

# Über die Zuverlässigkeit von Transistoren

## The Reliability of Transistors

*Anton Jäger*

**Zusammenfassung** · Die Bedeutung der Zuverlässigkeit der Transistoren in der heutigen Elektronik wird an einigen Beispielen dargelegt. Dann wird gezeigt, daß bereits in der Transistor-Entwicklung entscheidende Gesichtspunkte für die angestrebte Zuverlässigkeit festgelegt werden, und daß die laufende Erfahrung der Fertigung sowie der Datenrückfluß aus dem Anwendungsbereich zu einer Steigerung der Zuverlässigkeit führen. Schließlich wird die Erprobungstechnik beschrieben, deren verschiedene Prüfverfahren ein geeignetes Kontrollmittel für die Fortschritte der Entwicklung und Fertigung darstellen.

### 1. Einleitung

Wenn heute von der Zuverlässigkeit elektronischer Geräte gesprochen wird, dann wird im allgemeinen zuerst an das funktionstüchtige Verhalten von Geräten und Anlagen mit sehr vielen Einzelteilen gedacht, z. B. an die mit Hunderttausenden von Bauelementen bestückten Rechenmaschinen, bei denen man ungestörte Betriebszeiten von Tagen oder Wochen fordert. Dann denkt man an Seekabel mit Unterwasserverstärkern, bei denen eine Reparatur mit sehr großem Aufwand verbunden ist und schließlich auch an Erd-Satelliten oder Weltraumfahrzeuge, bei denen eine Instandsetzung überhaupt ausscheidet und oft nationales Prestige von nicht geringer Größe und eventuell Menschenleben auf dem Spiel stehen. Diese großen elektronischen Gebiete haben zu den heutigen Zuverlässigkeits-Untersuchungen geführt und waren mit umfangreichen und kostspieligen Erprobungen verbunden, in denen die Funktionssicherheit aller Bauelemente, der Baugruppen und schließlich der ganzen Anlagen untersucht wurde.

**Summary** · The importance of the reliability of transistors in modern-day electronics is discussed with a few examples. It is shown that already during the development of transistors decisive criteria for the desired reliability are established and that the experience gained in production and in the field leads to improvement in reliability. Finally testing methods are described which are suitable for controlling the progress of development and manufacture.

### 1. Introduction

When we speak of the reliability of electronic equipment we are usually thinking of the continuing fitness for purpose of the entire equipment with its multitude of individual components, for instance, of electronic computers incorporating several hundred thousand components where we expect uninterrupted operation for days or weeks. Then we also think of undersea cables with submerged repeaters the repair of which involves considerable expenditure and finally of satellites and space vehicles, which cannot be repaired at all and often national prestige and possibly human life are in jeopardy. These major electronic fields have led to modern reliability studies and were coupled with extensive, costly tests in which the functional reliability of individual components, units and finally the entire equipment was evaluated. Without this immense expenditure it would be impossible to put the modern complex systems into service let alone to operate them reliably.

Ohne diesen riesigen Aufwand wäre es gar nicht möglich, die heutigen komplexen Systeme überhaupt in Betrieb zu setzen, geschweige denn einige Zeit sicher arbeiten zu lassen.

Natürlich haben diese Erfahrungen bald auch einen Bereich befruchtet, den man Unterhaltungssektor nennt und der Rundfunk- und Fernsehgeräte sowie verwandte Gebiete umfaßt. Der Ausfall eines Fernsehers ist im allgemeinen zwar nicht mit schwerwiegenden Folgen verbunden und bereitet allenfalls einigen Ärger, aber mit der zunehmenden Kompliziertheit dieser Geräte (z. B. Farbfernsehen) und den damit verbundenen Service-Schwierigkeiten wird man die Erfahrungen aus dem kommerziellen Bereich nutzbringend verwerten wollen, um die Wartung zu vereinfachen. Wenn wir schließlich Kleingeräte betrachten, so haben wir bei einem Hörgerät ein Objekt, das zwar relativ wenig Bauelemente enthält, aber bei Ausfall immerhin die Lebens- und Berufstüchtigkeit des Trägers beeinträchtigen kann. Zudem ist es nicht geringen mechanischen und klimatischen Beanspruchungen unterworfen, so daß bei der Entwicklung eines solchen Gerätes und bei der Auswahl der Komponenten ebenfalls ausführliche Zuverlässigkeits-Überlegungen zu machen sind.

Wie für jedes Bauelement gilt auch für einen Transistor, daß Zuverlässigkeit hineinentwickelt und hineingefertigt werden muß, und daß man in einer Endkontrolle durch spezielle Prüfverfahren fehlerhafte Exemplare ausscheidet. Dies werden im allgemeinen Transistoren sein, die bezüglich wichtiger Eigenschaften außerhalb einer natürlichen Streuung liegen und daher bewiesenermaßen oder mit hinreichendem Verdacht im späteren Betrieb Mängel zeigen könnten.

Nicht alle Transistoren haben Weltraumflüge und Unterwasser-Einsätze zu bestehen. Wenn hierfür ein Maximum an Zuverlässigkeit gefordert werden muß, so wird man in der breiteren Anwendung im allgemeinen mit geringeren Forderungen auskommen. Hierzu müssen die Verantwortung des Transistor-Herstellers und das Einsatzrisiko des Anwenders aufeinander abgestimmt werden, um ein Optimum an Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Die folgenden Ausführungen beschreiben Gesichtspunkte, die auf die Qualität des Transistors im Laufe seiner Entwicklung und Fertigung einen Einfluß haben, und geben einen kurzen Überblick über die Erprobungstechnik, die parallel zur Entwicklung und Fertigung quantitative Zuverlässigkeitsangaben und erste anwendungsgerechte Erfahrungen gewinnen soll.

## 2. Zuverlässigkeits-Gesichtspunkte bei der Entwicklung

Am Anfang jeder Entwicklung steht die Erarbeitung des Entwicklungsziels und dessen Festlegung in einer *Target*-Spezifikation (*Target* = Ziel). Hierin

Naturally the experience gained was soon fruitfully employed in another field that is known as the entertainment sector and embraces radio and television as well as allied fields. As a rule the breakdown of a television set is more of a nuisance than having serious consequences but with the increasing complexity of these apparatuses (e. g. colour television) and the accompanying service difficulties, there will be increased pressure to utilize the experience gained in the commercial field to simplify maintenance. When we direct our attention to small instruments, we have with the hearing aid an instrument containing relatively few components but nevertheless one that can impair the workaday life and efficiency of the wearer when it breaks down. Moreover, a hearing aid is subjected to considerable mechanical and environmental stress so that much attention must be paid to reliability in the development of such an instrument and in the selection of the components.

As with any component, with the transistor reliability must be designed and built into it from the outset and faulty specimens must be rejected in the course of the quality control by means of special testing procedures. Generally speaking the rejects are transistors whose specifications lie outside certain limits and are therefore likely to fail under operational conditions.

Not all transistors are intended for use in space vehicles or submarine equipment. Although maximum reliability is called for under such arduous conditions, the requirements in general use will be less stringent. In order to achieve optimum reliability and economy, production costs must be weighed against redundancy.

The following exposition deals with criteria, which have an influence on the quality of the transistor in the course of its development and manufacture, and gives a brief survey of the testing procedures, which parallel to development and manufacture yield quantitative reliability data and experience under operational conditions.

## 2. Reliability criteria in development

At the start of any development we must first establish the aim of the development and lay it down in a *target* specification. This must include all electric, mechanical and environmental requirements expected of the equipment in later use and which must be "translated" by the transistor designer into his technological language. From the application data of the target the physical form, the *design*, is obtained.

Taking an hearing aid transistor as an example, a few trains of thought are now followed up that play a rôle in connection with reliability and that

sind alle elektrischen und mechanisch-klimatischen Forderungen niedergelegt, die im späteren Einsatz an das Bauelement gestellt werden und die der Transistor-Entwickler nun in seine technologische Sprache »übersetzen« muß. Aus den Anwendungsdaten des Targets wird so die physikalische Ausführungsform, das *Design* gewonnen.

Am Beispiel eines Hörgeräte-Transistors seien nun einige Gedankengänge nachgezeichnet, die im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeit eine Rolle spielen und die für andere Transistorarten in einer mehr oder weniger abgewandelten Form ebenso gelten.

### 2.1. Das Target

Von einem Transistor fordert man zwei Eigenschafts-Arten:

- a) *Aktive* Eigenschaften, in den Datenblättern *Kemdaten* genannt, nämlich solche, die der Transistor dem Anwender »anbietet«.
- b) *Passive* Eigenschaften, in den Datenblättern *Grenzdaten* genannt, nämlich solche, die der Anwender dem Transistor als Beanspruchung (Stress) »auferlegen darf«.

Wichtige *aktive Eigenschaften* eines Hörgeräte-transistors sind:

Hohe Verstärkung, insbesondere auch bei kleinen Arbeitspunkten für geringen Batterieverbrauch; gute Rauscheigenschaften im Niederfrequenz-Bereich;

kleine Restströme für gute Stabilisierung bei niedrigen Arbeitspunkten;

niedrige Restspannung zur Erzielung eines hohen Wirkungsgrades der Endstufe.

Wichtige *passive Eigenschaften* aufgrund spezifischer Hörgerätebeanspruchung sind:

Große Stoßfestigkeit und Kontaktsicherheit;

Temperaturwechsel-Beständigkeit;

Korrosionssicherheit der Elektroden und äußeren Umhüllung;

Lange Einschaltzeiten, hohe Brauchbarkeitsdauer.

Aus den angeführten aktiven Funktions-Forderungen und den Beanspruchungen können nun die spezifischen Zuverlässigkeits-Aspekte für das Design des Transistors abgeleitet werden.

### 2.2. Das Design

Zunächst seien zwei allgemeine Bemerkungen vorangestellt.

Ein gutes Design ist notwendig, aber nicht hinreichend für ein zuverlässiges Transistor-Kollektiv. Denn das Design setzt zunächst eine ideale d. h. fehlerlose Fertigung voraus. Da aber Menschen und Maschinen nicht ideal arbeiten können, fallen auch fehlerhafte Transistoren an. Es gibt grobe Fehler, die in einer wirtschaftlichen Zwischen- oder Endprüfung herausgefunden und ausgeschlossen werden können, und geringe Fehler, die sich erst in einer längeren Beanspruchung in

also apply to other types of transistors in a more or less modified form.

### 2.1. Target

Two types of properties are expected of a transistor:

a) *Active* properties, known in the data sheets as *characteristics*, i. e. properties that are "offered" to the user by the transistor.

b) *Passive* properties, known in the data sheets as *maximum ratings*, i. e. properties that the user may "apply" to the transistor as stress.

Important *active properties* of an hearing aid transistor are:

High gain, particularly with small working points for low battery drain;

good noise properties in the low-frequency range; small leakage currents for good stabilization with low working points;

low saturation voltage for obtaining a high degree of efficiency of the output stage.

Important *passive properties* for use in hearing aids are:

Extreme resistance to shock and good contact reliability;

temperature stability;

resistance to corrosion of the electrodes and outer case;

long switch-on times, long operational life.

The specific reliability aspects for the design of the transistor can be deduced from the active functional requirements listed and the stresses.

### 2.2. Design

First two general remarks.

A good design is necessary but it does not ensure good overall transistor results, since design presupposes ideal, i. e. flawless production. As men and machines are not ideal, defective transistors will also be made. There are serious defects, which can be detected and rejected in the course of quality control, and there are minor defects, which only become apparent after lengthy stress tests or in service.

We will revert to this point later under "manufacture" (see also Fig. 3).

In the course of such considerations of design the question often crops up as to what extent the user requirements, the realization of which brings us to the brink of the technical possibilities, lessen the reliability to be expected. In many cases we should not expect the reliability to be too great at first. However, since we must often leave the trodden path in such developments and a better solution is found as new frontiers are crossed, there are examples where improved quality is

Erprobungstests oder in der Geräte-Anwendung offenbaren.

Auf diesen Punkt kommen wir später bei der »Fertigung« nochmals zurück (siehe auch die dortige Abb. 3).

Bei solchen Design-Überlegungen kommt es vielfach zu der Frage, wie weit Anwenderforderungen, zu deren Realisierung man nahe an die technisch möglichen Grenzen herangehen muß, die zu erwartende Zuverlässigkeit schmälern können. In vielen Fällen wird man zunächst nicht auf eine sehr hohe Zuverlässigkeit hoffen dürfen. Da bei einer solchen Entwicklung aber oftmals ein bisher begangener Weg verlassen werden muß und eine bessere Lösung auf einem neuerschlossenen technischen Weg gefunden wird, gibt es durchaus Beispiele, wo letzten Endes nicht nur keine Qualitätseinbuße entstand, sondern mit den besseren Funktionseigenschaften auch ein allgemein höherer Qualitätsstand erreicht wurde. Es sei nur an die Entwicklung der Mesa-Transistoren erinnert.

Schwierige Entwicklungsziele in einem gerechtfertigten Rahmen sind letzten Endes der Motor des Fortschritts im allgemeinen und – für viele moderne technische Geräte – auch die Ursache einer Zuverlässigkeitserhöhung im besonderen.

Nun zu den konkreten Design-Überlegungen:

Die physikalische Ausführungsform des Transistors wird üblicherweise in drei Bereiche unterteilt, in das *Volumen*, nämlich das Kristallinnere, in dem der Transistor-Effekt konzipiert ist, in die *Oberfläche*, die den Übergang vom Kristall zur Umgebung darstellt und den Transistor-Effekt maßgeblich beeinflussen kann, und schließlich in den *Aufbau*, der die Systemhalterung, die Elektrodenzuführungen und die äußere Umhüllung beinhaltet.

In der folgenden Tabelle 1 sind die im Target aufgeführten Eigenschaften jeweils in den Be-

obtained instead of a loss owing to the better functional properties. Here I should just like to remind you of the development of the mesa transistors.

Difficult development aims within a justified framework are after all the driving force behind progress in general and – for many modern technical apparatuses – also the cause of improved reliability in particular.

And now let us get down to concrete design considerations:

The physical design of the transistor is usually divided into three regions: in the *bulk*, namely the inside of the crystal in which the transistor effect is conceived, in the *surface*, which represents the transition from crystal to surroundings and can decisively influence the transistor effect and finally in the *mounting*, which includes the system holder, the electrode lead-ins and the outer covering.

In the following table 1 the properties listed in the target are checked off under the region heading where they primarily "reside".

With the aid of the table below it is possible to discuss questions typical for hearing aid transistors, and also for many other modern types of transistors.

### 2.2.1. Bulk

The central problem here is the selection of material, germanium or silicon. The higher permissible junction temperature of the silicon transistor often leads to the conclusion that "silicon is more reliable than germanium". This frequently heard prejudice is elucidated somewhat here as it is an acute theme of general interest.

Without doubt silicon can be subjected to more stress, particularly with regard to the junction temperature and the collector voltage. Germanium

Tab. 1

Eigenschaften Characteristics	Volumen Volume	Oberfläche Surface	Aufbau Mounting
Verstärkung gain	●	●	
Verstärkung bei kleinen Arbeitspunkten gain at small operating points		● ●	
NF-Rauschen low frequency noise	●	●	
Restströme leakage currents	● (Si)	●	
Restspannung saturation voltage	● (Ge)		
Stoßfestigkeit shock stress			●
Temperatur-Zyklen temperature cycling	●	●	●
Korrosions-Beständigkeit corrosion stress			●

reichen gekennzeichnet, in denen sie überwiegend ihren »Sitz« haben.

Anhand dieser Aufstellung lassen sich die für Hörgeräte-Transistoren typischen, aber auch für viele andere moderne Typen geltenden Fragen diskutieren:

### 2.2.1. Volumen

Die Kernfrage ist hier die Materialwahl, Germanium oder Silizium. Aus der bei Silizium-Transistoren höheren zulässigen Sperrschichttemperatur wird vielfach ganz allgemein gefolgert, daß »Silizium zuverlässiger sei als Germanium«. Dieses oft gehörte Vorurteil sei im folgenden etwas näher beleuchtet, da es ein akutes und allgemein interessantes Thema ist.

Zweifelsohne stecken im Silizium mehr Beanspruchungsmöglichkeiten, insbesondere bezüglich der Sperrschichttemperatur und der Kollektorspannung. Das Germanium ist nämlich insofern benachteiligt, als es aufgrund seines Elektronen-Energieniveaus schon bei ca.  $+200^{\circ}\text{C}$  von der Störleitung (= Halbleitung, auf der der Transistor-Effekt beruht) in die nicht mehr elektrisch steuerbare Eigenleitung übergeht.

Aufgrund allgemeiner Überlegungen kann man aber davon ausgehen, daß die Stress-Empfindlichkeit bestimmter Eigenschaften um so geringer ist, je weiter man von den physikalisch gegebenen absoluten Grenzen wegbleibt, also z. B. großen Abstand von dem Einsatzpunkt der Eigenleitung oder von der Durchbruchspannung einhält.

Das führt zu zwei Folgerungen, siehe Abbildung 1.

a) Nutzt man bei Silizium-Transistoren die zugelassenen Grenzdaten ebenso »scharf« aus wie

is at a disadvantage in as far as it goes over from semi-conductivity, upon which the transistor effect is based, to intrinsic conductivity, which can no longer be controlled electrically, at a temperature of  $+200^{\circ}\text{C}$  owing to the energy level of its electrons.

However, it is clear that the stress sensitivity of certain properties is the lower, the further we are from the absolute physical limit, for instance, the further we are from the starting point of intrinsic conductivity or from the breakdown voltage.

This leads to two conclusions, see Figure 1.

a) If the permissible limiting data of a silicon transistor is exploited just as "fully" as the lower limiting data of a germanium transistor, then they will not differ in their reliability.

b) In the range below about  $+100^{\circ}\text{C}$  we are so far away from dangerous temperatures even with germanium that there is only a small difference between the two in many aspects. We can then use germanium without loss of quality, particularly since there are functional advantages even today with respect to very high frequencies.

### 2.2.2. Surface

Whilst it is sometimes difficult with germanium to obtain constant chemical and physical properties of the crystal surface, this process has been well mastered in the case of silicon with the planar technique. The planar technique comprises the following: in the production of the system the various successive vapourizing, diffusion and etching processes are combined in such a way with oxidation processes that in the finished system the layer transitions at the crystal surface do

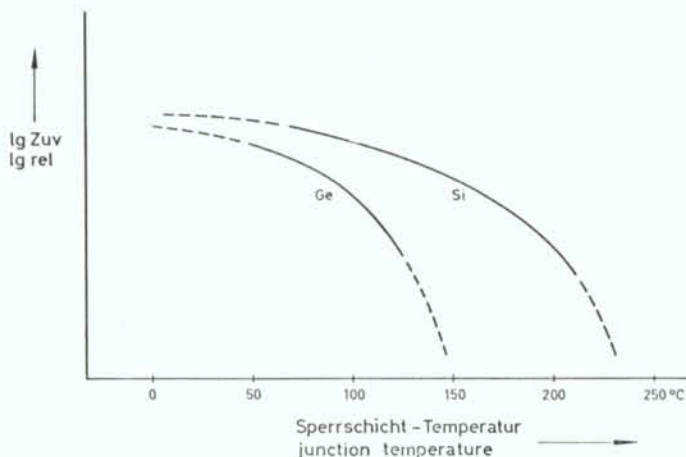


Abb. 1 Zuverlässigkeit in Abhängigkeit von der Sperrschichttemperatur bei Germanium und Silizium

Fig. 1 Reliability as a function of the junction temperature with germanium and silicon

die niedrigeren Grenzdaten bei Germanium-Transistoren, dann werden sich die beiden Arten in ihrer Zuverlässigkeit nicht unterscheiden.

b) im Bereich unter etwa  $+100^{\circ}\text{C}$  ist man auch bei Germanium schon so weit von gefährlichen Temperaturen weg, daß der Unterschied zum Silizium bezüglich vieler Gesichtspunkte relativ gering ist. Man wird dann ohne Qualitätseinbuße Germanium verwenden können, zumal wenn hiermit Funktionsvorteile zu gewinnen sind, wie es heute für sehr hohe Frequenzen im Prinzip noch gilt.

### 2.2.2. Oberfläche

Während es bei Germanium teilweise noch schwierig ist, die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Kristalloberfläche konstant zu erhalten, wird dieser Prozeß bei Silizium mit der Planartechnik schon sehr gut beherrscht. Die Planartechnik beinhaltet folgendes: Bei der Systemherstellung werden die verschiedenen aufeinanderfolgenden Bedampfungs-, Diffusions- und Ätzprozesse in einer solchen Weise mit Oxydationsprozessen kombiniert, daß beim fertigen System die Schichtübergänge an der Kristalloberfläche nicht direkt in das umgebende Medium münden, sondern mit dieser chemisch außerordentlich widerstandsfähigen Silizium-Dioxidschicht (= Quarzglas) abgedeckt sind. Dadurch werden definierte und zeitlich stabile »Oberflächen-Zustände« erreicht, so daß die eingangs erwähnte Einwirkung der Oberfläche auf den Transistor-Effekt im Kristall-Volumen ebenfalls zeitlich konstant bleibt und die Funktionseigenschaften folglich keine Änderungen aufweisen.

Es besteht begründete Aussicht, diese  $\text{SiO}_2$ -Schicht in ähnlicher Qualität auch auf Germanium-Systemen aufbringen zu können und so Ge-Volumen-Vorteile mit Silizium-Oberflächen-Vorteilen zu kombinieren.

Man kann sagen, daß diese Oberflächenarten die Zuverlässigkeit um ca. eine Zehnerpotenz anheben können gegenüber den bei herkömmlichen Transistoren üblichen Oberflächenbehandlungen in Kombination mit Lackabdeckung, Füll- und Getterstoffen.

### 2.2.3. Aufbau

Es ist einleuchtend, daß die schönste System-Ausführung verdorben werden kann durch eine nicht sorgfältige Konstruktion des mechanischen Aufbaus, der einerseits viele feinstwerktechnische Probleme bringt, andererseits erheblichen Beanspruchungen mechanischer und klimatischer Art gewachsen sein muß. Aber auch eine so selbstverständlich erscheinende Beanspruchung wie das Einlöten der Zuführungsdrähte in die Schaltung bedarf eingehend erprobter Maßnahmen. Diese Aufgaben überspannen also den weiten Bereich

not run directly into the surrounding medium, but are covered by this extremely resistant silicon dioxide layer (quartz glass). In this way defined and temporally stable "surface conditions" are achieved so that the influence of the surface on the transistor effect in the crystal volume, as already mentioned, also remains constant with respect to time and the functional properties do not exhibit any changes.

There are good prospects of being able to apply this  $\text{SiO}_2$  layer to germanium systems so that the germanium volume advantages can be combined with silicon surface advantages.

We can say that these types of surfaces increase the reliability by ten times compared with customary transistors with usual surface treatment in combination with lacquer coating, filling and getter substances.

### 2.2.3. Mounting

It goes without saying that the best system design can be spoiled by careless construction of the mechanical mounting, which on the one hand involves many technical problems of a precision nature, and on the other hand must withstand considerable stress of a mechanical and environmental nature. Even a simple stress such as the soldering of the lead-in wires into the circuit calls for thorough tests. Therefore, these tasks cover a wide range from micro contacts to solderable wire surfaces.

An important point is the basic question, metal or plastic case.

As a result of the planar technique it is now possible to encapsulate the system together with the lead-in wires in a plastic mass instead of enclosing them in an air-tight metal case. The question of reliability here can be answered these days as follows:

A planar layer that is intact and remains intact under stress keeps injurious ambient influences away from the actual system. Sealed metal cases prevent the influences from reaching the planar layer, whereas even modern plastics still exhibit a measurable permeability towards, for instance, water vapour. Notwithstanding the further possibilities of progress in the chemistry of plastics, the present-day materials are so good that plastic transistors are a commercial proposition for use in climatically favourable surroundings. Future plastics and the utilization of our continuously increasing knowledge of the fine structure of these oxide layers, will overcome our present misgivings with respect to certain applications.

## 3. Reliability criteria in production

### 3.1. General aspects of reliability

Whilst in the previous section a few problems typical of the present-day development were

von der Mikro-Kontaktierung bis zur lötbaren Drahtoberfläche.

Ein wichtiger Punkt sei besonders gestreift, nämlich die grundsätzliche Gehäusefrage, Metall-Glas-Gehäuse oder Kunststoffumhüllung.

Durch die Planartechnik ist es möglich geworden, anstelle des vakuumdichten Einbaus in ein Metall-Glas-Gehäuse das System zusammen mit den Anschlußdrähten in eine Kunststoffmasse einzubetten, die gleichzeitig das Gehäuse darstellt. Die Frage nach der Zuverlässigkeit solcher Transistoren kann man heute folgendermaßen beantworten: Die jetzigen Erkenntnisse über die Silizium-Oxid-schichten sind noch nicht voll befriedigend, insbesondere bezüglich Art, Menge und Ionisierbarkeit von Fremdatomen, die während der Fertigungsprozesse absichtlich oder unabsichtlich in das Oxid mit eingebaut werden oder im Laufe der Zeit eventuell aus der umgebenden Atmosphäre in das Oxid einwandern können. Deshalb verwendet man für hohe Ansprüche die bewährten vakuumdichten Metall-Glas-Gehäuse. Die in Frage kommenden Kunststoffe dagegen weisen immer noch eine merkbare Aufnahme und Durchlässigkeit von Gasen und Dämpfen auf. Trotzdem hat die anwendungsnahe Betriebserprobung ergeben, daß bei etwas eingeschränkten Ansprüchen an die zu erwartende Zuverlässigkeit ein Geräteinsatz in klimatisch günstiger Umgebung möglich ist.

Die weiteren Fortschritte in der Kunststoff-Chemie und insbesondere die ständig wachsenden Erkenntnisse über die Feinstruktur der Oxid-schichten lassen in Zukunft einen breiten Einsatz dieser »Plastik«-Transistoren möglich erscheinen.

### 3. Zuverlässigkeits-Gesichtspunkte in der Fertigung

#### 3.1. Allgemeine Zuverlässigkeits-Betrachtungen

Während im vorhergehenden Abschnitt einige für die heutige Entwicklung typischen Probleme behandelt wurden, wollen wir im folgenden die Zuverlässigkeitsaspekte im Ablauf eines Transistors von der Entwicklung über die Fertigung und Erprobung bis zum Geräteinsatz etwas näher betrachten, wobei jedoch auf eine Schilderung von Fertigungsgängen verzichtet wird.

Kehren wir zunächst noch einmal zurück zum Grundbegriff der Zuverlässigkeit. Diese wurde eingangs definiert als Funktionstüchtigkeit eines Gerätes über eine bestimmte Zeitspanne. Funktionstüchtig heißt fehlerfrei. Unter der Voraussetzung eines idealen Transistor-Designs können Gerätefehler auftreten a) durch Einbau fehlerhafter Transistoren in eine richtig dimensionierte Schaltung, b) durch Einbau fehlerfreier Transistoren in eine ungünstig dimensionierte Schaltung. Man kann nun im allgemeinen von dem Grundsatz ausgehen, daß jede Beanspruchung zu einer

dealt with, in the following we want to study more closely reliability aspects in the course of the life of a transistor starting with the development and testing and ending with the use in apparatuses, but without describing the actual manufacturing processes.

Let us first revert to the basic term reliability. At the outset this was defined as fitness for purpose of an apparatus over a certain period of time. Fitness for purpose means freedom from failure. Presupposing ideal transistor design, failure can occur a) through incorporating faulty transistors in a correctly dimensioned circuit, b) through incorporating faultless transistors in a poorly designed circuit.

As a rule we can proceed from the assumption that every stress leads to an effect and that the effect is the stronger, the greater the stress. By stress of a transistor we mean the stress through voltage, current, power, temperature, ambient environment etc. By effect we mean changes in the functional properties of a transistor. Depending upon the stress, such properties of a transistor can change gradually or abruptly, by small degrees or by large degrees. The degree of change will, however, also depend upon the quality of the transistor under examination and it can be assumed that a faulty transistor is more sensitive to stress than an ideal transistor. A changing transistor will lead to breakdown of the apparatus when it exceeds the tolerances allowed for by the circuit.

Altogether we have three quantities that influence the reliability of an apparatus: quality of the components (here the transistor), design of the circuit, as well as type and magnitude of the stress.

Owing to the close interweaving of these three quantities it is necessary for the transistor manufacturer to cooperate closely with the user in order to achieve a high degree of reliability. In the words of an American author reliability is not something that can be subsequently added by the pound or dozen, but must be designed into the unit from the beginning.

In Figure 2 three stress ranges are shown schematically, which in principle apply to any kind of stress and any functional property: a range A where the stress is so slight that the transistor reacts indifferently and in practice exhibits a constant reliability level a; a stress level C, which is characterized by a rapid decrease c of the reliability and represents the destruction range; it is usually forbidden by the manufacturer through the establishment of the limiting values; finally we have a range B with a more or less strong change b in the reliability. This range is

Auswirkung führt und daß die Auswirkung um so größer sein wird, je stärker die Beanspruchung ist. Unter Beanspruchung eines Transistors verstehen wir beispielsweise die Belastung durch Spannung, Strom, Leistung, Temperatur, Umgebungsklima usw. Unter Auswirkung sind Änderungen der Funktionseigenschaften eines Transistors zu verstehen. Solche Eigenschaften können sich je nach Beanspruchung stetig oder abrupt um kleinste, kaum meßbare Beträge bis zu einem Vielfachen ändern. Der Änderungsbetrag wird aber auch abhängen von der Güte des betrachteten Transistorexemplares oder Kollektivs, und man muß im allgemeinen damit rechnen, daß ein fehlerbehafteter Transistor stressempfindlicher ist als ein idealer Transistor. Ein sich ändernder Transistor wird schließlich zu einem Funktionsversagen eines Gerätes führen, wenn dieser die in eine Schaltung einkalkulierten Toleranzen überschreitet.

Insgesamt haben wir also drei Einflußgrößen auf die Zuverlässigkeit eines Gerätes: Güte der Bauelemente (hier des Transistors), Schaltungsdimensionierung sowie Art und Größe der Beanspruchung.

Aufgrund der engen Verflechtung dieser drei Größen erwächst folgerichtig die Notwendigkeit einer ebenso engen Zusammenarbeit zwischen Transistorhersteller und Anwender und eine breite Überlappung der »Verantwortungsbereiche« der beiden Partner, wenn ein hohes Maß an Zuverlässigkeit erreicht werden soll. Nach den Worten eines amerikanischen Autors ist also Zuverlässigkeit nicht etwas, was man pfundweise oder dutzendweise nachträglich einem Gerät hinzufügen kann, sondern eine von der Gesamtkonzeption des Gerätes abhängige Größe, ein bei der Planung einkalkuliertes Qualitätsmerkmal.

In der Abbildung 2 werden grobschematisch drei

usually the most interesting because it is here that the production costs are weighed against the reliability to be expected in order to determine the overall profitableness. In reality these three ranges run smoothly into each other and the inclinations shown can be regarded as tangents at the centre of the ranges.

In order to give an idea of the quantity  $b$  it should be mentioned that with some components for the temperature stress a factor of 2 can be applied over a relatively wide stress range for the decrease in reliability for each 10 degrees increase in temperature, a magnitude, which is based on physico-chemical laws.

Since a transistor is usually subjected to several stresses at the same time, which are mutually dependent upon one another, various families of curves are required for each type of stress. The aim of the transistor maker is to supply such data for important stresses; however, we should not expect too much in the way of extent and accuracy of this data, as with the present-day high quality level and the everchanging types and equipment technique we soon come up against principle limits and nonsensical tasks for statistical reasons. (See also the section on testing). Necessary, and as a rule adequate for the intended typical uses, are orientating reliability data, i. e. tendencies and orders of magnitude to be expected.

### 3.2. Interplay between development and manufacture

When a transistor type is put into production after a development time of say one year, the development work is still not finished. Particularly with modern and important types there is no clear

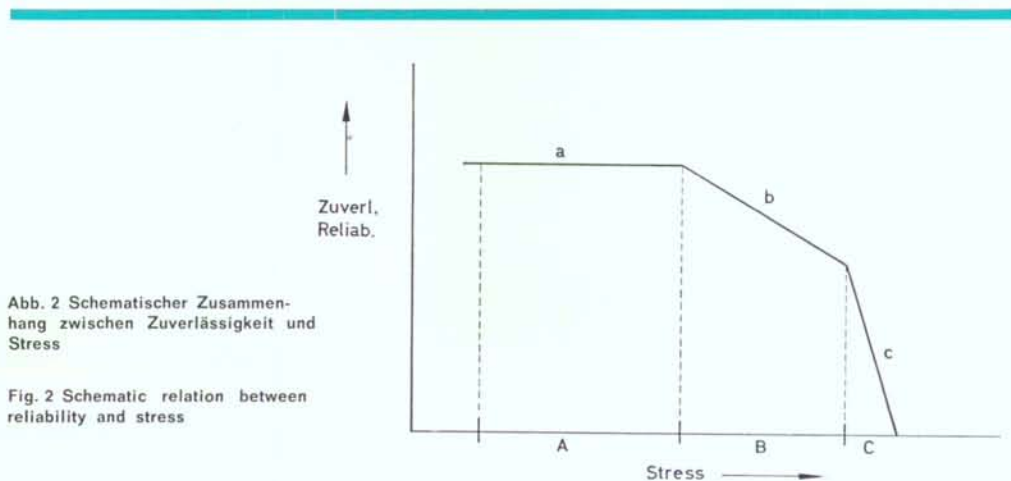


Abb. 2 Schematischer Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und Stress

Fig. 2 Schematic relation between reliability and stress

Otolaryngologische  
Klinik  
der Universität Zürich



Stress-Bereiche unterschieden, die im Prinzip für jede Beanspruchungsart und jede Funktionseigenschaft zutreffen: Ein Bereich A mit so niedrigem Stress, daß sich der Transistor noch indifferent verhält und in der Praxis ein konstantes Zuverlässigkeits-Niveau  $a$  zeigt; ein Stress-Niveau C, das durch eine rapide Abnahme  $c$  der Zuverlässigkeit charakterisiert ist und den Zerstörungsbereich darstellt; es ist normalerweise vom Hersteller durch Festlegung der Grenzdaten verboten; schließlich haben wir einen Bereich B mit einer mehr oder minder starken Änderung  $b$  der Zuverlässigkeit. Dieser Bereich ist meist der interessanteste, weil überwiegend hier der Aufwand für das Gerät und die erwartete Zuverlässigkeit gegeneinander abgewogen werden und somit die gesamte Wirtschaftlichkeit festgelegt wird. In Wirklichkeit schließen sich diese drei Bereiche natürlich stetig aneinander und die angedeuteten Neigungen können als Tangenten in der Mitte der Bereiche aufgefaßt werden.

Um einen Begriff von der Größe  $b$  zu geben, sei erwähnt, daß für Temperaturbeanspruchung bei manchen Bauelementen über einen relativ weiten Stress-Bereich ein Faktor 2 an Zuverlässigkeitsverminderung für 10 Grad Temperaturerhöhung angesetzt werden kann, eine Größe, der physikalisch-chemische Gesetze zugrunde liegen.

Da ein Transistor im allgemeinen gleichzeitig mit mehreren Stress-Arten beaufschlagt ist, die wiederum gegenseitige Abhängigkeiten bewirken, werden für jede Stress-Art verschiedene Kurvenscharen notwendig. Solche Daten für wichtige Beanspruchungen zu liefern, ist das Ziel der Transistorhersteller; doch darf man die Erwartungen hinsichtlich des Umfangs und der Genauigkeit dieser Daten nicht zu hoch ansetzen, weil man bei dem heute schon erreichten hohen Qualitätsniveau und bei der Schnellebigkeit der Typen und der

boundary either with respect to time or technology between development and manufacture. On the contrary most types undergo continuous developments and are improved with respect to costs and reliability both as a result of factory tests and under the external pressure of the user and market, who frequently increase their demands as to function and stress.

In this connection, our interesting problem of further development is the improvement of reliability; table 2 shows the schedule schematically. It applies to any technical product where there is a retroactive connection between user and maker.

Naturally, this regulating mechanism will first eliminate major faults; whether it is more economical to eliminate the cause of the faults or the faulty transistors, must be decided by the maker for the case in question.

Minor faults are difficult to detect even when we assume that they occur more frequently. This is because with constant stress the effect on the functional properties is very slight and long testing times are required before measurable changes occur, i. e. the statistical material for clarifying the cause of failure is scanty and unreliable. The more stringent the reliability requirements and the more perfectly developed a type is, the less are the chances of clarifying cause and effect, i. e. determining the causal relations between the various stresses and the minor imperfections of a transistor. For this reason we speak of "random" failures. Such transistors first exhibit a normal course and then go outside the limits of the failure criterion more or less rapidly after an unforeseeable period of time. This is illustrated in Fig. 3 with the two transistors

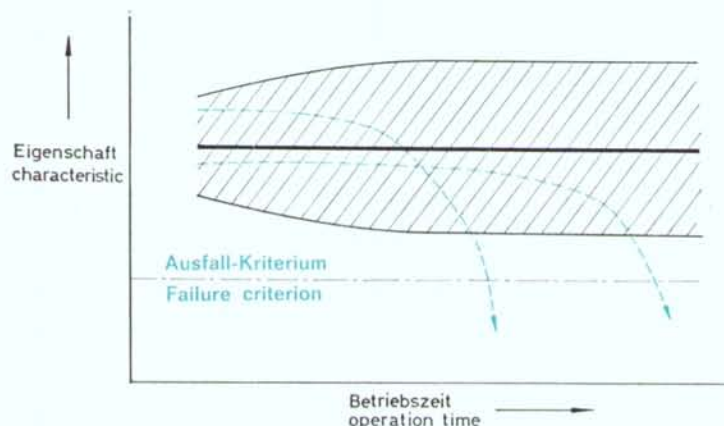


Abb. 3 Zeitlicher Verlauf einer Transistoreigenschaft eines Kollektivs

Fig. 3 Characteristic of transistors versus operation time

Tab. 2

Position Item	Bereich Phase	Vorgang Procedure	Ergebnis Results
1	Erprobung Testing	Beanspruchung Stress	Ausfall Failure
2	Entwicklung Development	Ausfall-Analyse Failure analysis	Ausfall-Mechanismus Failure mechanism
3	Fertigung Manufacture	Fertigungsregelung Manufacture regulation	Ausschaltung der Fehlerursache Elimination of cause of failure
und / oder and / or			
4	Erprobung Testing	Entwicklung spezifischer Prüfmethode Specific test methods	Ausscheidung der Fehlerhaften Elimination of defectives

Gerätetechnik aus statistischen Gründen bald auf prinzipielle Grenzen und wirtschaftlich unsinnige Aufgaben stößt. (Siehe auch Abschnitt über Erprobung). Notwendig und im allgemeinen auch ausreichend für die vorgesehenen typischen Anwendungen sind orientierende Zuverlässigkeits-Daten, das heißt zu erwartende Tendenzen und Größenordnungen.

### 3.2. Zusammenspiel zwischen Entwicklung und Fertigung

Wenn ein Transistortyp nach einer Entwicklungszeit von beispielsweise 1 Jahr in die Fertigung kommt, so ist die Entwicklungsarbeit noch nicht abgeschlossen. Gerade bei modernen und wichtigen Typen gibt es keine scharfen Zäsuren in zeitlicher oder technischer Hinsicht zwischen Entwicklung und Fertigung; vielmehr machen die meisten Typen eine stetige Weiterentwicklung durch und zwar sowohl unter dem Herstelleraspekt einer steigenden Wirtschaftlichkeit und einer Anhebung der Zuverlässigkeit aufgrund eigener Erprobungsergebnisse, als auch aufgrund des äußeren Druckes von der Applikation und vom Markt her, die vielfach steigende Anforderungen bezüglich Funktion und Beanspruchung bringen.

Unser in diesem Zusammenhang interessierendes Problem der Weiterentwicklung ist die Verbesserung der Zuverlässigkeit; die Tabelle 2 soll einen solchen Ablauf schematisch andeuten. Er gilt ganz allgemein für jedes technische Erzeugnis, bei dem ein Rückkopplungsweg von der Anwendung zur Herstellung möglich ist.

Dieser Regelmechanismus wird natürlicherweise zunächst die größeren Fehler ausräumen; ob das Ausschalten der Fehlerursache oder das Ausschneiden der fehlerhaften Exemplare wirtschaftlicher ist, kann für den jeweiligen Fall nur der Hersteller entscheiden.

Feinere Fehler kann man nur schwierig feststellen, auch wenn man annimmt, daß sie zahlreicher vorkommen. Denn bei konstant gehaltener Beanspruchung wird die Auswirkung auf die Funktionseigenschaften sehr klein sein und daher lange

marked in colour, which drop outside the shaded area; this shaded area can exhibit a constant mean value with respect to time.

## 4. Testing

### 4.1. Tasks

By testing we understand the study of the passive properties of a transistor under stresses such as voltage, power, temperature, and the observation of the effects of the stresses on the functional performance, e.g. on the gain, the noise etc. The course of testing is very manifold and changes with the development stadium and production maturity.

The first laboratory samples are subjected to rough brief tests and destructive tests with respect to the target values.

Once a stage of development is reached that allows the production of small laboratory batches, step stress tests are a valuable aid for the development engineer in order to throw light on the progress of the technological design and to watch over the elimination of faults. This testing is based on step-by-step increasing of the stress level on a number of transistors, whereby the failures in the individual stress steps result in a certain definite frequency distribution. Provided suitable equipment is available for carrying them out, such tests only take a few hours or days and are extremely important for any development owing to the decisive factor of time saving. From the type and breadth of the distribution and from its change in position resulting from changes in construction and method, the development engineer is able to estimate the success of his measures. Above all, with such tests the weak and strong points of a construction are investigated in order to influence the further development work. For instance, the expenditure for transistors that are "too successful" according to the target can be reduced (economy!) or weak points can be improved as the overall reliability depends primarily on the weakest parts of the design.

In addition to being a direct aid in the development, step stress results are most important for

Erprobungszeiten erfordern, bis meßbare Änderungen auftreten, das heißt das statistische Material zur Klärung der Ausfallmechanismen wird gering und zudem unsicher sein. Je höher die Zuverlässigkeitsansprüche werden und je vollkommener ein Typ durchentwickelt ist, um so geringer wird die Chance, Ursache und Wirkung aufzuklären, das heißt die kausalen Zusammenhänge zwischen den gleichzeitigen verschiedenen Beanspruchungen und den letzten kleinen Unvollkommenheiten eines Exemplares offenzulegen. Aus diesem Grunde spricht man dann von »Zufalls«-Ausfällen. Solche Exemplare haben also zunächst einen normalen Verlauf, um dann nach einer nicht vorhersehbaren Zeit mehr oder minder schnell das Ausfall-Kriterium zu überschreiten. Dies ist in Abbildung 3 mit den beiden farbig eingezeichneten Transistoren angedeutet, die sich aus dem schraffiert gezeichneten Kollektiv herauslösen; dieses selbst mag einen zeitlich konstanten Mittelwert aufweisen.

#### 4. Erprobung

##### 4.1. Aufgaben

Unter Erprobung versteht man die Beanspruchung eines Transistors auf seine passiven Eigenschaften wie Spannung, Leistung, Temperatur und die Beobachtung der Belastungsauswirkung auf das Funktionsverhalten, z. B. auf die Verstärkung, das Rauschen usw. Der Erprobungsablauf ist im allgemeinen sehr vielfältig und wandelt sich parallel zum Entwicklungsstand und zur Fertigungsreife.

Die ersten Labormuster werden zunächst in Kurzversuchen und Zerstörungstests grob auf die Target-Werte abgetastet.

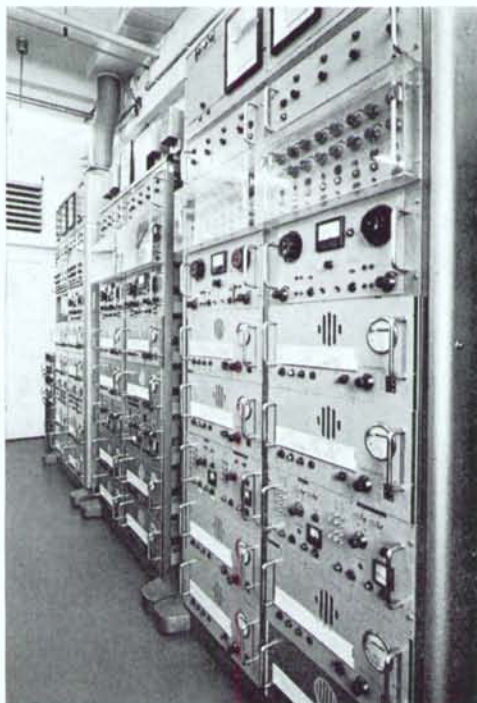
Ist eine Entwicklungsstufe erreicht, die kleine Labor-Chargen herzustellen erlaubt, sind Step-stress-Versuche ein wertvolles Mittel für den Entwicklungs-Ingenieur, die Fortschritte der technologischen Durchbildung und die Ausschaltung von Fehler-Mechanismen aufzuzeigen und zu kontrollieren. Diese Erprobung beruht auf der schrittweisen Steigerung der Belastung einer Anzahl von Transistoren, wobei die Ausfälle in den einzelnen Laststufen eine bestimmte Häufigkeits-Verteilung ergeben. Solche Versuche benötigen bei Vorhandensein geeigneter Einrichtungen für ihre Durchführung lediglich einige Stunden oder wenige Tage und sind wegen des entscheidenden Faktors Zeitgewinn in jedem Entwicklungsablauf von größter Wichtigkeit. Aus der Art und Breite der Verteilung und aus ihrer Lageänderung, die aus Konstruktions- und Verfahrensänderungen resultieren, kann der Entwickler den Erfolg seiner Maßnahmen abschätzen. Vor allem werden sich bei solchen Versuchen bevorzugt die starken und

establishing the maximum ratings and the derating curves, which are growing in importance. By derating we understand the reduction in the stress level in favour of more reliability or also in favour of another form of stress whose level can be increased without loss of reliability.

The step stress tests are followed by short-time tests of the order of magnitude of 1000 hours, which give the first indications about the performance over long periods of time. Depending upon the aim, these tests will also be carried out at different stress levels. However, the range will not stretch from the lowest level to the destruction level, but will be tailored to the type of the transistor and its intended use.

After sufficient favourable results have been accumulated, long-time tests of the order of magnitude of 10,000 hours can be started without fear of unpleasant surprises owing to experience gained in all technological fields and with similar types. These "operating life" tests form the actual comparison standard for the reliability data obtained parallel and at a later date from practical use in equipment. This backflow of data from the user to the transistor maker is extremely important for judging factory tests, but with few exceptions both the obtaining and evaluation of

4



schwachen Punkte einer Konstruktion herausheben und die weiteren Entwicklungsarbeiten entsprechend beeinflussen, indem beispielsweise der Aufwand für »zu gut geratene« und laut Target nicht notwendige Punkte reduziert werden kann (Wirtschaftlichkeit!), oder die noch schwachen Punkte mit besonderer Dringlichkeit bearbeitet werden, weil die Gesamtzuverlässigkeit naturgemäß überwiegend von der schwächsten Stelle des Designs abhängt.

Neben der direkten Entwicklungs-Unterstützung sind Stepstress-Ergebnisse die wichtigsten Unterlagen für die Grenzdaten-Festlegung und für die immer mehr Bedeutung gewinnenden Derating-Kurven. Unter Derating versteht man die Verringerung der Intensität einer Beanspruchung zugunsten höherer Zuverlässigkeit oder auch zugunsten einer anderen Beanspruchungsart, deren Intensität man dafür ohne Einbuße an Zuverlässigkeit erhöhen kann.

Auf den Stepstress-Erfahrungen aufbauend folgen die Kurzzeitteste von der Größenordnung 1000 Stunden, die erste Andeutungen für das Verhalten über längere Zeiten geben sollen. Je nach Zielsetzung wird man auch diese Teste mit gestaffelter Beanspruchung durchführen, wobei die Spannweite allerdings nicht mehr von geringster

the data are coupled with considerable difficulties and uncertainties.

It should also not be forgotten that mechanical and climatic tests should be made at a very early stage as defects in the construction of the mounting can cause considerable delays in the development if they are not detected early enough. In section 2.1 typical examples have already been given.

#### 4.2. Testing technique

To carry out the existing tasks extensive equipment is required, which includes on the one hand the actual stress testing facilities and on the other hand the measuring and evaluation facilities. Fig. 4 shows such testing equipment for transistors of low and medium power. These racks contain 4 stress units each for 400 transistors in addition to the necessary power supply of static and dynamic nature and to monitoring and regulating facilities. Fig. 5 shows a view of one of these units set up as air thermostats.

The automatic measuring device in Fig. 6 measures the transistors at predetermined time intervals. For this purpose they are taken out of the units in groups and are inserted in automatic thermostat magazines (left-hand side of picture).

5

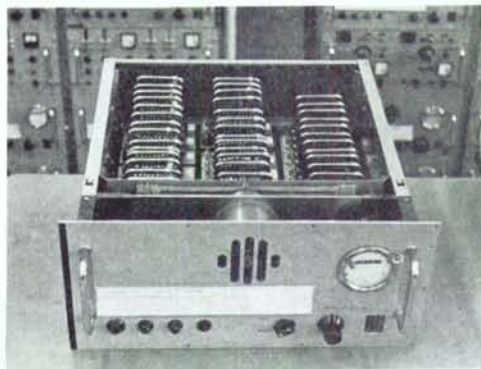


Abb. 4 Transistor-Erprobungs-Anlagen  
Fig. 4 Transistor testing equipment

Abb. 5 Belastungseinschub  
Fig. 5 Stress unit

Abb. 6 Transistor-Meßautomat  
Fig. 6 Transistor measuring system

6



Intensität bis zum Zerstörungsniveau reicht, sondern eine typengemäße und anwendungsnahe Beanspruchung angestrebt wird.

Nach Vorliegen einer Reihe günstiger Ergebnisse wird man aufgrund von Erfahrungen aus verwandten Technologien und Typengebieten bei den folgenden Langzeit-Versuchen der Größenordnung 10 000 Stunden im allgemeinen größere negative Überraschungen nicht mehr befürchten müssen. Diese »Lebensdauer«-Versuche bilden die eigentliche Vergleichsbasis für die Zuverlässigkeitsdaten, die sich parallel und später aus dem praktischen Geräteinsatz ergeben. Dieser Rückfluß der Daten vom Anwender zum Transistorhersteller ist außerordentlich wichtig für die reale Einschätzung der eigenen Versuchsergebnisse, doch ist mit wenigen Ausnahmen sowohl die Datenerfassung als auch deren Bewertung naturgemäß mit sehr großen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verknüpft.

Nicht zu vergessen sind schließlich mechanische und klimatische Erprobungen in einem möglichst frühen Entwicklungsstadium, weil zu spät bemerkte Konstruktionsmängel des Aufbaues zu erheblichen Verzögerungen im Entwicklungsablauf führen können. Im Abschnitt 2.1 wurden bereits einige typische Beispiele aufgeführt.

#### 4.2. Erprobungs-Technik

Zur Durchführung der bestehenden Aufgaben ist ein umfangreicher Gerätepark notwendig, der einerseits die eigentlichen Erprobungsanlagen mit den speziellen Beanspruchungsmöglichkeiten und andererseits die Meß- und Auswerteanlagen für die Bewertung umfaßt. Abbildung 4 zeigt solche Erprobungsgeräte für Transistoren kleiner und mittlerer Leistung. Diese Belastungsschranke enthalten neben den notwendigen Stromversorgungen statischer und dynamischer Art und den Überwachungs- und Regeleinrichtungen je 4 Belastungseinschübe für 400 Transistoren. Abbildung 5 gibt einen Einblick in einen dieser als Luft-Thermostaten ausgebildeten Einschübe.

Der Meßautomat in Abbildung 6 mißt in festgelegten Zeitabständen die Transistoren, die hierzu aus den Einschüben hordenweise in automatische Thermostaten-Magazine umgesteckt werden (im Bild links). Die Daten werden von einer Ausgabemaschine ausgedruckt und gleichzeitig für die automatische Auswertung in Lochstreifen festgehalten (rechte Bildhälfte).

Die Auswertung solcher Versuche hat 2 Hauptziele:

- a) Die Anzahl der Ausfälle eines Kollektivs innerhalb einer bestimmten Beanspruchungs-Zeit
- b) die Änderungsfaktoren wichtiger Transistor-Eigenschaften als Funktion der Zeit.

The data values are printed out by a machine and at the same time punched in tape for automatic evaluation (right-hand side of picture).

The evaluation of such tests has 2 main aims:

- a) The number of failures within a given test time
- b) The change factors of important transistor properties as a function of time.

These two data are the nucleus of every quality evaluation of a type and at the same time they provide the maker with the main guide lines for dimensioning the circuitry.

The aims also essentially determine the considerable expenditure for the aforementioned equipment. Since modern transistors have a very high level of quality, the first aim calls for a relatively large number of transistors in every test in order to obtain any failures at all. The second point requires exact measurement over long periods of time with widely spread parameter ranges, such as for instance current strengths from the pico-ampere to the ampere range. Speed and accuracy in obtaining and evaluating these data make necessary extremely reliable testing plants.

#### 4.3. Reliability quantities

Whilst the aforementioned change factors do not require any explanation as long as they are small, I want to deal here with a few important definitions on the failures. All definitions of terms are based on the fact that for economic reasons reliability tests are never made on the whole production but only on part of it. For this purpose the production to be evaluated is divided into batches, from which samples are taken for testing in accordance with a definite plan. The results of the sample tests are now applied to the batch as a whole. This is of course associated with statistical uncertainty. This uncertainty is the less, the greater the number of samples and the higher the failure rate. From this four important terms obtain:

a) *Failure quota*: The *observed* number of failures in a sample over a long period of time (e.g. a few 1000 hours)

b) *Failure rate*: The number of failures per time interval estimated in a batch on the basis of the sample failure rate. This is usually given as number of failures per hour or failure percentage per 1000 hours.

c) *Confidence level*: The failure rate is an estimated value and as such involves probability, which is called the confidence level. Within this level the number of failures can be expected with

Diese zwei Angaben sind das Kernstück jeder Qualitätsbeurteilung eines Typs, und gleichzeitig geben sie dem Gerätehersteller die Hauptrichtlinien für die Schaltungsdimensionierung.

Die Zielsetzungen bestimmen im wesentlichen auch den erheblichen Aufwand für die zuvor beschriebenen Anlagen. Da nämlich die heutigen Transistortypen ein sehr hohes Qualitätsniveau aufweisen, setzt das erste Ziel für jeden Versuch eine relativ hohe Transistor-Stückzahl voraus, damit überhaupt Ausfälle festgestellt werden können. Der zweite Punkt verlangt eine hohe Meßgenauigkeit über lange Zeiten bei sehr weitgespannten Parameter-Bereichen, wie z. B. Stromstärken vom Picoampere bis zum Amperebereich. Geschwindigkeit und Genauigkeit bei dieser Datengewinnung und -verarbeitung stellen also höchste Anforderungen an die Eigenzuverlässigkeit solcher Erprobungsanlagen.

#### 4.3. Zuverlässigkeits-Größen

Während die zuvor genannten Änderungsfaktoren keiner besonderen Erläuterung bedürfen, sofern diese Änderungen klein sind, sollen hier einige wichtige Definitionen über die Ausfälle aufgeführt werden.

Alle Begriffsbestimmungen gehen von der Tatsache aus, daß Zuverlässigkeits-Erprobungen aus wirtschaftlichen Gründen nie an der gesamten Produktion, sondern nur an einem Teil durchgeführt werden können. Hierzu wird die zu beurteilende Produktion in Lose eingeteilt, aus denen nach bestimmten Plänen Stichproben für die Untersuchungen entnommen werden. Die konkreten Stichproben-Ergebnisse werden nun auf die Lose übertragen, was natürlich mit einer statistischen Unsicherheit verbunden ist. Diese Unsicherheit wird umso geringer sein, je größer der Stichprobenumfang war und je mehr Ausfälle aufgetreten sind. Hieraus ergeben sich vier wichtige Begriffe:

a) *Ausfallquote*: Beobachtete Anzahl der Ausfälle in einer Stichprobe während eines größeren Zeitintervalls (z. B. einige 1000 Stunden).

b) *Ausfallrate*: Geschätzte, nämlich von der Stichprobe auf das Los übertragene Ausfallzahl pro Zeitintervall. Übliche Angaben: Ausfallzahl pro Stunde oder Ausfall-Prozentsatz pro 1000 Stunden.

c) *Vertrauensbereich*: Die Ausfallrate ist ein Schätzwert und daher mit einer Unschärfe verbunden, der Vertrauensbereich genannt wird. Innerhalb dieses Bereiches kann die Ausfallzahl mit einer vorgegebenen Aussage-Wahrscheinlichkeit



Seit Jahrzehnten verwenden wissenschaftliche Institute für akustische Messungen bei der Klärung von Fragen der Schallübertragung und des Hörvorganges das in seiner Qualität unerreichte

## Dynamische Meßtelefon DT 48

Bitte fordern Sie Prospekte an!

# BEYER

ELEKTROTECHNISCHE FABRIK  
71 HEILBRONN/NECKAR · THERESIENSTRASSE 8  
POSTFACH 170 · TEL. 82348 · FERNCHR. 7-28771

von beispielsweise 60, 90 oder 99 % erwartet werden. Es ist einleuchtend, daß eine hohe Aussage-sicherheit viele Beobachtungen voraussetzt und daß bei vorgegebener Aussagewahrscheinlichkeit nur ein breiter Vertrauens-Bereich angegeben werden kann, wenn bei der Stichprobe wenig Ausfälle vorliegen. Je besser also eine Produktion ist, um so unsicherer wird die Aussage über diese »Güte«, wenn nicht gleichzeitig eine analoge Vergrößerung des Stichprobenumfanges vorgenommen wird.

d) *MTBF*: Mittlere fehlerfreie Betriebszeit als Abkürzung für »Mean Time between Failures«; übliche Angabe in Stunden. Sie wird bestimmt aus dem Verhältnis der Gesamtbetriebszeit aller Geräte eines Typs zu der Anzahl der aufgetretenen Fehler.

Während der Begriff der Ausfallrate mehr auf die Denkweise des Transistor-Herstellers zugeschnitten ist, hat die MTBF ihre Bedeutung insbesondere bei den Großgeräten der Datenverarbeitung und der Nachrichtenverbindungen, bei denen eine Wartungs- und Instandsetzungs-Möglichkeit besteht. Diese Zeit ist ein entscheidendes Merkmal für die Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit einer Anlage.

Die zwei folgenden Zahlenbeispiele erläutern den Zusammenhang zwischen Ausfallrate und fehlerfreier Betriebszeit:

Als grobe Vereinfachung sei angenommen, daß eine Rechenanlage  $10^5$  Bauelemente enthält, deren Ausfallraten etwa gleich seien und  $10^{-8}$  pro Stunde betrage; dann ist die MTBF 1000 Stunden.

Ein Kleingerät mit nur 100 Bauteilen und der viel größeren Ausfallrate von  $10^{-6}$  pro Stunde würde im Mittel 10 000 fehlerfreie Betriebsstunden ergeben, was bei einem Hörgerät oder einem Taschenradio einer Anwendungszeit von mehreren Jahren entspricht.

Die oben genannten Ausfallraten von  $10^{-6}/h$  und  $10^{-8}/h$  stellen das Zuverlässigkeitsniveau dar, das die heutige Transistortechnik erreicht hat. Die Beispiele zeigen gleichzeitig die Grenzen auf, die einer Erprobung aus wirtschaftlichen oder zeitlichen Gründen gesetzt sind. Denn um bei einem Transistortyp mit einer Ausfallrate von  $10^{-8}/h$  einen einzigen Ausfall feststellen zu können, müssen im Mittel 10 000 Transistoren 10 000 Stunden lang betrieben werden. Solche Größenordnungen können nur bei enger Zusammenarbeit zwischen Transistorhersteller und Anwender in einem Erfahrungsaustausch von Zuverlässigkeits-Prognosen und Betriebserfahrungen gemeistert werden.

a predetermined probability of for instance 60, 90 or 99 %. It stands to reason that a high degree of accuracy in stating the failure rate calls for many observations and that with a predetermined probability only a wide confidence level can be given when the number of failures per sample is low. Therefore, the better the production, the more uncertain the information on the "quality" if the extent of the sampling is not increased analogously.

d) *MTBF*: Mean time between failures, usually given in hours. It is determined from the ratio of the overall operating time of all equipment of one type to the number of failures.

Whilst the term failure rate is tailored more to the mentality of the transistor maker, the MTBF is particularly important with the large units for data processing and for communications in the case of which maintenance and repair are possible. This time is a decisive characteristic for the reliability and profitableness of a unit.

The following two numerical examples explain the connection between failure rate and failure-free operation:

For the sake of simplicity let us assume that a computer contains  $10^5$  components having approximately the same failure rate of  $10^{-8}$  per hour: then the MTBF is 1000 hours.

A small apparatus with only 100 components and a higher failure rate of  $10^{-6}$  per hour would have a MTBF of 10,000 hours, which in the case of a hearing aid or pocket radio corresponds to a switch-on time of several years.

The above-mentioned failure rates of  $10^{-6}$  and  $10^{-8}$  represent the reliability level of present-day transistors. At the same time the examples reveal the limitations of testing from the aspect of economy and time, since with a failure rate of  $10^{-8}$  it is necessary to test 10,000 transistors for 10,000 hours before a single transistor fails. Such orders of magnitude can only be mastered by close cooperation between the transistor maker and the user in the way of exchange of experience with regard to reliability prognosis and operation.