

DIN EN IEC 63287-1



ICS 31.080.01

EntwurfEinsprüche bis 2020-07-08
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 60749-43:2018-05

**Halbleiterbauelemente –
Allgemeine Leitlinien für die Qualifikation von Halbleitern –
Teil 1: Leitlinien für die LSI-Zuverlässigkeitsqualifikation
(IEC 47/2614/CDV:2020);
Deutsche und Englische Fassung prEN IEC 63287-1:2020**

Semiconductor devices –
Generic semiconductor qualification guidelines –
Part 1: Guidelines for LSI reliability qualification
(IEC 47/2614/CDV:2020);
German and English version prEN IEC 63287-1:2020

Dispositifs à semiconducteurs –
Lignes directrices génériques concernant la qualification des semiconducteurs –
Partie 1: Lignes directrices concernant la qualification de la fiabilité de l'intégration à
grande échelle (LSI)
(IEC 47/2614/CDV:2020);
Version allemande et anglaise prEN IEC 63287-1:2020

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-05-08 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses
Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE oder Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 83 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Nationales Vorwort

Die Deutsche Fassung des europäischen Dokuments prEN IEC 63287-1:2020 „Halbleiterbauelemente – Allgemeine Leitlinien für die Qualifikation von Halbleitern – Teil 1: Leitlinien für die LSI-Zuverlässigkeitsqualifikation“ (Entwurf in der Umfrage) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dem entsprechend ist das internationale Dokument IEC 47/2614/CDV:2020 „Semiconductor devices – Generic semiconductor qualification guidelines – Part 1: Guidelines for LSI reliability qualification“ unverändert in den Entwurf prEN IEC 63287-1:2020 übernommen worden.

Da die Deutsche Fassung noch nicht endgültig mit der Englischen und Französischen Fassung abgeglichen ist, ist die englische Originalfassung des IEC-CDV entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 47 „Semiconductor devices“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet.

Bei der Abstimmung zu dem Europäischen Schluss-Entwurf bei CENELEC und dem Internationalen Schluss-Entwurf bei IEC [Final Draft International Standard (FDIS)] sind jeweils nur „JA/NEIN“-Entscheidungen möglich, wobei „NEIN“-Entscheidungen fundiert begründet werden müssen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 631 „Halbleiterbauelemente“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 60749-43:2018-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) neue Norm-Nummer und neuer Titel für die Leitlinien der Halbleiter-Qualifikation eingeführt;
- b) neuer Abschnitt zum Familien-Konzept eingefügt;
- c) Gestaltung des Dokuments an die aktuellen Regeln angepasst;
- d) Übersetzung des Dokuments redaktionell überarbeitet.

**Halbleiterbauelemente –
Allgemeine Leitlinien für die Qualifikation von Halbleitern –
Teil 1: Leitlinien für die LSI-Zuverlässigkeitsqualifikation**

Inhalt

	Seite
Einleitung	3
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe	4
4 Produktkategorien und Anwendungsfälle	5
5 Ausfall	7
5.1 Ausfallverteilung	7
5.2 Frühausfälle	8
5.2.1 Beschreibung	8
5.2.2 Frühausfallrate	9
5.2.3 Sichtung (en: Screening)	12
5.3 Zufälliger Ausfall	14
5.3.1 Beschreibung	14
5.3.2 Mittlere Ausfallrate	15
5.4 Abnutzungsbedingter Ausfall	17
5.4.1 Beschreibung	17
5.4.2 Abnutzungsbedingte Ausfallrate	18
6 Zuverlässigkeitsprüfung	21
6.1 Beschreibung der Zuverlässigkeitsprüfung	21
6.2 Zuverlässigkeitsprüfplan	21
6.2.1 Verfahren zum Erstellen eines Zuverlässigkeitsprüfplans	21
6.2.2 Schätzung der zum TDDB-Nachweis auf Grundlage der Anzahl der Prüfmuster erforderlichen Prüfdauer	24
6.2.3 Schätzung der zum TDDB-Nachweis auf Grundlage der Prüfdauer erforderlichen Anzahl an Proben	25
6.3 Verfahren der Zuverlässigkeitsprüfung	26
6.4 Beschleunigungsmodelle für Zuverlässigkeitsprüfungen	30
6.4.1 Arrhenius-Modell	30
6.4.2 V-Modell:	30
6.4.3 Absolutes Wasserdampfdruck-Modell	30
6.4.4 Coffin-Manson-Modell	30
6.5 Familien-Konzept	30
6.5.1 Durchführung von Lebensdauerprüfungen mittels Familie	30
6.5.2 Nachweis der Frühausfallrate mittels Familie	33
7 Belastungsprüfverfahren	35
8 Ergänzende Prüfungen	36
9 Tabellarische Zusammenfassung der Voraussetzungen	37
10 Zusammenfassung	38
Literaturhinweise	40

	Seite
Bilder	
Bild 1 – Badewannenkurve	7
Bild 2 – Ausfallsverhalten von Losen bei der IC-Herstellung während der Frühausfallphase.....	8
Bild 3 – Prinzipielles Weibull-Diagramm für die Frühausfallrate.....	9
Bild 4 – Beispiel für ein Ausfallsverhältnis: α (in Hundertern) und Anzahl der Ausfälle für ein CL von 60 %.....	11
Bild 5 – Sichten und geschätzte Frühausfallsrate im Weibull-Diagramm.....	13
Bild 6 – Badewannenkurve mit Festlegung des Nullpunktes unmittelbar nach der Fertigung	14
Bild 7 – Badewannenkurve mit Festlegung des Nullpunktes nach dem Sichten	14
Bild 8 – Prinzipielle Darstellung der Berechnungsmethode für die mittlere Ausfallrate anhand der Exponentialverteilung	15
Bild 9 – Prinzipielle Darstellung der Berechnungsmethode für die mittlere Ausfallrate als eine Erweiterung der Frühausfälle	16
Bild 10 – Prinzipielle Darstellung der abnutzungsbedingten Ausfälle	18
Bild 11 – Prinzipielle Darstellung zur Beschreibung des Konzepts der beschleunigten Prüfung.....	19
Bild 12 – Konzept der Zuverlässigkeitsprüfung in einem Weibull-Diagramm (auf Grundlage des Stichprobenumfangs)	23
Bild 13 – Konzept der Zuverlässigkeitsprüfung in einem Weibull-Diagramm (auf Grundlage der Prüfdauer).....	26
Bild 14 – Unterschiede in Bezug auf die Stichprobenumfänge entsprechend dem m -Wert (Prinzip)	27
Bild 15 – Wie die Sichtungsehlerrate in Abhängigkeit von Unterschieden in der Chipgröße gesehen wird (Beispiel)	34
Tabellen	
Tabelle 1 – Beispiele für Produktkategorien.....	6
Tabelle 2 – Kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,1 % über 10 Jahre hinweg [$\times 10^{-6}$] für das 3., 5. und 7. Jahr.....	23
Tabelle 3 – Wesentliche Zuverlässigkeits-(Lebensdauer-)Prüfverfahren und -zwecke	28
Tabelle 4 – Beispiele für die Anzahl der Prüfmuster und die Prüfdauer in typischen Zuverlässigkeits-(Lebensdauer-) Prüfverfahren	29
Tabelle 5 – Familien-Konzept (Beispiel).....	31
Tabelle 6 – Konzept von Unterschied/Ausfallmechanismus/entsprechendem Prüfpunkt (Beispiele).....	33
Tabelle 7 – Faktoren für Beispiele für die Berechnung der Frühausfallrate mittels Familiendaten.....	35
Tabelle 8 – LTPD-Stichprobentabelle für Annahmezahl $A_c = 0$	36
Tabelle 9 – Wesentliche Zuverlässigkeits-(Festigkeits-)Prüfverfahren und -zwecke	36
Tabelle 10 – Ergänzende Prüfungen.....	37
Tabelle 11 – Beschleunigungsfaktoren, Berechnungsformeln und numerische Werte.....	38

Einleitung

Dieses Dokument stellt Leitlinien für Hersteller von integrierten Halbleiterschaltungen (Halbleiter-IC) bei der Vorbereitung ausführlicher Prüfpläne zur Zuverlässigkeit für die Anerkennung von Bauelementen bereit. Solche Pläne sind vor Beginn von Qualifikationsprüfungen und nach Absprache mit dem Anwender des Halbleiter-IC-Produkts zu erstellen.

Der Leitfaden liefert einige Beispiele für die Erstellung von Prüfplänen zur Zuverlässigkeitsqualifikation, um entsprechende Bedingungen für die Zuverlässigkeitsprüfung zu bestimmen, die auf den in den Gebrauchsbedingungen jeder Anwendung integrierter Halbleiterschaltungen geforderten Qualitätsstandards basieren. Es werden Kategorien für Anwendungen im Automobilbau und für allgemeine Anwendungen als Zuverlässigkeitsziele eingeführt. Die Anspruchsklasse für die Automobilanwendung wird weiterhin in zwei Klassen entsprechend den Anwendungen unterteilt. In dem Leitfaden werden jährliche Betriebsstunden, die Lebensdauer usw. für jede Klasse angenommen und Verifizierungsverfahren für Frühausfallrate und abnutzungsbedingten Ausfall definiert, um entsprechende Zuverlässigkeitsprüfungen zu erstellen; gleichzeitig werden Konzepte für die fachgerechte Qualitätssicherung von integrierten Halbleiterschaltungen unter Anwendung von Sichtungstechniken, welche zur Senkung der Frühausfallrate ausgelegt sind, präsentiert.

Zu beachten ist, dass die in diesem Leitfaden präsentierten Prüfbedingungen und die Werte der Beschleunigungsfaktoren aufgeführt sind, um Berechnungsbeispiele zur Ermittlung von Zuverlässigkeitsprüfbedingungen für die Verifizierung der geforderten Qualitätsstandards bereitzustellen, und nicht ausgelegt sind, um die Standards zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit von integrierten Halbleiterschaltungen zu definieren.

ANMERKUNG Qualifikationsprüfungen sind Prüfungen, in welchen der Halbleiterhersteller der durch seine Produktanwender geforderten Zuverlässigkeit Rechnung trägt.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 63287-1 enthält Leitlinien für Qualifikationspläne zur Zuverlässigkeit von großen Halbleiter-IC-Produkten (LSI; en: large scale integrated circuit). Dieses Dokument ist nicht für Militär- und Raumfahrtanwendungen vorgesehen.

ANMERKUNG 1 Der Hersteller kann flexible Stichprobenumfänge verwenden, um Kosten zu senken und eine angemessene Zuverlässigkeit durch die vorliegende Leitlinienanpassung basierend auf EDR-4708, AEC Q100, JESD47 oder einem anderen relevanten Dokument zu erhalten, das, wenn festgelegt, anwendbar sein kann.

ANMERKUNG 2 Die in diesem Dokument angewandte Weibull-Verteilung ist eine von mehreren Methoden zur Berechnung des geeigneten Stichprobenumfangs und der geeigneten Prüfbedingungen eines bestimmten Zuverlässigkeitsprojekts.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60749-5, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 5: Steady-state temperature humidity bias life test*

IEC 60749-6, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 6: Storage at high temperature*

IEC 60749-15, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 15: Resistance to soldering temperature for through-hole mounted devices*

IEC 60749-20, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 20: Resistance of plastic encapsulated SMDs to the combined effect of moisture and soldering heat*

IEC 60749-21, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 21: Solderability*

IEC 60749-23, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 23: High temperature operating life*

IEC 60749-25, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 25: Temperature cycling*

IEC 60749-26, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 26: Electrostatic discharge (ESD) sensitivity testing – Human body model (HBM)*

IEC 60749-28, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 28: Electrostatic discharge (ESD) sensitivity testing – Charged device model (CDM) – Device level*

IEC 60749-29, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 29: Latch-up test*

IEC 60749-42, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 42: Temperature and humidity storage*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

3.1

Ausfallart

Klassifizierung der Art eines Ausfallphänomens, das zum Produktausfall führt

Anmerkung 1 zum Begriff: Unterbrechung, Kurzschluss, störende Dämpfung, mechanischer Abrieb, charakteristische Alterung usw. werden typischerweise als Ausfallsarten betrachtet.

3.2

Ausfallmechanismus

physikalischer, chemischer oder anderer Prozess, der zu einem Ausfall geführt hat

3.3

integrierte Schaltung

IC

Mikroschaltung, in der alle oder einige Schaltungselemente untrennbar zugeordnet und elektrisch miteinander verbunden sind, so dass diese für die Konstruktion und im Geschäftsverkehr als Einheit betrachtet wird

4 Produktkategorien und Anwendungsfälle

Qualitätsanforderungen, Betriebsstunden und Betriebsbedingungen von integrierten Schaltungen, welche für den Feldeinsatz gefordert werden, hängen von den Anwendungsfällen ab, in denen die Erzeugnisse verwendet werden. Als ein Beispiel für das Erstellen wissenschaftlicher Prüfpläne werden ihre Anwendungsfälle ganz allgemein in drei Produktkategorien gruppiert: Automobilanwendung A, Automobilanwendung B und Endverbraucher-/Konsumenten-anwendung. In Tabelle 1 ist eine Aufstellung der Qualitätsanforderungen hinsichtlich jeder Produktkategorie und die Definition ihrer Anwendungsbedingungen angeführt.

Tabelle 1 – Beispiele für Produktkategorien

Kategorie	Automobilbauanwendung A	Automobilbauanwendung B	Endverbraucher-/ Konsumenten-anwendung
Kriterien für Kategorie	Anwendung im Automobilbau für direkten sicherheitsrelevanten Einsatz. (Ausfälle können Unfälle verursachen.)	Anwendung im Automobilbau, der nicht direkt Sicherheitsbelange betrifft.	Anwendungen außerhalb des Automobilbaus. Industrielle Anwendungen müssen gesondert behandelt werden.
Anwendungsbeispiele	Motor, Bremsen, Fahrassistenz-Systeme, Airbags	Navigationssysteme, Klimaanlagen des Fahrzeugs, Audiosysteme	Hauselektronik, Spielzeug, Haushaltsgeräte
Jährliche Betriebsstunden	500 h (Fahrstunden) Ist abhängig davon, ob im Betrieb Zündung ein- oder ausgeschaltet ist.	500 h (Fahrstunden)	Bis zu 8 760 h Ist abhängig von der Anwendung.
Lebensdauer	15 Jahre (kumulative Ausfall-Wahrscheinlichkeit: 0,1 %)	15 Jahre (kumulative Ausfall-Wahrscheinlichkeit: 0,1 %)	Bis zu 10 Jahre (kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit: 0,1 %) Ist abhängig von der Anwendung.
Angenommene Betriebsbedingungen (Beispiele für Bedingungen, die für die Anwendungen unterschiedlich sind)	<p align="center">Beispiel für Motorraum</p> <p align="center">$T_{a,min} = -40\text{ °C} / T_{a,max} = 125\text{ °C}$</p> <p align="center">$T_{j,typ} = 100\text{ °C} / T_{j,max} = 150\text{ °C}$</p> <p align="center">min. relative Feuchte: 0 / max. relative Feuchte: 100 %,</p> <p align="center">relative Feuchte (bei 10 % Fahrt) (bei 70 % Stopp)</p> <p align="center">Beispiel für Innenraumbedingungen</p> <p align="center">$T_a = -40\text{ °C (min.)} / 85\text{ °C (max.)}$</p> <p align="center">$T_j = 85\text{ °C (typ.)} / 125\text{ °C (max.)}$</p> <p align="center">relative Feuchte = 0 (min.) / 100 % (max.),</p> <p align="center">relative Feuchte (bei 10 % Fahrt) (bei 70 % Stopp)</p>		<p align="center">$T_{a,min} = 0\text{ °C} / T_{a,max} = 70\text{ °C}$</p> <p align="center">$T_j = 70\text{ °C} / 105\text{ °C (max.)}$</p> <p align="center">relative Feuchte = 10 (min.) / 80 % (max.)</p> <p align="center">relative Feuchte (bei 20 % eingeschaltet) (bei 60 % ausgeschaltet)</p>
Frühausfallrate	1×10^{-6} oder weniger je Jahr	50×10^{-6} oder weniger je Jahr	Bis zu 500×10^{-6} je Jahr Ist abhängig von den Anwendung.
Zufallsausfallrate	10 FIT oder kleiner	50 FIT oder kleiner	>50 FIT (typisch) Ist abhängig von den Anwendung.
ANMERKUNG Es handelt sich um Beispiele für Anwendungsbedingungen und -anforderungen; diese müssen nicht alle erfüllt werden, um für jeden Anwendungsfall relevant zu sein.			

5 Ausfall

5.1 Ausfallverteilung

Die Ausfallverteilung von integrierten Schaltungen kann prinzipiell in drei Bereiche gegliedert werden: Frühausfall-Bereich (z. B. $t_{ELF} = 1$ Jahr), Zufallsausfall-Bereich und abnutzungsbedingter Ausfall-Bereich. In Bild 1 ist die Beziehung zwischen der Feld-Anwendungsdauer und der momentanen Ausfallrate (Badewannenkurve) dargestellt. Die Ausfallverteilungen für jeden der Bereiche sind in 5.2 bis 5.4 beschrieben.

Die meisten Frühausfälle werden während des Fertigungsprozesses bei IC-Herstellern beobachtet. Da allerdings die integrierten Schaltungen nicht einer vollständigen Sichtung unterzogen werden, können Probleme in einer relativ kurzen Zeitspanne nach dem Betriebsbeginn im Feld auftreten.

Zufallsausfälle werden so betrachtet, als ob sie eine bestimmte Ausfallrate hinsichtlich der Dauer erreichen, wobei allerdings in Wirklichkeit eine Erweiterung des Frühausfallbereiches, wo die Ausfallrate kontinuierlich abnimmt, angenommen wird. Etwaige herbeigeführte Ausfälle, die außerhalb der Kontrollmöglichkeit des Herstellers liegen, wie z. B. ESD und EOS, sollten nur in den Berechnungen der Ausfallsrate berücksichtigt werden, wenn eine Gesamtausfallsrate vorgesehen ist, welche diese Ausfallsarten einschließt.

Ein abnutzungsbedingter Ausfall ist ein Ausfall, welcher während des Lebensdauerendes von IC-Komponenten wie z. B. Transistoren oder Verdrahtungen, auftreten und somit die Lebensdauer der integrierten Schaltungen selbst angeben. Ein abnutzungsbedingter Ausfall ist ein Ausfall, der von dem Anwendungslastprofil (Zeitfenster können unterschiedlich sein) abhängig ist. Die Anzahl der Ausfälle nimmt mit der Zeit zu und jede IC wird nach Ablauf der zu erwartenden Lebensdauer des Bauelements schließlich einen Ausfall verursachen. Abnutzungsbedingte Ausfälle werden nicht auf die gleiche Weise berücksichtigt, da sie einen vollkommen anderen Mechanismus aufweisen und somit auch eine andere mathematische Beschreibung (Ausfallverteilung). Deshalb ist es wichtig, diese Ausfälle während der Nutzungsdauer zu vermeiden. Die zu erwartende Lebensdauer von integrierten Schaltungen wird im Allgemeinen als die Zeitdauer bis zum Erreichen der kumulativen Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,1 % im Verlauf der zu erwartenden Lebensdauer des Bauelements in der jeweiligen Anwendung definiert.

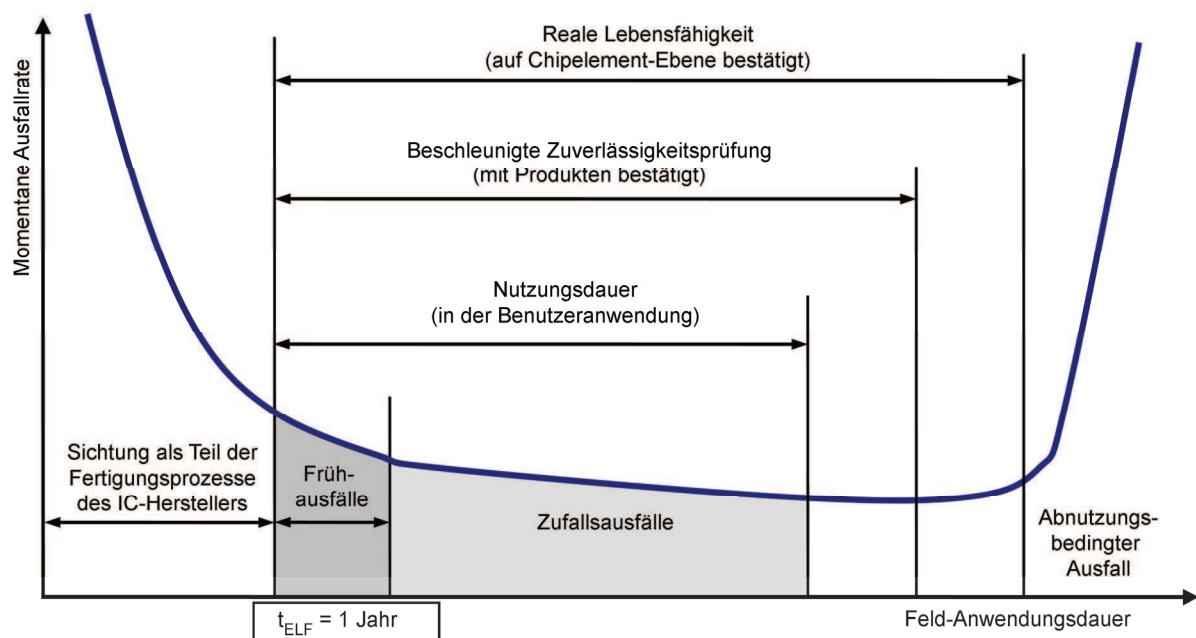


Bild 1 – Badewannenkurve

5.2 Frühausfälle

5.2.1 Beschreibung

Weil ICs sehr kleine Elemente enthalten und dicht und komplex sind, sind sie für Fehler, die im Fertigungsprozess entstehen, anfällig. Aus diesem Grund werden die guten Bauelemente, welche die geforderten Kennwerte und Funktionen erfüllen, in der letzten Fertigungsstufe aussortiert. Der Anteil der guten Bauelemente an der erzeugten und in diesem Prozess geprüften Gesamtzahl wird als Ausbeute (en: yield) bezeichnet. Im Zuge des Sortierens guter Bauelemente werden diese in Bezug auf möglichst viele Elemente, einschließlich der geforderten Kennwerte und Funktionen, gemessen. Jedoch können einige von diesen sortierten guten Bauelementen jene mit eingebauten latenten Mängeln oder Schwachstellen einschließen, die die elektrischen Kenngrößen nicht beeinflussen, weshalb die Bauelemente während des Sortiervorgangs korrekt arbeiten. Ist die Ausbeute hoch, ist es weniger wahrscheinlich, dass Bauelemente mit potenziellen Mängeln enthalten sind. Im Gegensatz dazu ist bei einer relativ niedrigen Ausbeute die Wahrscheinlichkeit hoch, dass ein Mix aus diesen Bauelementen mit latenten Mängeln und guten Bauelementen vorliegt. Bauelemente mit diesen potenziellen Mängeln können während der Verwendung irgendwann infolge der kürzeren Lebensdauer oder der Intensität der Benutzeranwendung ausfallen.

Eine geringe Anzahl geprüfter guter Bauelemente, die solche Mängel enthalten, sind im Herstellungslos enthalten und somit nimmt die Ausfallrate mit der Zeit ab. Das ist der Fall, weil die nicht fehlerhaften ICs, die wahrscheinlich keinen Ausfall verursachen, übrig bleiben, wenn die fehlerhaften ICs entfernt werden, nachdem sie einen Ausfall verursacht haben. In diesem Fall ist der Formparameter der Weibull-Verteilung: m kleiner als 1 ($m < 1$).

Enthält ein Herstellungslos konkret, wie in Bild 2 gezeigt, gute Bauelemente mit einem potenziellen Fehler, können elektronische Erzeugnisse mit solchen Bauelementen einen Ausfall während der Anwendung verursachen und die fehlerhaften ICs werden durch die Anwendung der Sichtung, Reparatur (Bauteil-Ersatz) oder Anordnung entfernt. Somit bleiben zuverlässige ICs übrig.

ANMERKUNG Es ist deutlich besser, dass Bauelemente mit latenten oder anderen Fehlern beim IC-Hersteller aussortiert werden, als wenn sie den Anwender erreichen, wo eine Korrektur dann viel kostspieliger ist.

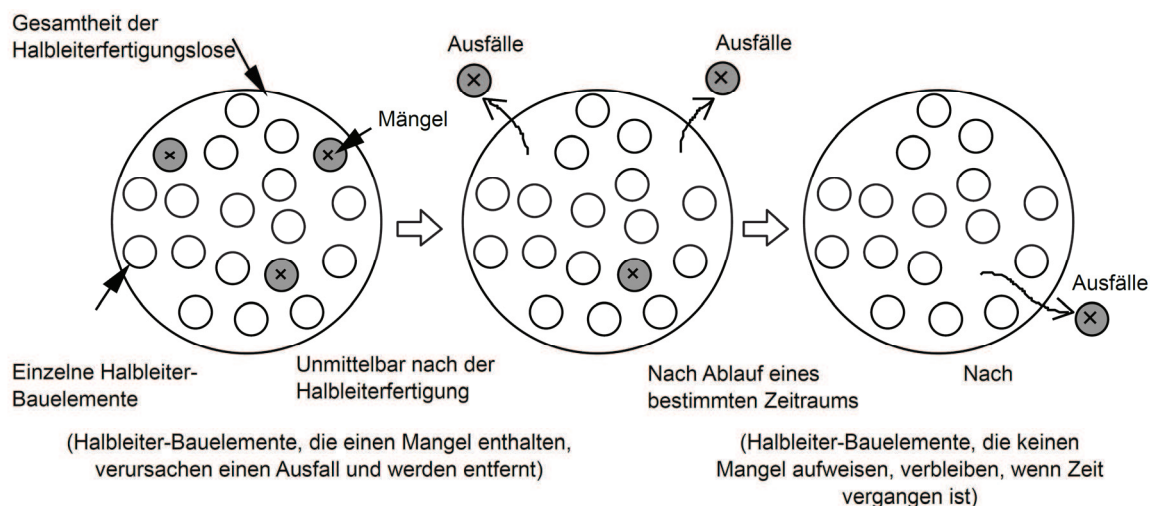


Bild 2 – Ausfallsverhalten von Losen bei der IC-Herstellung während der Frühausfallphase

Aus diesem Grund ist die Reduzierung der im Fertigungsprozess erzeugten Fehler die Hauptmaßnahme gegen diese Ausfälle. Eine andere mögliche Maßnahme, falls durchführbar, ist die Änderung des Designs zu einem Aufbau, der weniger anfällig für solche Fehler ist.

Es gibt auch Sichtungstechniken wie das Burn-in, bei dem die ICs unter relativ schweren Temperatur- und/oder Spannungsbedingungen arbeiten, um so einen Ausfall im Voraus zu verursachen und ICs mit Mängeln über das Aussortieren zu entfernen. Das dient dazu, die Frühausfallphase der ICs vor dem Versand zu

absolvieren und somit die Auswirkungen von Frühausfällen nach dem Versand zu reduzieren. Die Sichtung kann optimiert werden, wenn der Einfluss der oben angeführten Fehlerreduzierung bestätigt wurde.

5.2.2 Frühausfallrate

5.2.2.1 Definition der Frühausfallrate

Die Frühausfallrate kennzeichnet die Wahrscheinlichkeit der Abnahme von Ausfällen, welche aus Fertigungsfehlern resultieren und über eine Dauer von einem Jahr (als Frühausfallperiode definiert) auftreten, nach dem Versand durch den Hersteller der integrierten Schaltung und dem Betriebsbeginn im Feld (innerhalb des Bestückungsprozesses des Herstellers und in Endverbraucheranwendungen).

Die Frühausfallrate wird häufig als „kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit“ ausgedrückt, wobei die während der definierten Frühausfallperiode auftretende Ausfallrate numerisch in Prozent (%) oder parts-per-million (10^{-6}) ausgedrückt wird.

5.2.2.2 Kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit

Im Allgemeinen wird die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit wie folgt angegeben.

Wenn für die Weibull-Verteilung der Formparameter als m , der Skalenparameter als η und die Zeit als t ausgedrückt werden, wird die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ von 0 bis t durch Gleichung (1) definiert.

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^m}{\eta^m}\right) \quad (1)$$

In Bild 3 wird das Konzept der Frühausfallrate unter Verwendung eines Weibullverteilungs-Diagramms gezeigt.

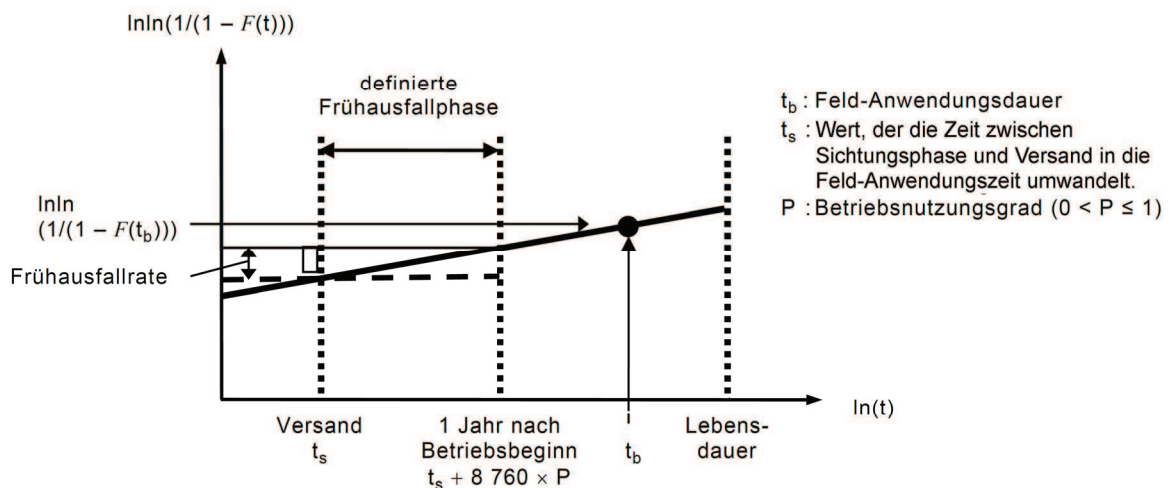


Bild 3 – Prinzipielles Weibull-Diagramm für die Frühausfallrate

In den folgenden Bereichen wird beschrieben, wie die Frühausfallrate auf Basis des bestätigten Ergebnisses der kumulativen Ausfallkonvergenz bei der Sichtungsprüfung zu berechnen ist.

5.2.2.3 Berechnung der Frühausfallrate

Angenommen, die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t_b)$ mit der Feld-Anwendungsdauer t_b wurde als bestätigtes Ergebnis der kumulativen Ausfallkonvergenz bei der Sichtungsprüfung erhalten. Der Weibull-Formparameter η wird anhand folgender Gleichung erhalten:

$$\eta = \frac{t_b}{\left[-\ln(1-f(t_b)) \right]^{\frac{1}{m}}} \quad (2)$$

Dabei gibt m den Wert an, der aus dem experimentellen Ergebnis oder als ein geschätzter Wert erhalten wurde. Wenn es jedoch null Ausfälle gibt, ist in der obigen Gleichung $F(t_b) = 0$ und der Skalenparameter η nicht bestimmt, da der Nenner 0 ist.

Aus diesem Grund muss eine χ^2 -(Chi-Quadrat-)Verteilung zur Definition der kumulativen Ausfallwahrscheinlichkeit $F_c(t_b)$ unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus verwendet werden.

Allerdings basiert dies auf der Voraussetzung, dass die Anzahl der Proben N ausreichend hoch ist.

ANMERKUNG Das zur Berechnung der Ausfallrate bei Halbleiterbauelementen typischerweise verwendete Konfidenzniveau beträgt 60 %.

Die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit auf dem festgelegten Konfidenzniveau und zum Zeitpunkt der Feld-Anwendungsdauer $F_c(t_b)$ ist durch Gleichung (3) angegeben.

$$F_c(t_b) \Big|_g = X^2_{\frac{d}{2 \times N}} \quad (3)$$

Dabei ist

- χ^2 Chi-Quadrat-Verteilung;
- g Konfidenzniveau (CL in %);
- d Freiheitsgrad = $(2 \times f) + 2$;
- t Anzahl der Ausfälle;
- N Anzahl der Proben.

Wird Gleichung (3) in Gleichung (2) eingesetzt, ergibt sich der Skalenparameter, der bei Berücksichtigung des Konfidenzniveaus zu verwenden ist:

$$\eta_c = \frac{t_b}{\left[-\ln(1 - F_c(t_b)) \right]^{\frac{1}{m}}} \quad (4)$$

Wenn der Wert, der aus der Sichtungsphase bis zum Versand in die Feld-Anwendungsdauer t_s umgewandelt wird, und der berechnete Wert η_c verwendet werden, ist unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus nach dem Versand die Frühausfallrate $F_c(t_1, t_s)$ wie folgt angegeben:

Treten in der Frühausfallphase Ausfälle auf, wird η anstelle von η_c verwendet und die Frühausfallrate berücksichtigt das Konfidenzniveau nach dem Versand nicht. $F(t_1, t_s)$ ist wie folgt angegeben:

$$F_c(t_1, t_s) = 1 - \exp \left[-\frac{(t_1 - t_s)^m}{\eta_c^m} \right] \quad (5)$$

$$F(t_1, t_s) = 1 - \exp \left[-\frac{(t_1 - t_s)^m}{\eta^m} \right] \quad (6)$$

Für beide Gleichungen (5) und (6) gilt: $t_1 = 365 \times 24 \times P$

Dabei ist

P Betriebsnutzungsgrad im Bereich von 0 (immer aus) bis 1 (immer an);

t_1 Zeitpunkt von einem Jahr nach Betriebsbeginn gemessen in Stunden (immer an = 8 760 h).

5.2.2.4 Berechnung eines Ausfallsratenverhältnisses

Das Ausfallsratenverhältnis α zwischen der Frühausfallrate F_c unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus mit g (in %) und der Frühausfallrate F ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus wird durch folgende Gleichungen ausgedrückt:

$$F_c = X^2_{g, \frac{d}{2 \times N}} \quad (7)$$

$$F = \frac{f}{N} \quad (8)$$

Dabei ist f = Anzahl der Ausfälle in N = Anzahl der Proben.

$$\alpha = \frac{F_c}{F} = \frac{X^2_{g, \frac{d}{2 \times N}}}{\left(\frac{f}{N}\right)} = (N/f) X^2_{g, \frac{d}{2 \times N}} \quad (9)$$

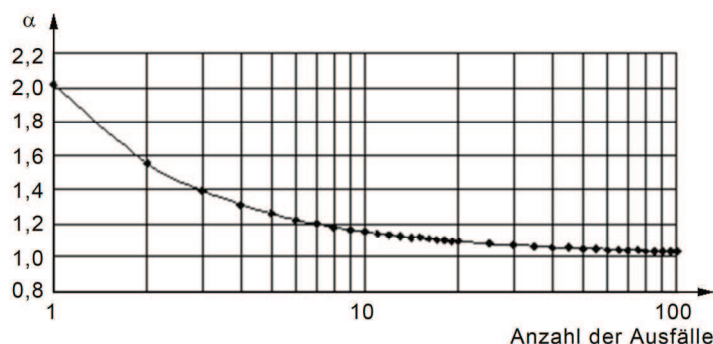


Bild 4 – Beispiel für ein Ausfallsverhältnis: α (in Hundertern) und Anzahl der Ausfälle für ein CL von 60 %

F wird anhand der Anzahl an Ausfällen bestimmt, nicht anhand der Anzahl der Proben N .

So wie die Anzahl der Ausfälle zunimmt, geht das Verhältnis zwischen der Rate unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus und der Rate ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus gegen 1.

Nach Bild 4 entspricht, wenn die kumulative Anzahl an Ausfällen 50 beträgt, die Differenz der Ausfallsraten zwischen der Frühausfallrate unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus F_c und der Frühausfallrate ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus F 5 % ($\alpha = 105$ für $N = 50$ gegenüber $\alpha = 100$ für große N).

Folglich kann die Frühausfallrate ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus verwendet werden, wenn die Differenz in der Frühausfallrate von der Anzahl der Ausfälle abhängig ist und die Berücksichtigung des Konfidenzniveaus zulässig ist.

BEISPIEL:

Wenn ein bestätigtes Ergebnis der kumulativen Ausfallkonvergenz bei der Sichtungsprüfung erhalten wird unter Anwendung von:

$$m = 0,3; t_b = 70\,298\text{ h}; N = 2\,000 \text{ und } f = 69,$$

und die Frühausfallrate $F_c(t_1; t_s)$ unter Anwendung von:

$$\text{CL von } 60\%; t_s = 70\,298\text{ h}; P = 1$$

Der Skalenparameter mit Konfidenzniveau wird anhand Gleichung (4) berechnet als $\eta_c = 5,57 \times 10^{52}$.

Die Frühausfallrate mit Konfidenzniveau wird anhand Gleichung (5) berechnet als $F_c(t_1; t_s) = 129 \times 10^{-6}$.

Der Skalenparameter ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus wird anhand Gleichung (2) berechnet als $\eta = 2,15 \times 10^{53}$.

Die Frühausfallrate ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus wird anhand Gleichung (6) berechnet als $F(t_1; t_s) = 124 \times 10^{-6}$.

Demnach entspricht in diesem Beispiel die Differenz der Ausfallraten zwischen der Frühausfallrate, unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus F_c und der Frühausfallrate, ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus F , $(129 - 124)/124 = 4\%$.

5.2.3 Sichtung (en: Screening)

Da integrierte Schaltungen sehr kleine Elemente enthalten und dicht gepackt mit einer komplexen Geometrie sind, sind sie für Fehler, die im Fertigungsprozess entstehen, anfällig. Folglich können manche der als „gute Bauelemente“ eingestuft Lose auch Bauelemente mit potenziellen Ausfällen enthalten, die einen vernachlässigbaren intrinsischen Fehler aufweisen, welcher die gemessenen elektrischen Kennwerte nicht beeinflusst. Dies ermöglicht es dem Bauelement, während des Sortiervorgangs korrekt zu arbeiten. Das Entfernen potenzieller Ausfälle vor dem Versand und die resultierende Reduktion oder Eliminierung von Frühausfallraten im Feld, wird als Sichtung (Screening) bezeichnet.

Allgemeine Sichtungsverfahren zur Entfernung von Bauelementen, die solche vernachlässigbaren intrinsischen Fehler aufweisen, schließen die Anwendung schärferer Beanspruchungen als unter realen Anwendungsbedingungen, wie z. B. durch Spannung und Temperatur ein, indem Produktprüfung und Burn-in kombiniert werden, sowie Verfahren zum Entfernen anfänglicher Fehler in Gehäusen unter Verwendung einer Röntgenstrahl-Prüfung und Sichtprüfungen, die Montagebeanspruchungen und Beanspruchungen unter Temperaturwechselprüfung usw. kombinieren. Sichtungsbedingungen müssen, wenn nötig, entsprechend der Ziel-Frühausfallrate angepasst werden. Sie sollten in einer solchen Art und Weise geprüft werden, dass das Sichten selbst die Lebensdauer nicht signifikant beeinflusst, d.h. die Dauer bis zur Abnutzung nicht reduziert. Durch das Stabilisieren der Produktfertigungslinien und der sorgfältigen Produktfertigung kann durch das Reduzieren intrinsischer Fertigungsfehler die Frühausfallrate des Produkts ebenfalls reduziert werden.

Burn-in wird allgemein nach der Gehäusemontage durchgeführt, aber in jüngster Zeit ist es üblich geworden, es auch an Chips auf Wafern durchzuführen. Beide Verfahren werden die gleiche Wirkung hinsichtlich der gewünschten Entfernung von Fertigungsfehlern in Bauelementchips hervorrufen. In Bild 5 ist die Beziehung zwischen dem Sichten und der Frühausfallrate, die statistisch geschätzt werden kann, dargestellt.

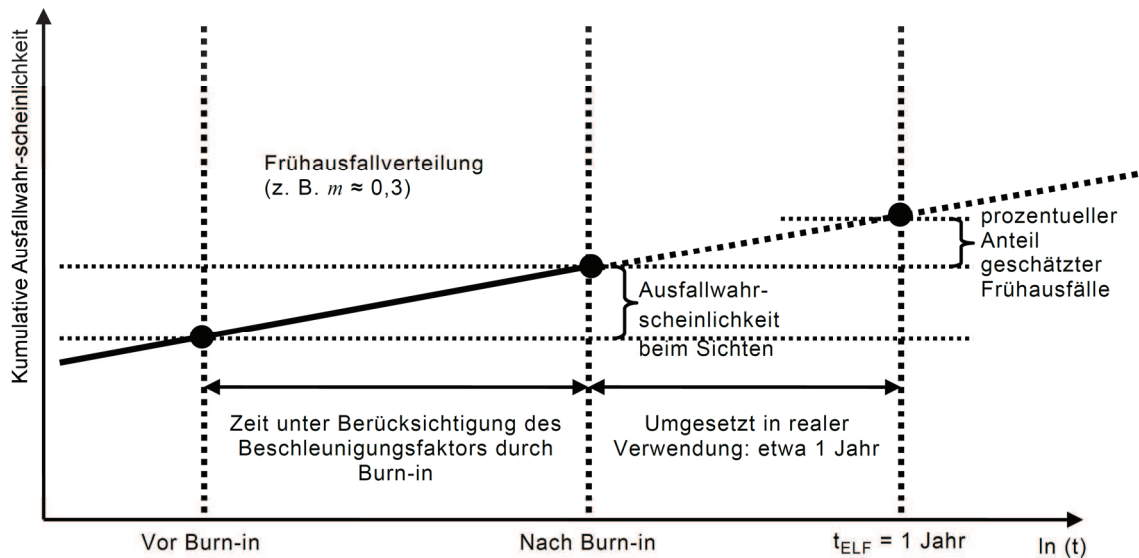


Bild 5 – Sichten und geschätzte Frühausfallsrate im Weibull-Diagramm

In Bild 5 ist das Nachweisverfahren für die Frühausfallrate, die statistisch geschätzt werden kann, nach dem Sichten dargestellt. In manchen Fällen wird das Burn-in solange wiederholt, bis keine eigentlichen Ausfälle auftreten, um die Konvergenz des Sichtens zu bestätigen, doch, wie in Bild 5 gezeigt, treten Frühausfälle immer auf, selbst in einer niedrigen Rate, wenn die Ausfallsrate über die Weibull-Verteilung statistisch geschätzt wird. Aus diesem Grund wird das Ziehen der Stichprobe unbedeutend, es sei denn, die Daten werden statistisch analysiert, und zwar unter Berücksichtigung von Versuchsparametern, Beschleunigungsfaktor und Ausfallart und selbst dann, wenn das Burn-in unsinnigerweise solange wiederholt wird, bis keine Burn-in-Ausfälle mehr auftreten.

Der m -Wert, der mit der Ausfallwahrscheinlichkeit des Burn-in-Prozesses berechnet wird, gibt nicht die Ausfälle, die im Prüfprozess vor dem Burn-in auftreten und entfernt werden, wieder. Wenn der m -Wert berechnet wird, ohne die Ausfälle im Prüfprozess vor dem Burn-in zu berücksichtigen, wird er höher. Folglich tendiert die Frühausfallrate, die anhand des m -Wertes geschätzt wird, zu einem schlechteren Wert als die tatsächliche Qualität. Es ist im Allgemeinen notwendig, für eine Schätzung der Frühausfälle den m -Wert unter Berücksichtigung der Ausfallwahrscheinlichkeit vor und nach dem Burn-in zu berechnen, wie in Bild 5 dargestellt.

Nachweis von Frühausfall-Verteilung und -Rate, die auf diesem Konzept basieren, sollte in den Nachweis der Produktzuverlässigkeit, welche auch die effektivste Maßnahme zur Verbesserung der realen Lieferqualität ist, integriert werden.

Da der Frühausfall von der intrinsischen Fertigungsfehlerrate der Fertigungslinie abhängig ist, kann die Frühausfallrate auch für andere Produkte der gleichen Fertigungslinie mit gleichem Entwurfsstandard einfach geschätzt werden, solange die Fertigungsfehlerrate und die konvergierenden Kenngrößen (m -Wert der Weibull-Verteilung) des Frühausfalls verstanden werden.

BEISPIEL:

Berechnungsverfahren der Frühausfallwahrscheinlichkeit im Feld:

Wenn t_1 die Zeitspanne bis zum Versand unter Berücksichtigung des Sichtens (umgesetzt in Zeit in der Gebrauchsumgebung anhand Bild 6) ist, entspricht die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit nach dem Versand:

$$F(t; t_1) = 1 - \exp \left[- \frac{(t + t_1)^m - t_1^m}{\eta^m} \right] \quad (10)$$

und die Ausfallrate nach Versand (siehe Bild 7) entspricht:

$$\lambda(t:t_1) = \frac{m \times (t+t_1)^{(m-1)}}{\eta^m} \quad (11)$$

Es ist zu beachten, dass die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit für 1 Jahr nach Versand $F(8\,760\text{ h}:t_1)$ ist, wobei 1 Jahr = 8 760 h ist.

Werden m und η auf Basis der Daten des Sichtens erhalten, ist eine quantitative Berechnung erlaubt.

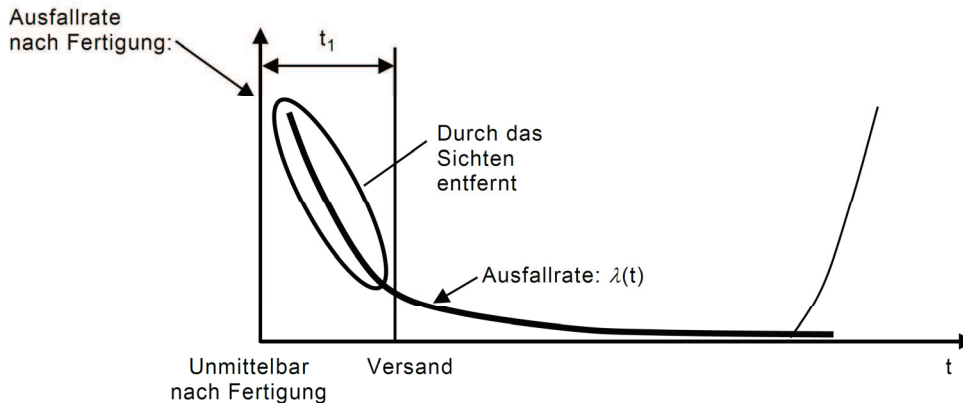


Bild 6 – Badewannenkurve mit Festlegung des Nullpunktes unmittelbar nach der Fertigung

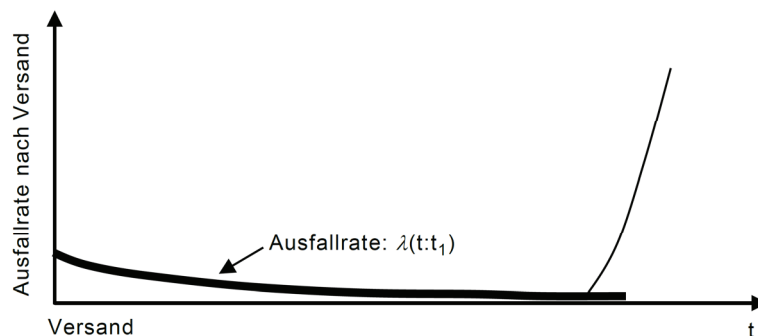


Bild 7 – Badewannenkurve mit Festlegung des Nullpunktes nach dem Sichten

5.3 Zufälliger Ausfall

5.3.1 Beschreibung

Ein zufälliger Ausfall zeigt einen Ausfall an, der zwischen dem Ende der definierten Frühausfallphase (in diesem Fall ein Jahr) und dem Ende der Lebensdauer oder dem Einsetzen der Abnutzungsphase auftritt. Es ist angebracht anzunehmen, dass Ausfälle, die nach der definierten Frühausfallphase auftreten, durch die Beanspruchung durch verbliebene Frühausfälle verursacht werden, die nicht vollständig durch das Sichten entfernt wurden, und in den meisten Fällen wird der Formparameter m der Weibull-Verteilung nicht exakt 1 sein. Es wird manchmal angenommen, dass diese Ausfälle zufällige Ausfälle sind, die durch Störfaktoren, welche nicht mit den Fertigungsfehlern in Zusammenhang stehen, und genauer gesagt durch zufällige Faktoren verursacht werden.

5.3.2 Mittlere Ausfallrate

Die mittlere Ausfallrate wird durch das Umwandeln der Wahrscheinlichkeit von Ausfällen, die zwischen dem Ende der definierten Frühausfallphase und dem Ende der Lebensdauer auftreten, in die Wahrscheinlichkeit des Auftretens je Zeiteinheit berechnet. Im Allgemeinen wird diese ausgedrückt als numerischer Wert, angegeben in FIT (en: Failure In Time, also Anzahl der Ausfälle je 10^9 Bauelementstunden, z. B. 1 FIT = 1 PPM je 1 000 Betriebsstunden). Diese Schätzung kann verwendet werden, da der Zeitraum für die Lebensdauer annähernd konstante Ausfallraten aufweist.

Da die mittlere Ausfallrate, die auf einer Exponentialverteilung basiert, vorausgesetzt, der Formparameter der Weibull-Verteilung $m = 1$ (konstante Ausfallrate) wird statistisch anhand der Lebensdauer-Prüfergebnisse berechnet, wird der Wert eindeutig über die Anzahl der Proben, der Dauer und den Beschleunigungsfaktor der Prüfung bestimmt. Aus diesem Grund kennzeichnet der berechnete Wert nicht immer die tatsächliche Qualität. Die mittlere Ausfallrate, die unter Verwendung der Exponentialverteilung berechnet wird, ist somit konzeptionell, und in Wirklichkeit entspricht die eigentliche Ausfallrate nach der definierten Frühausfallphase auch einem Bereich, in dem die Ausfälle graduell abnehmen. Obwohl er vom Beschleunigungsfaktor abhängig ist, tritt der abnutzungsbedingte Ausfall erwartungsgemäß aufgrund seines Aufbaus und des eingebauten Spielraums während einer beschleunigten Lebensdauer-Prüfung von etwa 1 000 h nicht auf, und es ist zutreffend, anzunehmen, dass die Ausfälle während der Betriebs-Lebensdauer-Prüfung mit einem Formparameter m der Weibull-Verteilung von größer 1 verbleiben, wenn die Anzahl der durch Störfaktoren verursachten Zufallsausfälle gering genug ist. Folglich ist es praktisch, die Frühausfallverteilung nach dem Sichten für die angenommene Betriebs-Lebensdauer fortzusetzen, da die mittleren Ausfälle als Fortsetzung der Frühausfälle auftreten, und die geschätzte kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit als Ausfallrate je Zeiteinheit in FIT auszudrücken. In Bild 8 ist das Konzept dargestellt, das die Berechnungsmethode für die mittlere Ausfallrate unter Verwendung einer Exponentialverteilung auf Basis der Lebensdauer-Prüfergebnisse beschreibt; in Bild 9 ist das Konzept dargestellt, das die Berechnungsmethode für die mittlere Ausfallrate unter Berücksichtigung des Weibull-Verteilungs-Formparameters m als eine Fortsetzung der Frühausfälle beschreibt.

Bei der Berechnung der mittleren Ausfallrate anhand einer Exponentialverteilung auf Grundlage der Lebensdauer-Prüfergebnisse ist der FIT-Wert tendenziell höher, weil die mittlere Ausfallrate mit einem feststehenden Wert von $m = 1$, einheitlich ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Ausfallverteilung und unter Verwendung einer geringen Anzahl von Prüfmustern, des Beschleunigungsfaktors und der Prüfdauer berechnet wird. In dem Beispiel in Bild 8 beträgt das berechnete Ergebnis etwa 1,36 FIT, wenn die Anzahl der Ausfälle in der Betriebslebensdauer-Prüfung $f = 0$ ($r_c(0; 0,6) = 0,92$) bei $CL = 60\%$ und $n = 77$ beträgt.

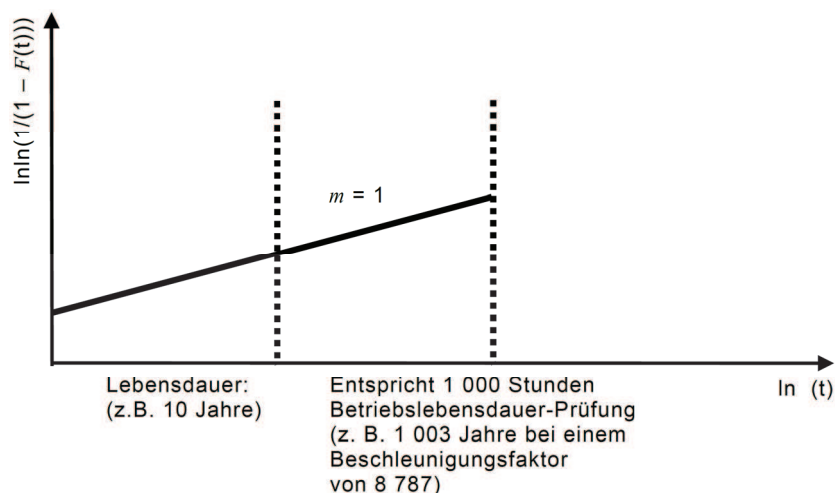


Bild 8 – Prinzipielle Darstellung der Berechnungsmethode für die mittlere Ausfallrate anhand der Exponentialverteilung

BEISPIEL 1:

$$\lambda = \frac{r_c(f, g)}{N \times T \times A_{CC}} \times 10^9 \text{ FIT} \quad (12)$$

Dabei ist

- λ Ausfallrate;
- f Anzahl der Ausfälle;
- g Konfidenzniveau (Einheit: %);
- $r_c(f, g)$ korrigierte Anzahl der Ausfälle bei CL = von g (in %), wenn die tatsächliche Anzahl an Ausfällen = f ist, z. B. wenn gilt: $f = 0$ und $g = 60$ %, ist $r_c(0; 0,6) = 0,92$;
- N Anzahl der Proben für die Betriebslebensdauer-Prüfung: 77;
- T Dauer der Betriebslebensdauer-Prüfung: 1 000 h;
- A_{CC} Beschleunigungsfaktor für die Zuverlässigkeitsprüfung = 8 787.

Dann ist die mittlere Ausfallrate:

$$\lambda = \frac{0,92}{77 \times 1000 \times 8787} \times 10^9 \text{ h}^{-1} = 1,36 \text{ FIT}$$

Wenn andererseits die tatsächliche Ausfallverteilung (m -Wert) bei der Berechnung berücksichtigt wird, dann wird die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit (kumulative mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit) zwischen dem Ende der definierten Frühausfallphase und dem Ende der Lebensdauer berechnet und in die mittlere Ausfallrate umgesetzt. Diese Berechnungsmethode ist vorteilhaft wegen der hohen Glaubwürdigkeit der Daten, weil diese auf Grundlage eines bestätigten Prüfergebnisses der kumulativen Ausfallkonvergenz bei der Sichtungsprüfung berechnet werden.

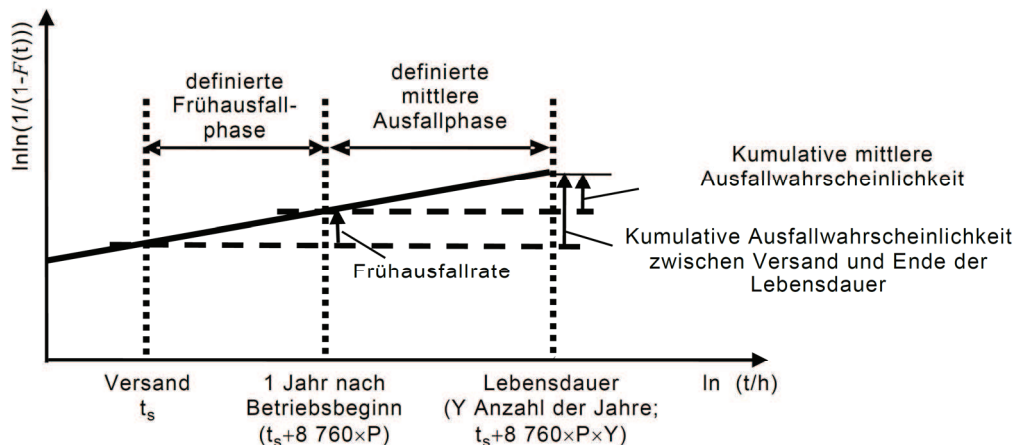


Bild 9 – Prinzipielle Darstellung der Berechnungsmethode für die mittlere Ausfallrate als eine Erweiterung der Frühausfälle

Das Berechnungsverfahren für die mittlere Ausfallrate auf Basis des Weibullmodells ist wie folgt definiert, weil die Frühausfallrate während der definierten Frühausfallphase getrennt definiert wird und die definierte mittlere Ausfallphase als eine Erweiterung der Frühausfälle und somit nicht als konventionelle Exponentialverteilungsfunktion betrachtet wird.

Definierte mittlere Ausfallphase: Zeitspanne zwischen dem Ende der definierten Frühausfallphase und dem Ende der Lebensdauer.

Die oben angeführten Beziehungen werden durch eine mathematische Gleichung unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus wie folgt ausgedrückt:

$F_c(t)$: Kumulative mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit;

$\lambda(t)$: mittlere Ausfallrate;

$F_c(t_Y, t_S)$: Kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit zwischen Versand und Ende der Lebensdauer;

$F_c(t_1, t_S)$: kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit während der definierten Frühausfallphase;

Y Lebensdauer (Anzahl der Jahre);

P Betriebsnutzungsgrad ($0 < P \leq 1$);

$$F_c(t_Y : t_S) = 1 - \exp \left[- \frac{(t_Y + t_S)^m - t_S^m}{\eta_c^m} \right] \quad (13)$$

$$t_Y = Y \times 365 \times 24 \times P \quad (14)$$

$$F_c(t) = F_c(t_Y : t_S) - F_c(t_1 : t_S) \quad (15)$$

$$\lambda(t) = \frac{F_c(t_Y : t_S) - F_c(t_1 : t_S)}{(Y-1) \times 365 \times 24} \quad (16)$$

Wird in der obigen Gleichung F_c ersetzt durch F und η_c durch η , stellt sie die mittlere Ausfallrate ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus dar.

BEISPIEL 2:

- a) Wenn ein bestätigtes Ergebnis der kumulativen Ausfallkonvergenz bei der Sichtungsprüfung erhalten wird von $m = 0,3$; $t_p = 70\,298$ h; $N = 2\,000$; und $f = 69$

und die mittlere Ausfallrate unter Berücksichtigung von:

$t_S = 70\,298$ h; $P = 1$; einer Lebensdauer von 10 Jahren und eines CL von 60 %

wie folgt ausgedrückt ist:

$\eta_c = 5,57 \times 10^{52}$ anhand Gleichung (4); $F_c(t_1, t_S) = 129 \times 10^{-6}$ anhand Gleichung (5); und $F_c(t_Y, t_S) = 898 \times 10^{-6}$ anhand Gleichung (8)

beträgt die kumulative mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit $769 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ und die mittlere Ausfallrate 9,8 FIT.

- b) Wird das Konfidenzniveau nicht berücksichtigt,

$\eta = 2,15 \times 10^{53}$ anhand Gleichung (2); $F(t_1, t_S) = 124 \times 10^{-6}$ anhand Gleichung (6); und $F(t_Y, t_S) = 862 \times 10^{-6}$ durch Ersetzen von F_c durch F und von η_c durch η in Gleichung (8),

beträgt die kumulative mittlere Ausfallrate $738 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ und die mittlere Ausfallrate 9,4 FIT.

5.4 Abnutzungsbedingter Ausfall

5.4.1 Beschreibung

Der abnutzungsbedingte Ausfall zeigt die Lebensdauer der integrierten Schaltungen selbst an. Wenn der Bereich der Abnutzungs-Ausfälle erreicht wird, wird jede IC irgendwann einen Ausfall verursachen. Folglich muss dieser Ausfall während der Lebens- Nutzungsdauer verhindert werden. Aus diesem Grund berücksichtigt jeder IC-Hersteller den „zuverlässigkeitsspezifischen Entwurf“ (en: reliability design) während der Entwurfsphase, um das Auftreten des abnutzungsbedingten Ausfalls während der Nutzungsdauer durch die Bereitstellung eines angemessenen Entwurfsspielraums zu vermeiden. Im Bereich abnutzungsbedingter

Ausfälle, in dem die Lebensdauer bestätigt ist, ist der Formparameter m der Weibull-Verteilung größer als 1 ($m > 1$).

Entwurfsstandards (z. B. Fertigungsbedingungen, Entwurfsbedingungen), die der Zuverlässigkeit (oder Entwurfsspezifikationen) genügen, für welche die Lebensdauer im tatsächlichen Anwendungsfall notwendig ist, werden mithilfe des Design-Reviews erarbeitet, welches auf den Prüfergebnissen der TEG (en: Test Element Group) für die Bewertung basiert usw., mit Elementen, die integrierte Schaltungen bilden (z. B. Transistoren, Verdrahtungen), und Aufbauelementen wie z. B. Gehäusen, und die integrierten Schaltungen müssen auf deren Grundlage entworfen werden.

Der Formparameter m der Abnutzungs-Ausfälle wird mithilfe von Versuchsergebnissen ermittelt oder ist ein Schätzwert. Falls sein Wert festgestellt werden kann, werden die Zuverlässigkeitsziele im Feld über das Zeichnen einer Weibull-Kurve festgelegt, und zwar mit dem Formparameter m , welcher die Ausfallrate unter der Annahme, der Anzahl der Prüfmuster und der Prüfdauer erfüllt, und einer Zuverlässigkeitsprüfung zur Bestätigung, dass die Zuverlässigkeit genau die ist, welche beim Durchführen der beschleunigten Prüfung angenommen wurde.

5.4.2 Abnutzungsbedingte Ausfallrate

In Bild 10 und Bild 11 werden die prinzipiellen Darstellungen gezeigt, die das Konzept der abnutzungsbedingten Ausfallrate und der beschleunigten Prüfung beschreiben.

Auf diesen prinzipiellen Darstellungen basierend werden im Folgenden die Berechnungsverfahren für die Anzahl der Proben und die Dauer der Zuverlässigkeitsprüfung beschrieben.

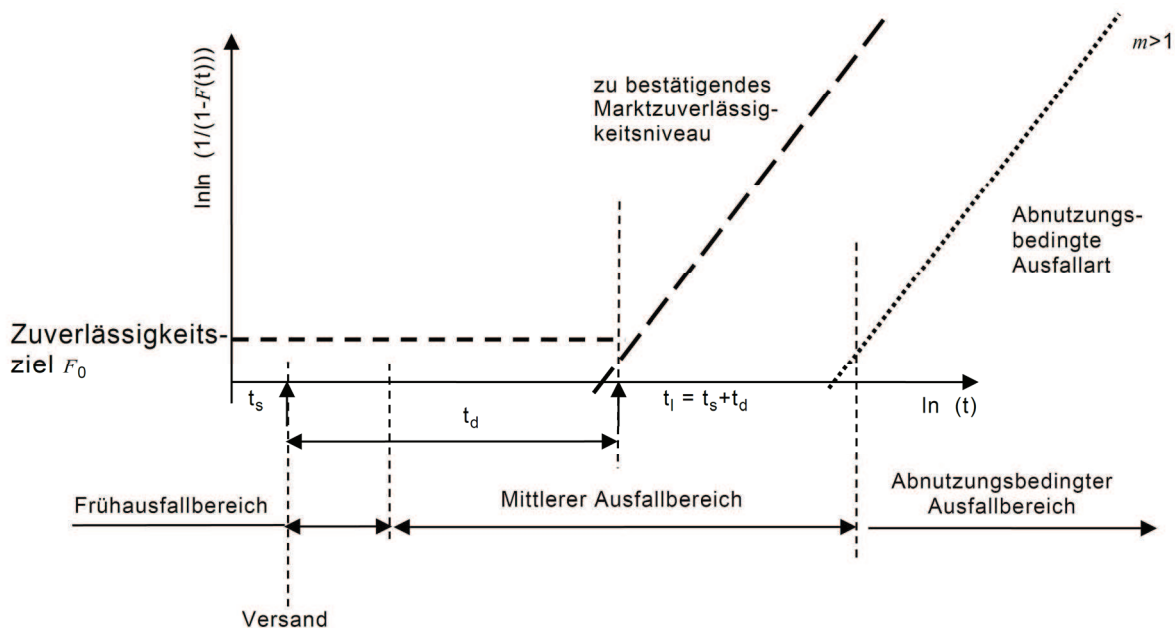


Bild 10 – Prinzipielle Darstellung der abnutzungsbedingten Ausfälle

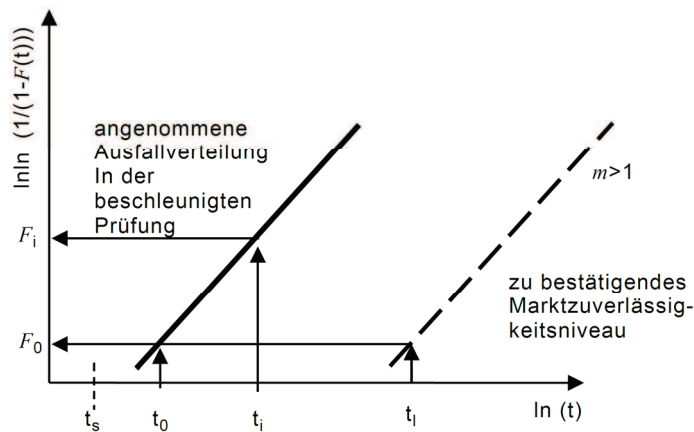


Bild 11 – Prinzipielle Darstellung zur Beschreibung des Konzepts der beschleunigten Prüfung

Die Dauer zum Erreichen der Ausfallwahrscheinlichkeit t_0 , welche mit der beschleunigten Prüfung bestätigt wird, die mit der Feld-Anwendungsdauer bis zur Lebensdauer t_l korrespondiert, wird durch die folgende Gleichung ausgedrückt:

$$t_0 = \frac{t_l}{A_{CC}} \quad (17)$$

Dabei ist

$$t_l = t_s + t_d;$$

t_s der Wert, der die Sichtungsphase bis zum Versand in die Feld-Anwendungszeit umwandelt;

t_d die Nutzungsdauer;

A_{CC} der Beschleunigungsfaktor.

Bei CL = von g (in %) und der Anzahl der Proben n_i wird die geschätzte maximale Ausfallrate (geschätzte kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit) F_i , die mithilfe der Binomialverteilung berechnet wird, falls die Anzahl der Ausfälle 0 ist, durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$F_i = 1 - \left(1 - \frac{g}{100}\right)^{\frac{1}{n_i}} \quad (18)$$

Die Gleichung (18) kann auch durch die folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$\eta_i = \frac{\ln\left(1 - \frac{g}{100}\right)}{\ln(1 - F_i)} \quad (19)$$

Die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit für die angenommene Ausfallverteilung in der beschleunigten Prüfung wird über folgende Gleichungen ausgedrückt:

$$F_i = 1 - \exp\left(-\frac{t_i^m}{\eta_i^m}\right) \quad (20)$$

$$F_0 = 1 - \exp\left(-\frac{t_0^m}{\eta^m}\right)^{\frac{1}{n_i}} \quad (21)$$

Dabei ist

- t_i die Prüfdauer, einschließlich der bis zum Versand durchgeführten Sichtungsdauer;
 F_0 die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit, zu bestätigen während der Nutzungsdauer.

Die folgende Gleichung wird über die obigen Weibullgleichungen erhalten:

$$\frac{\ln(1-F_i)}{\ln(1-F_0)} = \left(\frac{t_i}{t_0}\right)^{\frac{1}{m}} = \left(t_i \times \frac{A_{CC}}{t_i}\right)^m \quad (22)$$

Sind CL mit g (in %) und die Anzahl der Proben n_i festgelegt, wird die geschätzte kumulative Ausfallrate F_i erhalten, und die Prüfdauer kann einschließlich der Sichtungsdauer bis zum Versand, t_i , anhand der kumulativen Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet werden, um während der Nutzungsdauer F_0 und mit Gleichung (22) bestätigt zu werden.

Wenn eine Binomial-Verteilung verwendet wird, wobei die Anzahl der Ausfälle 0 beträgt, wird die Prüfdauer, einschließlich der bis zum Versand durchgeführten Sichtungsdauer, t_i , ausgedrückt als:

$$t_i = \left[\frac{\ln\left(1 - \frac{g}{100}\right)}{n_i \times \ln(1-F_0)} \right]^{\frac{1}{m}} = \frac{t_i}{A_{CC}} \left[\frac{\ln\left(1 - \frac{g}{100}\right)}{n_i \times \ln(1-F_0)} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (23)$$

Wenn die Prüfung unter Verwendung von Proben durchgeführt wird, für die das Sichten der Feld-Anwendungsdauer t_s bis zum Versand durchgeführt wurde, dann wird die Prüfdauer ohne die Sichtungsdauer bis zum Versand t_i , ausgedrückt als:

$$t_i = t_1 - \frac{t_s}{A_{CC}} \quad (24)$$

Die geschätzte kumulative Ausfallrate F_i wird anhand der Prüfdauer ohne die Sichtungsdauer bis zum Versand t_i erhalten; die zu bestätigende kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit während der Nutzungsdauer F_0 und Gleichung (22) und die Anzahl an Proben n_i können anhand CL von g (in %) berechnet werden.

$$t_i = t_d - \frac{t_s}{A_{CC}} \quad (25)$$

$$F_i = 1 - \exp\left[\left(t_i \times \frac{A_{CC}}{t_i}\right)^m \times \ln(1-F_0)\right] \quad (26)$$

Wenn eine Binomial-Verteilung mit der Anzahl der Ausfälle 0 verwendet wird, dann wird die Anzahl der Proben n_i wie folgt ausgedrückt:

$$\eta_i = \left(\frac{t_0}{t_i} \right)^m \times \frac{\ln\left(1 - \frac{g}{100}\right)}{\ln(1 - F_0)} = \left(\frac{t_i}{A_{CC} \times t_i} \right)^m \times \frac{\ln\left(1 - \frac{g}{100}\right)}{\ln(1 - F_0)} \quad (27)$$

6 Zuverlässigkeitsprüfung

6.1 Beschreibung der Zuverlässigkeitsprüfung

Produkt-Zuverlässigkeitsprüfungen werden hauptsächlich durchgeführt, um die Lebensdauer (abnutzungsbedingte Ausfälle) und die Stabilität der entwickelten Schaltung zu bestätigen. Der abnutzungsbedingte Ausfall verursacht einen Ausfall, wenn die integrierte Schaltung das Ende ihrer eigenen Nutzbarkeit (intrinsischer Modus) erreicht. Obwohl die Dauer, bis ein Ausfall verursacht wird, von Schwankungen während der Fertigung und der Beanspruchung während der Anwendung abhängt, wird jede IC letztlich das Ende ihrer Lebensdauer erreichen. Aus diesem Grund nimmt die Ausfallrate nach dem Ende der Nutzungsdauer stark zu. Die Zuverlässigkeitsprüfung wird durchgeführt, um zu bestätigen, dass der abnutzungsbedingte Ausfall während der Phase, welche für die tatsächliche Anwendung angenommen wurde, innerhalb der gewünschten kumulativen Ausfallwahrscheinlichkeit liegt. Da bei abnutzungsbedingtem Ausfall $m > 1$ ist, kann eine Zuverlässigkeitsprüfung, die nur eine kleine Anzahl von Proben verwendet (z. B. einige Dutzend Proben), auch einer Prüfung entsprechen, welche das Mehrfache bis Hundertfache der Dauer entspricht, die für die tatsächliche Anwendung angenommen wird. Dies trifft zu, wenn eine signifikante Anzahl an Proben ($> 50\%$) bis zum Ausfall beansprucht werden können und wenn deren Ausfallzeitpunkte sequenziell in einer Weibullsteigung angeordnet werden können. Ist dies nicht der Fall, müssen Schätzwerte von Steigungsparametern in Lebensdauerberechnungen wie oben beschrieben verwendet werden.

Die Zuverlässigkeitsprüfung ist eine Maßnahme, um die Lebensdauer während des Entwurfs sorgfältig auszuliegen, und keine Maßnahme, um die Auslieferqualität zu bestätigen. Fertigungsfehler, welche die Auslieferungsqualität beeinflussen, sollten als Frühausfälle und vom Konzept der Zuverlässigkeitsprüfung getrennt behandelt werden. Siehe Abschnitt 8 bezüglich der Maßnahmen gegen Frühausfälle.

6.2 Zuverlässigkeitsprüfplan

6.2.1 Verfahren zum Erstellen eines Zuverlässigkeitsprüfplans

Zuverlässigkeitsprüfungen werden durch Beschleunigung von Spannung, Temperatur, Feuchte usw. der tatsächlichen Anwendungsumgebung durchgeführt. Da die Prüfung zur Feststellung von abnutzungsbedingten Ausfällen entwickelt wurde, tendiert die angenommene Ausfallverteilung dazu, weniger Abweichungen aufzuweisen, und sie kann dazu bei einer kleinen Anzahl von Proben in einer kurzen Prüfdauer unter sehr hoch beschleunigenden Bedingungen verwendet werden. Da es allerdings auch Mechanismen gibt, die schwach beschleunigt werden, sollten die Anzahl der Prüfmuster und die Prüfdauer in Bezug auf die Beschleunigungsfaktoren für die Ausfallmechanismen berücksichtigt werden. Es sollte auch beachtet werden, dass die Prüfung bedeutungslos wird, wenn eine extrem hohe Beanspruchung verwendet wird, so dass der Prüfling zerbricht, falls der Ausfallmechanismus nicht mit den Ausfällen, die im Feld auftreten, korreliert. Wenn die Beschleunigungsbedingungen festgelegt sind, ist es notwendig, die Bedingungen in einem Bereich zu beschleunigen in dem die Ausfallart, der Ausfallmechanismus und der Beschleunigungsfaktor konstant sind.

Das nachstehende Beispiel beschreibt für den zeitabhängigen dielektrischen Durchbruch (TDDB; en: time-dependent dielectric breakdown), wie ein Zuverlässigkeitsprüfplan zu erstellen ist, um nachzuweisen, dass der abnutzungsbedingte Ausfall 0,1 % oder weniger beträgt nach 10 Jahren der Phase, für welche die tatsächliche Verwendung unter Beschleunigung angenommen wird.

- a) Entscheidung, welche Methoden der Zuverlässigkeitsprüfung hinsichtlich des Feststellens von Ausfallart und -mechanismus geeignet sind.

Als eine Regel sollte mehr als eine Zuverlässigkeitsprüfung zum Nachweis von angenommener Ausfallart und -mechanismus durchgeführt werden. In diesem Bereich wird eine „Betriebslebensdauer-Prüfung“ als ein Beispiel für eine Methode der Zuverlässigkeitsprüfung zum TDDB-Nachweis verwendet.

- b) Berechnung des Beschleunigungsfaktors für die Zuverlässigkeitsprüfung. Da die Beschleunigung hinsichtlich eines TDDb durch das elektrische Feld und die Temperatur begünstigt wird, sind ein höheres elektrisches Feld und eine höhere Temperatur für die Prüfbedingungen im Gegensatz zu den tatsächlichen Umgebungsbedingungen einzustellen. In diesem Beispiel werden die Spannung und die Temperatur unter den nachfolgend aufgeführten Bedingungen beschleunigt, wobei der Beschleunigungsfaktor 966 beträgt.

BEISPIEL:

Spannung bei tatsächlicher Anwendung: 2,5 V; Prüfspannung: 3,4 V; $\beta = 4,0 \text{ V}^{-1}$ liefert den Spannungsbeschleunigungsfaktor:

$$\alpha_V = \exp[\beta \times (V_2 - V_1)] = 36,6 \quad (28)$$

Temperatur bei tatsächlicher Anwendung: 70 °C; Prüftemperatur: 125 °C; $E_a = 0,7 \text{ eV}$ liefert den thermischen Beschleunigungsfaktor:

$$\alpha_T = \exp\left[\frac{E_a}{k} \times \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] = 26,4 \quad (29)$$

Das Multiplizieren der beiden liefert den Beschleunigungsfaktor für die Zuverlässigkeitsprüfung:

$$A_{CC} = \alpha_V \times \alpha_T = 36,6 \times 26,4 = 966 \quad (30)$$

- c) Annehmen der Ausfallverteilung. Im Allgemeinen darf der m -Wert, der von der TEG erhalten wurde, verwendet werden, wenn die Ausfallverteilung, die über eine TEG in einer Prozess-Zuverlässigkeitsprüfung erhalten wird, bevor die Produkt-Zuverlässigkeitsprüfung durchgeführt wird, und sie bekannt ist.
- d) Zeichnen einer Ausfallverteilung, die die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,1 % für das Zeitintervall von 10 Jahren erfüllt und auf der angenommenen Ausfallverteilung basiert. In diesem Beispiel wird eine Weibull-Verteilung mit dem Formparameter $m = 3$ verwendet. Üblicherweise Zeichnen einer Ausfallverteilung, die die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,1 % während der angenommenen Brauchbarkeitsdauer erfüllt (10/966 = 90,7 h in diesem Beispiel unter Verwendung eines Beschleunigungsfaktors von 966). Die Lebensdauer und die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit sind, falls notwendig, zu ändern, beispielsweise zum Nachweis für Automobilanwendungen durch Ändern auf 0,1 % in 15 Jahren. Falls das Verhältnis zwischen der Betriebsdauer und der Stillstandsdauer eingeschlossen werden kann, kann es auch zusätzlich verwendet werden.
- e) Fertigstellen des Prüfplans anhand der Beziehung zwischen dem Prüfzeitpunkt, an welchem die Ausfallverteilung die zu bestätigende kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit schneidet, während der unter Punkt d) angeführten Beschleunigungsprüfung. Da abnutzungsbedingte Ausfälle selten in tatsächlichen Produkt-Zuverlässigkeitsprüfungen festgestellt werden, können die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsprüfung durch eine statistische Anzahl von Ausfallereignissen unter Verwendung eines Konfidenzniveaus wie CL = 60 % ersetzt werden.

In dem Beispiel aus Bild 12 weiter unten kann die Wahrscheinlichkeit von 0,1 % für das Zeitintervall von 10 Jahren bestätigt werden, wobei die Anzahl der Proben 77 und die Prüfdauer 208 h beträgt bzw. die Anzahl der Proben 22 und die Prüfdauer 317 h beträgt. Auf diese Weise kann die Zuverlässigkeitsprüfung durch das Ändern der Kombination von Prüfdauer und Anzahl der Prüfmuster optimiert werden. Falls die Anzahl der Prüfmuster notwendigerweise zu reduzieren ist, sollte dafür die Prüfdauer erhöht werden. Im Gegensatz dazu, wenn die Zuverlässigkeitsbewertung notwendigerweise in einer kurzen Zeitspanne abzuschließen ist, kann das durch Erhöhen der Anzahl an Proben erreicht werden.

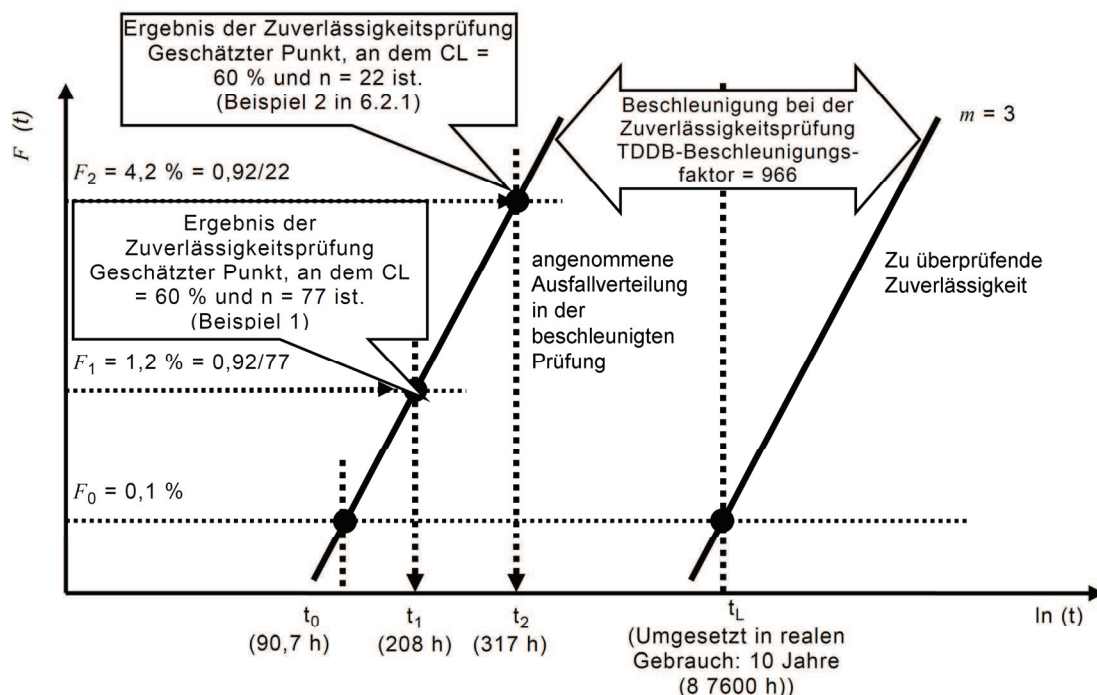


Bild 12 – Konzept der Zuverlässigkeitsprüfung in einem Weibull-Diagramm (auf Grundlage des Stichprobenumfangs)

Grundsätzlich sollte ein Prüfplan einen Spielraum haben, der Abweichungen berücksichtigt, und es sollte kein Plan sein, der exakt 0,1 % bestätigt. In dem Tddb-Beispiel wurde $m = 3$ angenommen, allerdings nimmt für die Bestätigung von 0,1 % für das Zeitintervall von 10 Jahren bei einem kleinen m -Wert die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines abnutzungsbedingten Ausfalls während des Zeitintervalls, das für die tatsächliche Anwendung angenommen wurde, zu. Das bedeutet, dass der Zielwert der kumulativen Ausfallwahrscheinlichkeit in 10 Jahren niedriger als 0,1 % angesetzt werden muss. Tabelle 2 zeigt die kumulative Ausfallrate des dritten, fünften und siebten Jahres mit einem für das Zeitintervall von 10 Jahren auf 0,1 % festgesetzten Ziel, wenn m zwischen 1 und 5 liegt. Aus der Tabelle geht hervor, dass, selbst wenn der Zielwert der kumulativen Ausfallwahrscheinlichkeit für den abnutzungsbedingten Ausfall mit 0,1 % festgelegt wird, es weniger wahrscheinlich ist, dass alterungsbedingter Ausfall innerhalb der Phase, für die die tatsächliche Verwendung angenommen wird, ein Problem darstellt, solange der m -Wert hoch ist. Das Konzept der Zuverlässigkeitsprüfung ist, dass die Prüftabelle, die den „abnutzungsbedingten Ausfall von 0,1 % oder weniger“ bestätigen kann, ausreichend für den Nachweis des Risikos des Auftretens von abnutzungsbedingten Ausfällen ist, und es wird nicht die Annahme des Auftretens von 0,1 % abnutzungsbedingter Ausfälle vorausgesetzt.

Tabelle 2 – Kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,1 % über 10 Jahre hinweg [$\times 10^{-6}$] für das 3., 5. und 7. Jahr

m -Wert	3. Jahr	5. Jahr	7. Jahr	10. Jahr
1,0	300	500	700	1 000
2,0	90	250	490	
3,0	27	125	343	
5,0	2,0	31	168	

In 6.2.2 wird das Berechnungsverfahren für die benötigte Prüfdauer und die Anzahl der Proben für Bild 12 und Bild 13 beschrieben.