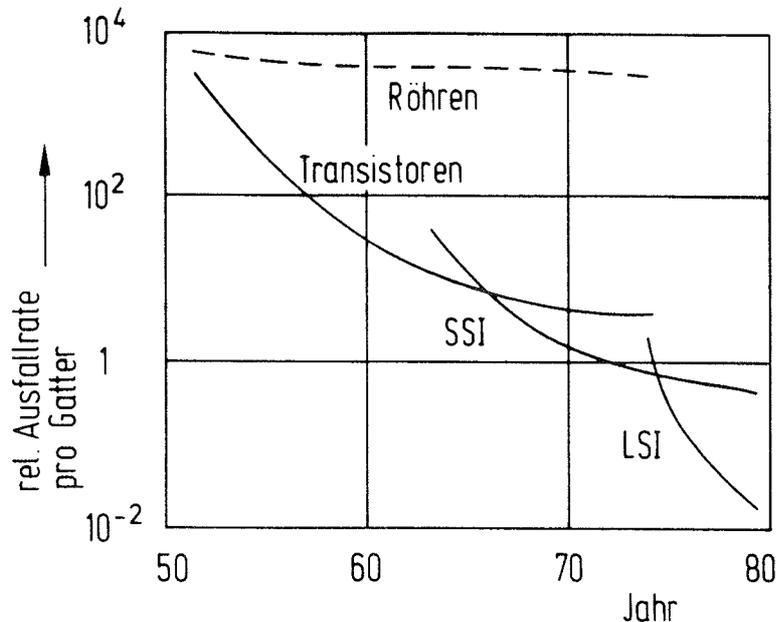


Bild 4.13: Abnahme der Ausfallrate pro Gatterfunktion infolge technologischer Verbesserungen /4.37/

Monolithisch integrierte Schaltkreise. Die Ausfallrate  $\lambda_p$  eines bipolaren oder MOS-integrierten Schaltkreises, für lineare oder digitale Schaltungen, errechnet sich aus dem folgenden Ansatz:

$$\lambda_p = \pi_Q \pi_L [C_1 \pi_T \pi_V + (C_2 + C_3) \pi_E] \text{ Ausfälle}/10^6 \text{ h} \quad (4.23)$$

- $\pi_Q$  Qualitätsfaktor
- $\pi_L$  Lernfaktor
- $\pi_T$  Temperaturfaktor
- $\pi_V$  Spannungsfaktor
- $\pi_E$  Umgebungsfaktor
- $C_1, C_2$  Integrationsgrad-Faktoren
- $C_3$  Gehäusefaktor

Die einzelnen Faktoren sind wieder tabelliert. Mit ihrer Kenntnis wurden die Ausfallraten der Tabellen A 7 bis A 9 ermittelt.

In der eckigen Klammer von Gl.(4.23) werden zwei Terme additiv verknüpft. Der erste steht für die Ausfallmechanismen, die von der Temperatur ( $\pi_T$ , Arrheniusgleichung) oder von der Spannung ( $\pi_V$ ) abhängen. Der zweite Term berücksichtigt die Ausfallursachen, die direkt oder indirekt auf eine mechanische Beanspruchung zurückgehen ( $\pi_E$ ).

Die Tabelle A 8 z.B. läßt ebenso wie Bild 4.13 erkennen, daß die Ausfallrate von digitalen Schaltkreisen nicht mit der Zahl der realisierten Gatterfunktionen, sondern weit weniger zunimmt. So ist der Einsatz integrierter Schaltkreise nicht nur wegen der niedrigeren Kosten, sondern auch wegen der höheren Zuverlässigkeit empfehlenswert.

Widerstände, Kondensatoren und Induktivitäten. Die Ausfallrate  $\lambda_p$  eines Widerstandes läßt sich wie folgt berechnen:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_R \pi_Q \quad \text{Ausfälle}/10^6 \text{ h} \quad (4.24)$$

$\pi_E$  Umweltfaktor

$\pi_R$  Faktor, abhängig vom Widerstandswert

$\pi_Q$  Qualitätsfaktor.

Die Basisausfallrate  $\lambda_b$  ist aus einer aus zwei e-Funktionen bestehenden Gleichung mit insgesamt neun Größen zu bestimmen. Zwei dieser Größen berücksichtigen die Temperaturabhängigkeit, zwei die Spannungsabhängigkeit und die übrigen sind Formparameter. Auch dieser relativ komplizierte Ansatz verdeutlicht, daß in dem MIL-Handbuch sehr detaillierte und umfangreiche Erfahrungen verarbeitet sind.

Für Kapazitäten und Induktivitäten sind im Prinzip ähnliche Modelle entwickelt. Sie wurden ausgewertet, um in den Tabellen A 11 bis A 13 Ausfallraten nicht nur für Widerstände, sondern auch für Kondensatoren und elektromechanische Bauelemente angeben zu können.

Vergleich der Ausgabe C mit der Ausgabe D. Bei Widerständen und Kondensatoren ist offensichtlich ein Stand der Technik erreicht, der keinen Spielraum mehr für größere Verbesserungen der Lebensdauer läßt. Die Ausfallraten für diese passiven Bauelemente sind in der Ausgabe von 1982 dieselben wie in der von 1979.

Die aktiven Halbleiterbauelemente sind demgegenüber offensichtlich besser geworden. So sind unter vergleichbaren Einsatzbedingungen die Ausfallraten 1982 um die folgenden Faktoren kleiner als 1979:

SI-Dioden	5
SI-NPN-Transistoren	7
TTL-IC, 50 Gatter, P1	10
TTL-IC, 5000 Gatter, P1	50
MOS-ROM, 60 k	4

Die Herausgeber des MIL-Handbuchs weisen darauf hin, daß die Ausfallraten aus Erfahrungen mit den bereits im Einsatz befindlichen Komponenten abgeleitet sind. Diese Daten dürfen nur dann auf neue Produkte übertragen werden, wenn sich die Einflußgrößen nicht geändert haben. Da sich aber die Technologie weiter entwickelt, ist diese Übertragbarkeit nicht völlig gegeben. Eine Verbesserung der Zuverlässigkeit bei Neuentwicklungen wirkt sich erst verzögert in den Ausfallratensammlungen aus /4.36/.

#### 4.4.3 Europäische Industriequalität und MIL-Qualität

Die Ausfallraten des MIL-Handbuchs beziehen sich auf Bauelemente, die nach MIL-Spezifikationen gefertigt und geprüft sind. Die im europäischen zivilen Bereich verwendeten Bauelemente sind nicht nach MIL-Spezifikation, sondern nach firmenspezifischen Richtlinien hergestellt. Die Bauelemente sind im Sinne einer übergreifenden Norm weder mustergeprüft noch gütebestätigt.

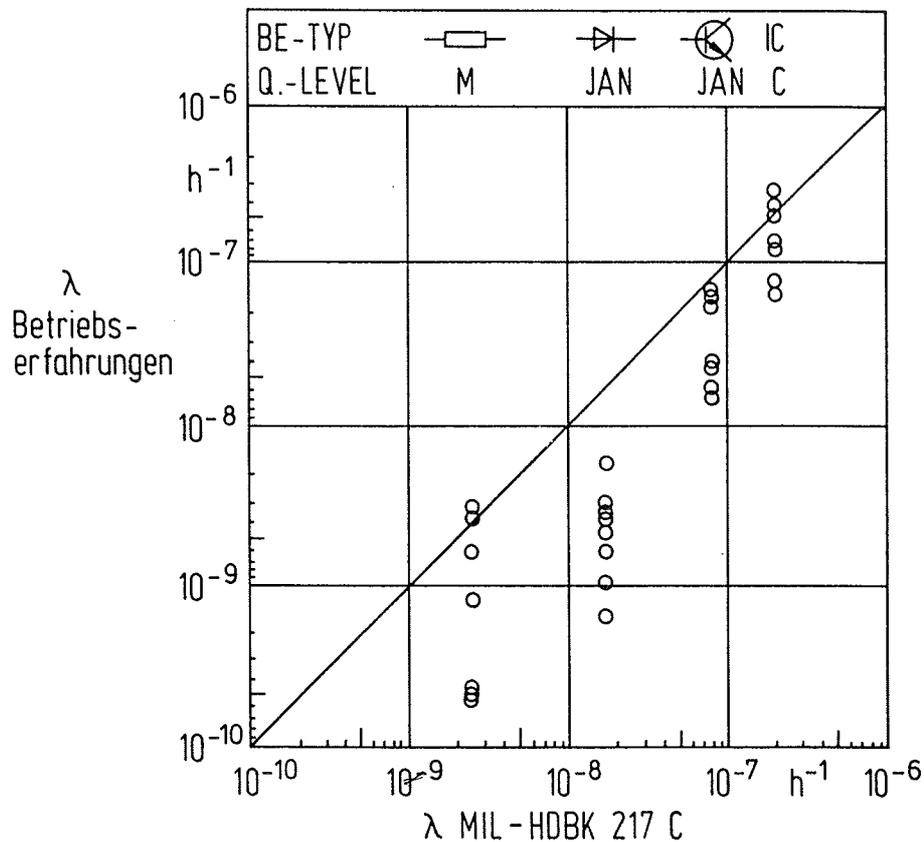


Bild 4.14: Vergleich der aus Betriebserfahrungen gewonnen Ausfallraten (Ordinate, Kreise) mit den Werten des MIL-HDBK 217 C für Schichtwiderstände, Dioden, Transistoren und integrierte Schaltkreise. Die aus Felddaten ermittelten Ausfallraten sind niedriger als die des MIL-Handbuchs, wenn sie unterhalb der gezeichneten Diagonalen liegen /4.38/.

Werden nun die Ausfallraten des MIL-Handbuchs auf diese nach Hausnormen gefertigten Bauelemente übertragen, so entsteht die Frage, welche Qualitätsstufe, welcher quality factor anzuwenden ist. Um eine derartige Festlegung nicht willkürlich treffen zu müssen, wurden aus Schadens- und Reparaturberichten von

- Meßumformern
- Baugruppen der Steuerungssysteme Decontic, Geamatic, Iskamatic und Simatic und
- von Geräten der Nachrichtentechnik

Ausfallraten für Bauelemente ermittelt und mit den Werten der damals neuesten Ausgabe C des MIL-Handbuches verglichen /4.14/. Wie Bild 4.14 zeigt, erreichen bei einer vorsichtigen Wertung die untersuchten Komponenten die folgenden Qualitätsstufen

Bauelement:	Widerstand	Diode	Transistor	IC
Qualitätsstufe:	M	JAN	JAN	C

## 4.5 Gütebestätigung und Qualifikation der Bauelemente

### 4.5.1 CECC-Gütebestätigungssystem für elektronische Bauelemente

Für den Anwender ist es vorteilhaft, nach einheitlichen Richtlinien gefertigte und geprüfte Bauelemente gleichbleibender Qualität von verschiedenen Herstellern beziehen zu können. In den USA ist dieses Ziel durch das Military Specification System (MIL), dessen Vorschriften schon mehrfach erwähnt worden sind, erreicht. Im europäischen zivilen Bereich fehlten entsprechende firmen- und länderübergreifende Normen. So einigten sich 1968 Großbritannien, Frankreich und die Bundesrepublik Deutschland, ein gemeinsames System der Gütebestätigung für die Bauelemente der Elektronik auszuarbeiten. Die Durchführung ist dem europäischen Komitee für die elektrotechnische Normung CENELEC (comité européen de normalisation électrotechnique) übertragen. Vereinbart wurde das CECC-System (CENELEC Electronic Components committee), dem sich inzwischen mehrere Länder angeschlossen haben /4.39, 4.40/.

Die Elemente dieses Gütebestätigungssystems sind

- die zwischen den einzelnen Ländern harmonisierten Normen;
- die Anerkennung der Hersteller, der Prüflaboratorien und der Auslieferungsläger;

- die Bauartzulassung und die Prüfung der Bauelemente in Übereinstimmung mit den harmonisierten Normen;
- die Aufzeichnung der Prüfergebnisse.

In der Bundesrepublik Deutschland nimmt die VDE-Prüfstelle in Offenbach die Funktion einer nationalen Überwachungsstelle wahr. Sind die Qualifikationsprüfungen bestanden, so wird das Produkt in die Liste der zugelassenen Erzeugnisse der CECC aufgenommen und darf das VDE-Electronic-Prüfzeichen tragen. Das CECC-Gütebestätigungssystem schließt keine Lebensdaueruntersuchungen ein und gibt keine Ausfallraten an.

#### 4.5.2 Qualifikation und Prüfung der Bauelemente

Wenn ein Bauelement nach einer bestimmten Spezifikation gefertigt oder auch gütebestätigt ist, so ist noch nicht seine Eignung für eine konkrete Aufgabe nachgewiesen. Diese Eignung für eine bestimmte Anwendung wird in Form einer Qualifikation untersucht. Bild 4.15 zeigt z.B. den Ablauf einer besonders umfangreichen Prüfung.

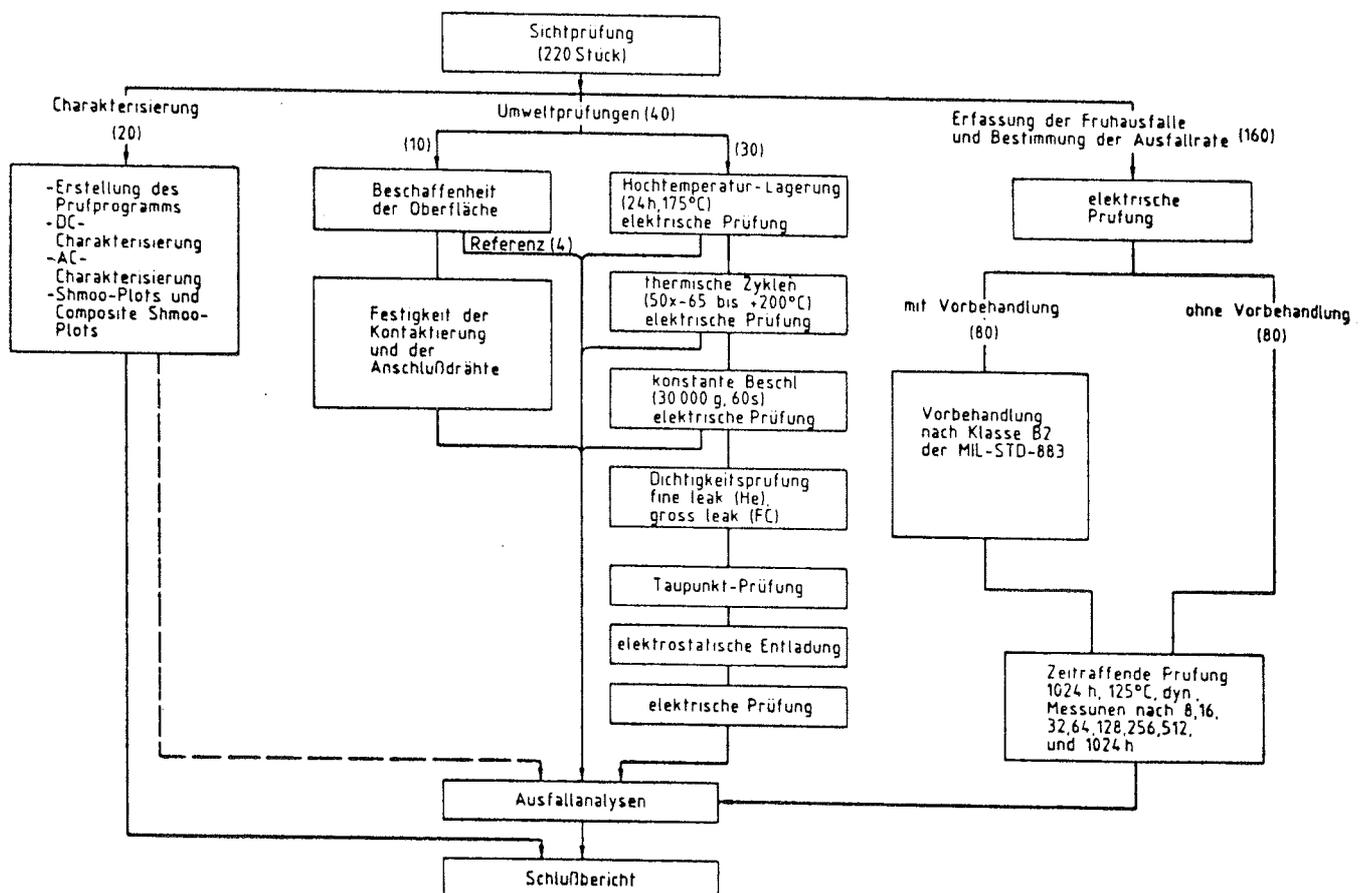


Bild 4.15: Qualifikationsprüfung einer CMOS LSI-Semi-Kundenschaltung in Keramikgehäuse am CSEE (Centre Suisse d'essais des Composants Electroniques CH-2000 Neuchâtel) /4.21/.

Bei gütebestätigten Bauelementen müssen dabei die schon eventuell durchgeführten Prüfungen nicht noch einmal wiederholt werden.

Ist die generelle Eignung festgestellt, so wird das Bauelement vom Gerätehersteller für den Einbau in die Geräte freigegeben und der Umfang der Eingangsprüfungen wird festgelegt. Es erweist sich als zweckmäßig, die LSI- und VLSI-Schaltkreise Stück für Stück zu prüfen und gegebenenfalls auch vorzubehandeln. Die Fehler werden damit so früh wie möglich, d.h. kostengünstig entdeckt. Frühausfälle der bestückten Geräte während der Garantiephase werden damit vermieden.

Die Bauelemente können entweder beim Anwender oder in einem externen Prüfinstitut qualifiziert und geprüft werden. Abhängig von der Zahl der benötigten Bauelemente ist die eine oder andere Lösung die kostengünstigere.