

DIN EN 60749-43

ICS 31.080.01

Einsprüche bis 2013-11-20

Entwurf

**Halbleiterbauelemente –
Mechanische und klimatische Prüfverfahren –
Teil 43: Leitfaden zur Planung der Zuverlässigkeitsqualifikation von
integrierten Schaltungen
(IEC 47/2169/CD:2013)**

Semiconductor devices –
Mechanical and climatic test methods –
Part 43: Guidelines for IC reliability qualification plan
(IEC 47/2169/CD:2013)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2013-09-20 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de 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@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme 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 im DIN und VDE (Hausanschrift: 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 63 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Inhalt

	Seite
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	6
4 Anspruchsklassen und Anwendungsfälle	6
4.1 Festlegungen zu Anspruchsklassen (Beispiele)	7
5 Ausfallverteilung	7
5.1 Frühausfälle	8
5.2 Zufallsausfälle	12
5.3 Alterungsausfälle	15
6 Zuverlässigkeitsprüfungen	18
6.1 Zuverlässigkeitsprüfplan	18
6.2 Elemente der Zuverlässigkeitsprüfung	23
7 Stressprüfung (Elemente)	27
8 Referenzprüfungen	29
9 Screening	29
10 Tabellarische Zusammenfassung der Voraussetzungen wie Berechnungsformeln und numerische Werte	32
11 Zusammenfassung	33
1 Erwartungen an den Leitfaden	33
12 Literaturhinweise	34

Bilder

Bild 1 - Badewannenkurve	8
Bild 2 – Ausfallverhalten von Halbleiter-Herstellungslosen während der Frühausfall-Periode	9
Bild 3 – Prinzipielles Diagramm der Weibull für die Frühausfallrate	10
Bild 4 – Verhältnis zwischen Ausfallrate α und Anzahl der Ausfälle	11
Bild 5 – Prinzipielle Darstellung der Berechnungsmethode für die Zufallsausfallrate auf Basis der Exponential-Verteilung	13
Bild 6 – Prinzipielle Darstellung der Berechnungsmethode für die Zufallsausfallrate als eine Erweiterung der Frühausfälle	14
Bild 7 – Prinzipielle Darstellung der Alterungsausfälle	16
Bild 8 – Prinzipielle Darstellung zur Beschreibung der beschleunigten Prüfung	16
Bild 9 – Prinzipielle Darstellung der Zuverlässigkeitsprüfung (Beispiele 1 und 2)	20
Bild 10 – Prinzipielle Darstellung der Zuverlässigkeitsprüfung (Beispiele 3 und 4)	23
Bild 11 – Unterschiede von Prüflosumfängen entsprechend dem m-Wert (Prinzip)	24
Bild 12 – Screening und geschätzte Frühausfallrate	30
Bild 13 – Badewannenkurve mit Setzen des Nullpunktes unmittelbar nach der Fertigung	31
Bild 14 – Badewannenkurve mit Setzen des Nullpunktes nach dem Screening	31

Tabellen

Tabelle 1 – Festlegungen zu Anspruchsklassen	7
Tabelle 2 – Kumulative Ausfallrate für das 3., 5. und 7. Jahr bei 0,1 % / 10 Jahre [ppm]	20
Tabelle 3 – Wichtige Elemente von (Lebensdauer-)Zuverlässigkeitsprüfungen und Zweckbestimmungen	25
Tabelle 4 – Beispiele für Probenanzahl und Prüfdauer in typischen (Lebensdauer-)Zuverlässigkeits- Prüfelementen	26
Tabelle 5 – LTPD-Stichprobentabelle.....	28
Tabelle 6 – Wichtige Elemente von (Festigkeits-)Zuverlässigkeitsprüfungen und Zweckbestimmungen	28
Tabelle 7 – Elemente von Referenzprüfungen und Zweckbestimmungen.....	29

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 47/2169/CD:2013 „Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 43: Guidelines for IC reliability qualification plan“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigelegt. 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 und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die 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. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

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

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnichtsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

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

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen 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.

**Halbleiterbauelemente –
Mechanische und klimatische Prüfverfahren –
Teil 43: Leitfaden zur Planung der Zuverlässigkeitsqualifikation von integrierten
Schaltungen**

1 Anwendungsbereich

Der Leitfaden ist beim Einsatz integrierter Schaltungen (IC) im Automobilbau und bei allgemeinen Anwendungen zu verwenden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. 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 60068 (alle Teile), *Environmental testing*

IEC 60068-2-1, *Environmental testing – Part 2-1: Tests: Test A: Cold*

IEC 60749-5, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 5: Temperature humidity bias*

IEC 60749-6, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 6: High temperature storage*

IEC 60749-11, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 11: Thermal shock*

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 cycle*

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 – Direct contact charged device model (DC-CDM)*

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

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

3 Begriffe

3.1 Ausfallart

Klassifikation des Ausfallzustandes mithilfe dessen Erscheinungsbildes. Zum Beispiel Unterbrechung, Kurzschluss, störende Dämpfung, mechanischer Abrieb, charakteristische Alterung.

3.2 Ausfallmechanismus

bei Anwendungsumgebungsbedingungen unterschiedlich so wie er für die Störung physikalisch, chemisch oder mechanisch ist und durch elektrische Beanspruchung oder eine menschliche Ursache hervorgerufen wird, trotzdem wird gesagt, dass er in der Struktur und im Aufbau liegt.

3.3 Ausfallphänomene

das Ausfallphänomen tritt nach einem Gesetz, einer natürlichen Regelmäßigkeit, auf und es ist somit unmöglich, dass es zufällig auftritt. Das Phänomen in der Welt ändert den thermodynamischen Gleichgewichtszustand.

4 Anspruchsklassen und Anwendungsfälle

Qualitätslagen, Betriebsstunden und Betriebsbedingungen von integrierten Halbleiterschaltungen, welche für den Feldeinsatz gefordert werden, hängen von den Anwendungsfällen ab, in denen die Erzeugnisse verwendet werden. Als ein Beispiel des Erstellens wissenschaftlicher Prüfplanungen werden ihre Anwendungsfälle ganz allgemein in drei Anspruchsklassen gruppiert: Automobilanwendung A, Automobilanwendung B und allgemeine (Endverbraucher/Consumer) Anwendung. In **Tabelle 1** wird eine Aufstellung der Qualitätslagen hinsichtlich jeder Anspruchsklasse und deren Festlegungen von Vorbedingungen gezeigt.

<Beschreibung> In den folgenden Abschnitten wird beschrieben, wie die **Tabelle 1**, in der Beispiele aus der Realität für die Anspruchsklassen aufgeführt sind, zu lesen ist.

Frühausfallrate Siehe Abschnitt **5.1.1**.

Konstante Ausfallrate Siehe Abschnitt **5.2.1**.

4.1 Festlegungen zu Anspruchsklassen (Beispiele)

Tabelle 1 – Festlegungen zu Anspruchsklassen

Klasse	Automobilbauanwendung A	Automobilbauanwendung B	Allgemeine Anwendung (Consumer)
Kriterien für Klasse	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 werden gesondert behandelt.
Anwendungsbeispiele	Motor, Bremsen, Fahrassistenz-Systeme, Airbags	Navigationssysteme, Klimaanlage	Hauselektronik, Spielzeug
Jährliche Betriebsstunden	500 Stunden (Fahrstunden) * Ist abhängig, ob im Betrieb Zündung ein- oder ausgeschaltet ist.	500 Stunden (Fahrstunden)	Bis zu 8 760 Stunden * ist abhängig von der Anwendung
Nutzungsdauer	15 Jahre (kumulative Ausfall-Wahrscheinlichkeit 0,1 %)	15 Jahre (kumulative Ausfall-Wahrscheinlichkeit 0,1 %)	Bis zu 10 Jahre (kumulative Ausfall-Wahrscheinlichkeit 0,1 %) * ist abhängig von der Anwendung
Angenommene Betriebsbedingungen (Beispiele für Bedingungen, die für die Anwendungen unterschiedlich sind)	<Beispiel für Motorraum> $T_a = -40\text{ °C (min)}/125\text{ °C (max)}$ $T_j = 100\text{ °C (typ)}/150\text{ °C (max)}$ $RH = 0\text{ (min)}/100\text{ (max) \%}$ $RH\text{ typ (während Fahrt 10 \% (während Halt 70 \%))}$ <Beispiel für Innenraum> $T_a = -40\text{ °C (min)}/85\text{ °C (max)}$ $T_j = 85\text{ °C (typ)}/125\text{ °C (max)}$ $RH = 0\text{ (min)}/100\text{ (max) \%}$ $RH\text{ typ (während Fahrt 10 \% (während Halt 70 \%))}$		$T_a = 0\text{ °C (min)}/70\text{ °C (max)}$ $T_j = 70\text{ °C (typ)}/105\text{ °C (max)}$ $RH = 10\text{ (min)}/80\text{ (max) \%}$ $RH\text{ typ (im Einschaltzustand 20 \% (im Ausschaltzustand 60 \%))}$
Frühausfallrate	10 ppm oder kleiner/Jahr	50 ppm oder kleiner/Jahr	Bis zu 500 ppm/Jahr * ist abhängig von der Anwendung
Konstante Ausfallrate	10 FIT oder kleiner	50 FIT oder kleiner	Bis zu 500 FIT * ist abhängig von der Anwendung

5 Ausfallverteilung

Die Ausfallverteilung von Halbleiter-Bauelementen kann prinzipiell in drei Bereiche gegliedert werden: Frühausfall-Bereich, Zufallsausfall-Bereich und Alterungsausfall-Bereich. Im **Bild 1** wird die Beziehung zwischen der Feld-Anwendungsdauer und der momentanen Ausfallrate (Badewannenkurve) gezeigt. Die Ausfallverteilungen für jeden der Bereiche werden in den Abschnitten **5.1** bis **5.3** beschrieben.

Die meisten Frühausfälle werden während des Fertigungsprozesses des Halbleiterherstellers ausgesondert (Screening). Da allerdings die Halbleiter-Bauelemente nicht einem vollständigen Screening 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. Die sogenannten Zufallsausfälle schließen äußere Faktoren wie ESD, EOS, Software usw. mit ein.

Alterungsausfälle sind Ausfälle, welche während des Lebensdauerndes von Komponenten der Halbleiter-Bauelemente wie Transistoren oder Verdrahtungen auftreten und somit die Lebensdauer der Halbleiter selber bestimmen. Die Anzahl der Ausfälle nimmt mit der Zeit zu und jedes Halbleiter-Bauelement wird möglicherweise einen Ausfall verursachen. Das Konzept der Ausfallrate verwendet nicht die Alterungsausfälle und deshalb ist

es wichtig, diese Ausfälle während der Brauchbarkeitsdauer zu vermeiden. Für Halbleiter wird deren Lebensdauer mit dem Erreichen der kumulativen Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,1 % allgemein festgelegt.

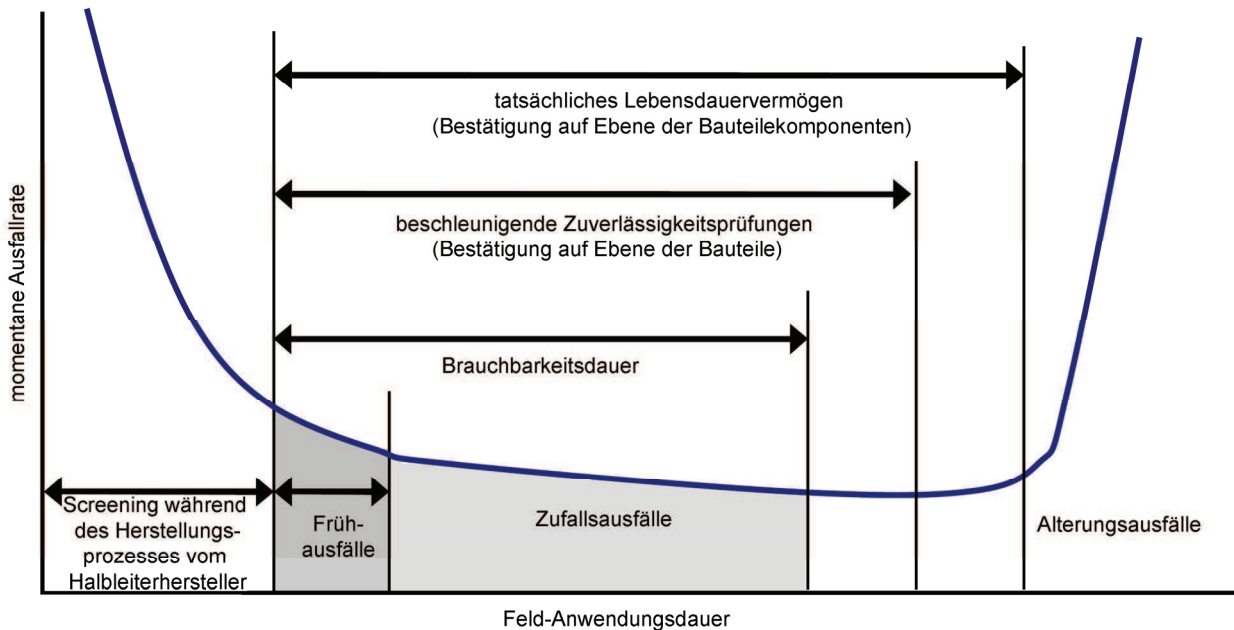


Bild 1 - Badewannenkurve

5.1 Frühausfälle

Weil Halbleiter klein und komplex sind, sind sie für Fehler anfällig, welche während des Fertigungsprozesses erzeugt werden. Aus diesem Grund werden die guten Bauelemente, welche die geforderten Kennwerte und Funktionen erfüllen, in der letzten Fertigungsstufe aussortiert. Die Rate der guten Bauelemente in diesem Prozess wird Ausbeute (Yield) genannt. Beim Aussortieren der guten Bauelemente werden die Bauelemente gemessen, und zwar auf so vielen Messpositionen wie möglich, einschließlich der geforderten Kennwerte und Funktionen. Jedoch können einige von diesen als gut sortierten Bauelemente jene mit Ausfällen (potenzielle Ausfälle) einschließen, die einen geringen Fehler enthalten, der die elektrischen Kenngrößen nicht beeinflusst und so während des Sortiervorgangs korrekt arbeiten. Falls die Ausbeute hoch ist, ist es weniger wahrscheinlich, dass Bauelemente mit potenziellen Ausfällen enthalten sind. Im Gegensatz ist bei einer niedrigen Ausbeute die Wahrscheinlichkeit hoch, einen Mix von diesen Bauelementen zu haben. Bauelemente mit diesen potenziellen Ausfällen können möglicherweise im Anwendungsfall infolge ihres Fehlers (äußerer/extrinsischer Modus) ausfallen.

Falls eine kleine Anzahl guter Bauelemente solche Fehler enthalten, sind diese auch im Fertigungslos enthalten und die Ausfallrate nimmt mit der Zeit ab. Das ist der Fall, weil die nicht fehlerhaften Bauelemente, die wahrscheinlich keinen Ausfall verursachen, übrig bleiben, wenn die fehlerhaften Bauelemente aussortiert werden, nachdem sie einen Ausfall verursachten. In diesem Fall ist der Formparameter der Weibullverteilung: m kleiner als 1 ($m < 1$).

Im Einzelnen, wenn ein Herstellungslos, wie in **Bild 2** gezeigt, gute Bauelemente mit einem potenziellen Fehler enthält, verursachen elektronische Erzeugnisse mit solchen Bauelementen einen Ausfall während der Anwendung und die fehlerhaften Halbleiter-Bauelemente werden im Zuge der Reparatur entfernt (Bauelemente-Ersatz). Somit bleiben zuverlässige Halbleiter-Bauelementen übrig.

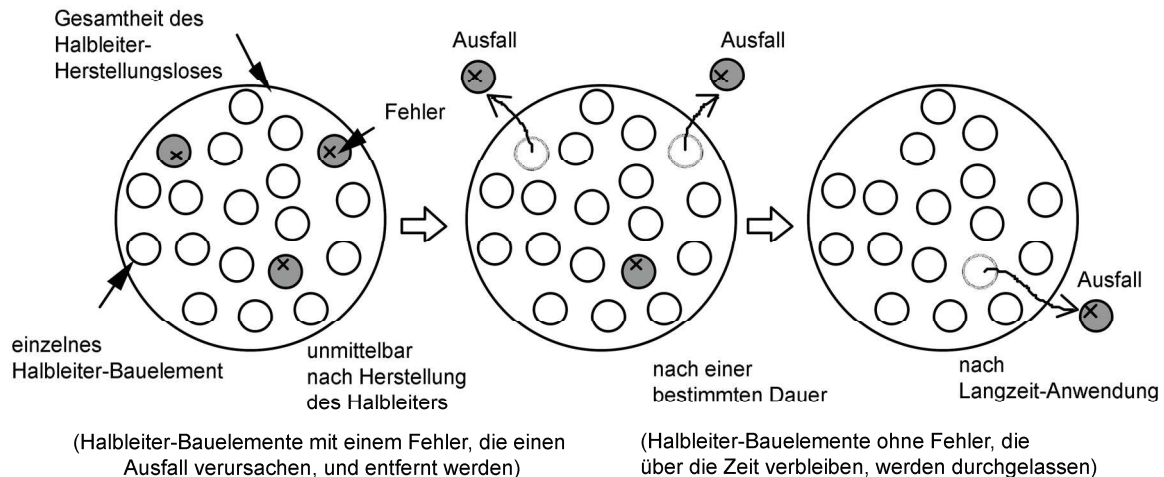


Bild 2 – Ausfallverhalten von Halbleiter-Herstellungslosen während der Frühausfall-Periode

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 Screeningtechniken wie das Burn-in, bei dem die Halbleiter-Bauelemente unter relativ schweren Beanspruchungsbedingungen arbeiten, um so einen Ausfall im Voraus zu verursachen und diese über das Aus-sortieren zu entfernen. Das bedeutet, die Frühausfall-Periode des Halbleiter-Bauelements vor der Auslieferung zu absolvieren und somit die Auswirkungen von Frühausfällen nach der Auslieferung zu reduzieren. Das Screening kann optimiert werden, wenn der Einfluss der oben angeführten Fehlerreduzierung bestätigt wurde.

5.1.1 Frühausfallrate

Die Frühausfallrate kennzeichnet die Wahrscheinlichkeit der Abnahme von Ausfällen, welche aus Fertigungs-gefehlern resultieren und über eine Dauer von einem Jahr (als Frühausfallperiode festgelegt) auftreten, nach der Auslieferung durch den Halbleiterhersteller und dem Betriebsbeginn im Feld (innerhalb des Bestückungsprozesses des Herstellers, des Endverbrauchers).

Die Frühausfallrate wird häufig als "kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit" in Prozent (%) oder parts-per-million (ppm) für die numerischen Werte der Ausfallrate, die während der festgelegten Frühausfallperiode auftritt, ausgedrückt.

Die Frühausfallrate wird auch als "mittlere Frühausfallrate" ausgedrückt. Die mittlere Frühausfallrate setzt die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit während der festgelegten Frühausfallphase in die Auftretenswahrscheinlichkeit pro Zeiteinheit um und wird hauptsächlich in FIT (Failure In Time: $10^{-9}/h$) angegeben.

Im Allgemeinen wird die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit wie folgt angegeben, wenn für die Weibull-verteilung der Formparameter als "m", deren Skalenparameter als "η" und die Zeit als "t" verwendet werden:

F(t): kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit von 0 bis t

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

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

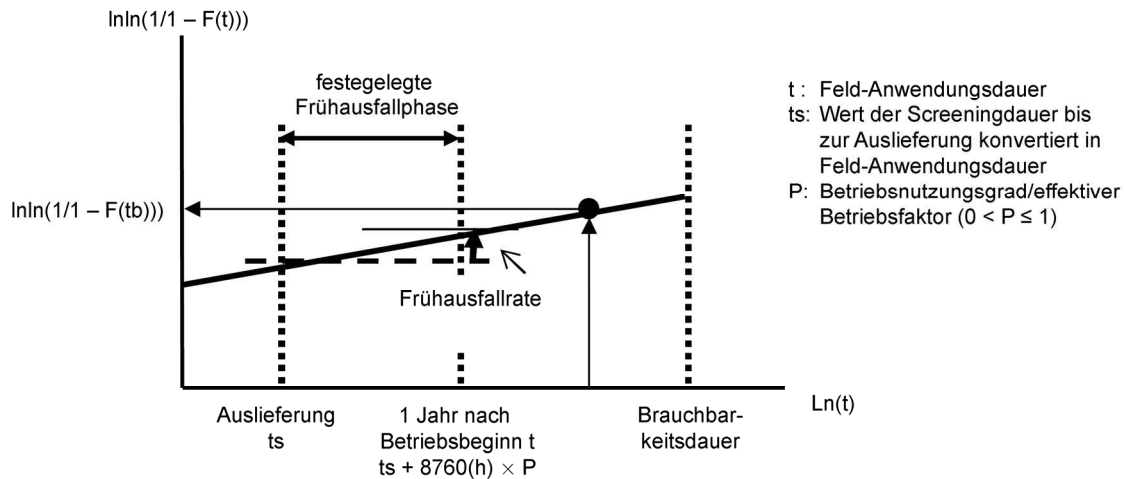


Bild 3 – Prinzipielles Diagramm der Weibull für die Frühausfallrate

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

Unter der Annahme, dass die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit, $F(tb)$, mit der Feld-Anwendungsdauer, t_b , als bestätigtes Ergebnis der kumulativen Ausfallkonvergenz bei Screenbeanspruchung erhalten wird, wird η entsprechend der folgenden Gleichung erhalten.

Dabei kennzeichnet m den Wert, der aus den experimentellen Ergebnissen oder einem Schätzwert erhalten wurde.

$$\eta = \frac{t_b}{[-\ln(1 - F(tb))]^{1/m}} \quad (2)$$

Wenn es Null Ausfälle gibt, ist in der obigen Gleichung $F(tb) = 0$ und somit ist η bestimmt.

Aus diesem Grund ist eine χ^2 -Verteilung (d. h. ein Konfidenzniveau; hier angegeben als CL: CL = 60 %) zu verwenden, um die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit, $F_c(tb)$, zu bestimmen, und zwar unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus.

Allerdings basiert dies auf der Voraussetzung, dass die Anzahl der Probengesamtheit: N ausreichend groß ist.

$$F_c(tb) = \text{kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit @ CL = g \%} = \chi^2_{g, d/(2 \times N)} \quad (3)$$

χ^2 : Chi-Quadrat-Verteilung

g : Konfidenzniveau (Einheit: %)

d : Freiheitsgrad = $2 \times f + 2$

f : Anzahl der Ausfälle

N : Anzahl der Proben

η_c : Skalenparameter, der bei Berücksichtigung des Konfidenzniveaus zu verwenden ist

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

Wenn der Wert, der aus der Screeningphase bis zur Auslieferung in die Feld-Anwendungsdauer, t_s , konvertiert wird und der berechnete Wert η_c verwendet wird, dann ist unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus die Frühausfallrate, $F_c(t_1:t_s)$, nach der Auslieferung durch die folgende Gleichung (5) gegeben.

Wenn η statt η_c verwendet wird, dann ist unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus die Frühausfallrate, $F(t1:ts)$ nach der Auslieferung durch die Gleichung (6) gegeben.

$$F_c(t1:ts) = 1 - \exp \left[- \frac{t1_{-} + - ts^m}{\eta_c^m} \right] \quad (5)$$

$$F(t1:ts) = 1 - \exp \left[- \frac{t1_{-} + - ts^m}{\eta^m} \right] \quad (6)$$

$$t1 = 1 \text{ (Jahr)} \times 365 \text{ (Tage)} \times 24 \text{ (Stunden)} \times P \text{ (Betriebsnutzungsgrad: } 0 < P \leq 1)$$

Das Verhältnis der Ausfallraten α zwischen der Frühausfallrate unter Berücksichtigung von CL = g % und der Frühausfallrate F ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus wird über die folgenden Gleichungen ausgedrückt:

$$F_c = \chi^2_{g, d/(2 \cdot N)}$$

$$F = \left[\frac{f}{N} \right]$$

$$\alpha = \left[\frac{F_c}{F} \right] = \left[\frac{\chi^2_{g, d}}{2 \cdot N} \right] / \left[\frac{f}{N} \right] = \frac{\chi^2_{g, d}}{2 \cdot f} \quad (7)$$

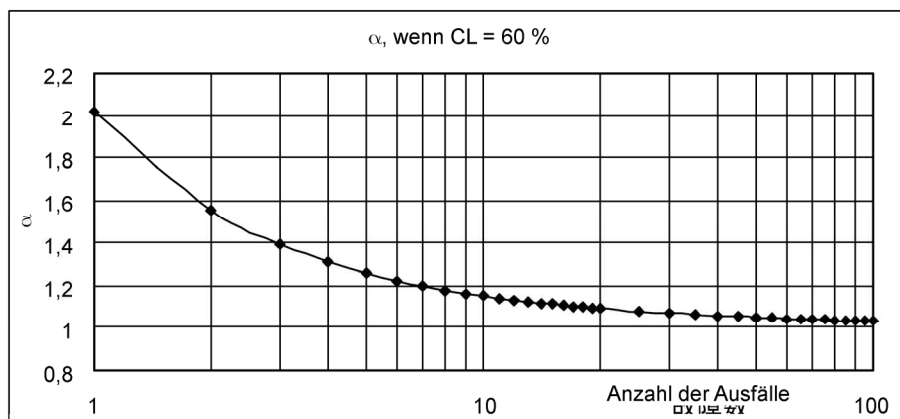


Bild 4 – Verhältnis zwischen Ausfallrate α und Anzahl der Ausfälle

Das Verhältnis der Ausfallrate, α , zwischen der Frühausfallrate, F_c , unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus und der Frühausfallrate, F , ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus wird durch die Anzahl der Ausfälle bestimmt und nicht durch die Anzahl: N der Proben.

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.

Wenn nach **Bild 4** die kumulative Anzahl der Ausfälle 50 ist, so ist die Differenz der Ausfallraten 5 % zwischen der Frühausfallrate, F_c , unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus und der Frühausfallrate, F , ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus.

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

Beispiel: Wenn als bestätigtes Ergebnis der kumulativen Ausfallkonvergenz bei Screening-Beanspruchung, $m = 0,03$; $t_b = 70\,298$ h; $N = 2\,000$ und $f = 69$ erhalten wird, dann wird die Frühausfallrate, $F_c(t1:ts)$,

mit $CL = 60\%$ bei $t_s = 70\,298\text{ h}$ und $P = 1$ entsprechend Gleichung (4) als $\eta_c = 5,57E + 52$ und entsprechend Gleichung (5) $F_c(t_1:t_s) = 129\text{ ppm}$ berechnet.

Ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus ist die Frühausfallrate, $F(t_1:t_s)$, unter den oben beschriebenen Bedingungen entsprechend Gleichung (2) $\eta = 2,15E + 53$ und entsprechend Gleichung (6) ist $F(t_1:t_s) = 124\text{ ppm}$.

In diesem Beispiel ist die Differenz der Ausfallraten 4% zwischen der Frühausfallrate, F_c , unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus und der Frühausfallrate, F , ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus.

5.2 Zufallsausfälle

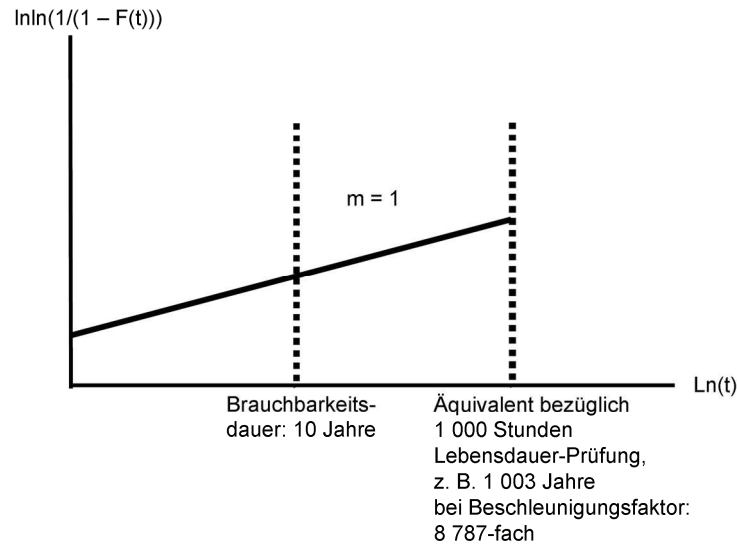
Der durchschnittliche Ausfall wird auch Zufallsausfall genannt. Er kennzeichnet einen Ausfall, der zwischen dem Ende der festgelegten Frühausfallphase und dem Ende der Brauchbarkeitsdauer auftritt. Es ist angebracht, anzunehmen, dass Ausfälle, die nach der festgelegten Frühausfallphase auftreten durch das Freiwerden von verbliebenen Frühausfällen verursacht werden, die nicht vollständig durch das Screening entfernt wurden, und in den meisten Fällen wird der Formparameter m der Weibullverteilung nicht exakt 1 sein. Es wird manchmal angenommen, dass diese Ausfälle zufällige Ausfälle sind, die durch Störfaktoren, welche nicht mit den Fertigungsfehlern verwandt sind, verursacht werden, und deswegen diese Störfaktoren mehr im Einzelnen zu betrachten sind.

5.2.1 Zufallsausfallrate (Durchschnittliche Ausfallrate)

Die Zufallsausfallrate wird über das Umformen der Ausfallwahrscheinlichkeit, die zwischen dem Ende der festgelegten Frühausfallphase und dem Ende der Brauchbarkeitsdauer vorliegt, in die Auftretenswahrscheinlichkeit pro Zeiteinheit berechnet. Im Allgemeinen wird diese mit einem numerischen Wert, als FIT (Failure In Time) ausgedrückt, angegeben.

Da die Zufallsausfallrate auf einer Exponentialverteilung basiert, vorausgesetzt, der Formparameter der Weibullverteilung $m = 1$ (konstante Ausfallrate) wurde statistisch mithilfe der Lebensdauer-Prüfresultate berechnet, wird der Wert eindeutig über die Anzahl der Proben, der Dauer und dem Beschleunigungsfaktor der Prüfbeanspruchung bestimmt. Aus diesem Grund kennzeichnet der berechnete Wert nicht immer die wirkliche Qualität. Die Zufallsausfallrate, die unter Verwendung der Exponentialverteilung berechnet wird, ist somit konzeptionell und in der Wirklichkeit wird die eigentliche Ausfallrate nach der festgelegten Frühausfallphase auch einem Bereich, in dem die Ausfälle graduell abnehmen, entsprechen. Obwohl sie vom Beschleunigungsfaktor abhängig ist, tritt der Alterungsausfall während einer Lebensdauer-Prüfung unter betriebspezifischen Beanspruchungen von ungefähr 1 000 Stunden nicht auf, und es ist zutreffend anzunehmen, dass Ausfälle während der Betriebs-Lebensdauer-Prüfung mit einem Weibullverteilungs-Formparameter $m < 1$ übrig bleiben, wenn die Anzahl der Zufallsausfälle, die durch Störfaktoren verursacht werden klein genug ist. Folglich ist es praktisch, die Frühausfallverteilung nach dem Screening auf die angenommene Betriebs-Lebensdauer auszudehnen, indem man annimmt, dass die Zufallsausfälle als eine Erweiterung der Frühausfälle auftreten und man die geschätzte kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit als Ausfallrate pro Zeiteinheit in FIT ausdrückt. In **Bild 5** wird das Konzept, das die Berechnungsmethode für die Zufallsausfallrate unter Verwendung einer Exponentialverteilung auf Basis der Lebensdauer-Prüfresultate beschreibt, gezeigt; in **Bild 6** wird das Konzept, das die Berechnungsmethode der Zufallsausfallrate auf Basis des Weibullverteilungs-Formparameters m als eine Erweiterung der Frühausfälle beschreibt, gezeigt.

Bei der Berechnung der Zufallsausfallrate mithilfe der Exponentialverteilung auf Basis der Lebensdauer-Prüfresultate tendiert der FIT-Wert dazu, größer zu werden, weil die Zufallsausfallrate mit einem feststehenden $m = 1$, einheitlich ohne Berücksichtigung der wirklichen Ausfallverteilung unter Verwendung einer kleinen Anzahl von Prüfeinheiten, Beschleunigungsfaktor und der Prüfdauer berechnet wird. Im **Bild 5** wurde das Beispiel berechnet mit ungefähr 1,36 FIT, wenn die Anzahl der Ausfälle in der Betriebs-Lebensdauer-Prüfung 0,92 Stck. bei $CL = 60\%$ und $n = 77\text{ Stck.}$ beträgt.



$$\lambda = \frac{rc(f, g)}{N \times T \times Acc} \times 10^9 \text{ (FIT)}$$

λ : Ausfallrate

f: Anzahl der Ausfälle

g: Konfidenzniveau (Einheit: %)

$rc(f, g)$: Anzahl der Ausfälle bei CL = g %, bei der Anzahl f der Ausfälle

Wenn f = 0 und CL = 60 %, $rc(0, 60) = 0,92$ Stck.

N: Anzahl der Proben für die Betriebs-Lebensdauer-Prüfung = 77 Stck.

T: Dauer der Betriebs-Lebensdauer-Prüfung = 1 000 Stunden

A_{CC} : Beschleunigungsfaktor für die Zuverlässigkeitsprüfung = 8 787-fach

$$\lambda = \frac{0,92}{77 \times 1\,000 \times 8\,787} \times 10^9 = 1,36 \text{ (FIT)}$$

Bild 5 – Prinzipielle Darstellung der Berechnungsmethode für die Zufallsausfallrate auf Basis der Exponential-Verteilung

Wenn andererseits die tatsächliche Ausfallverteilung (m-Wert) bei der Berechnung berücksichtigt wird, dann wird die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit (kumulative Zufallsausfallwahrscheinlichkeit) zwischen dem Ende der festgelegten Frühausfallphase und dem Ende der Brauchbarkeitsdauer so berechnet, indem sie in die Zufallsausfallrate umgesetzt wird. Diese Berechnungsmethode ist vorteilhaft wegen der hohen Glaubwürdigkeit der Daten, weil diese auf Basis eines bestätigten Prüfergebnisses der kumulativen Ausfallkonvergenz bei der Screeningbeanspruchung berechnet werden.

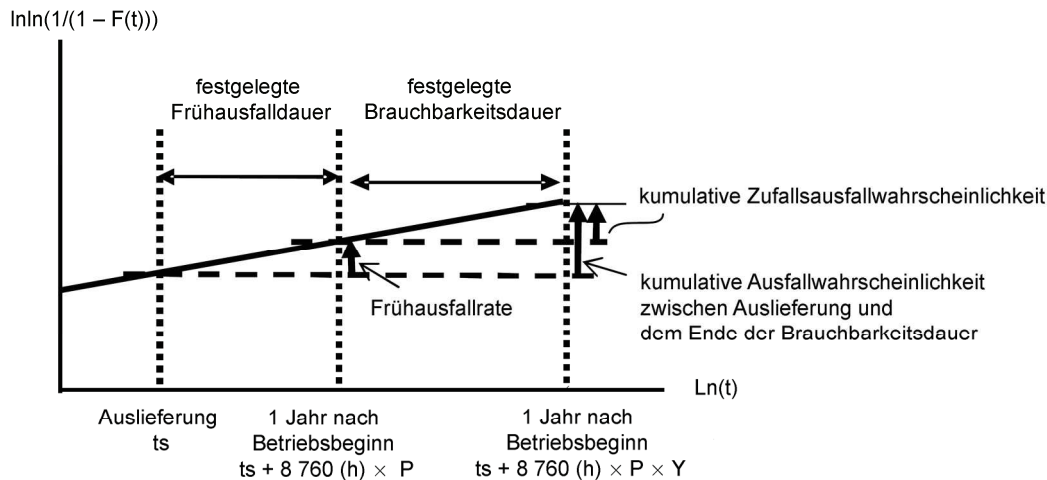


Bild 6 – Prinzipielle Darstellung der Berechnungsmethode für die Zufallsausfallrate als eine Erweiterung der Frühausfälle

Das Berechnungsverfahren für die Zufallsausfallrate auf Basis des Weibullmodells ist im Folgenden festgelegt, weil die Frühausfallrate während der definierten Frühausfallphase getrennt festgelegt wird und die festgelegte Zufallsausfallphase als eine Erweiterung der Frühausfälle und somit nicht die konventionelle Exponentialverteilungsfunktion betrachtet wird.

Festgelegte Zufallsausfallphase:	Dauer zwischen dem Ende der festgelegten Frühausfallphase und dem Ende der Brauchbarkeitsdauer
kumulative Zufallsausfallwahrscheinlichkeit:	kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit zwischen der Auslieferung und dem Ende der Brauchbarkeitsdauer – kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit während der festgelegten Frühausfallphase
	kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit zwischen der Auslieferung und dem Ende der Brauchbarkeitsdauer – Frühausfallrate
Frühausfallrate	kumulative Zufallsausfallwahrscheinlichkeit / Kalenderdauer (von Brauchbarkeitsdauer – 1) in Jahren

Die o.a. Beziehungen sind unter Berücksichtigung des Konfidenzniveaus in mathematischer Form wie folgt:

$F_c(tY:ts)$: kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit zwischen Auslieferung und Ende der Brauchbarkeitsdauer

$F_c(t1:ts)$: kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit während der festgelegten Frühausfallphase

Y: Brauchbarkeitsdauer (Jahr)

$$F_c(tY:ts) = 1 - \exp \left[- \frac{(tY + ts)^m - ts^m}{\eta c^m} \right] \quad (8)$$

$tY = Y \text{ (Jahr)} \times 365 \text{ (Tag)} \times 24 \text{ (Stunde)} \times P \text{ (Betriebsnutzungsgrad: } 0 < P \leq 1)$

kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit = $F_c(tY:ts) - F_c(t1:ts)$

Zufallsausfallrate = kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit / Kalenderzeit der (Brauchbarkeitsdauer – 1) Jahre

$$= [F_c(tY:ts) - F_c(t1:ts)] / [(Y - 1) \times 365 \times 24] \quad (9)$$

Wenn F_c mit F ersetzt wird und ηc mit η in der obigen Gleichung, dann stellt das die Zufallsausfallrate ohne Berücksichtigung des Konfidenzniveaus dar.

Beispiel: Wenn als bestätigtes Ergebnis der kumulativen Ausfallkonvergenz bei der Screeningbeanspruchung folgendes erhalten wird: $m = 0,03$; $t_b = 70\,298\text{ h}$; $N = 2\,000$ und $f = 69$, dann wird die Zufallsausfallrate bei Berücksichtigung von $t_s = 70\,298\text{ h}$; $P = 1$; Brauchbarkeitsdauer = 10 Jahre und $CL = 60\%$ wie folgt angegeben:

Mit $\eta_c = 5,57E + 52$ entsprechend Gleichung (4); $F_c(t_1:t_s) = 129\text{ ppm}$ entsprechend Gleichung (5) und $F_c(t_Y:t_s) = 898\text{ ppm}$ entsprechend Gleichung (8) beträgt die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit 769 ppm und die Zufallsausfallrate 9,8 FIT.

Wird das Konfidenzniveau nicht berücksichtigt ergibt sich $\eta = 2,15E + 53$ aus Gleichung (2), $F(t_1:t_s) = 124\text{ ppm}$ entsprechend Gleichung (6) und $F(t_Y:t_s) = 862\text{ ppm}$ indem F_c durch F und η_c durch η in Gleichung (8) ersetzt wird. Dadurch ergibt sich die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit zu 738 ppm und die Zufallsausfallrate zu 9,4 FIT.

5.3 Alterungsausfälle

Alterungsausfälle kennzeichnen die Lebensdauer des Halbleiters selber. Wenn der Bereich der Alterungsausfälle erreicht wird, wird jeder Halbleiter möglicherweise einen Ausfall verursachen. Folglich ist dieser Ausfall während der Brauchbarkeitsdauer zu verhindern. Aus diesem Grund berücksichtigt jeder Halbleiterhersteller den "zuverlässigkeitsspezifischen Entwurf (Reliability Design)" während der Entwurfsphase, um das Auftreten von Alterungsausfällen während der Brauchbarkeitsdauer zu vermeiden. In der Alterungsphase, in der die Brauchbarkeitsdauer bestätigt ist, ist der Formparameter: m der Weibullverteilung größer als 1 ($m > 1$).

ANMERKUNG Definition "zuverlässigkeitsspezifischer Entwurf (Reliability Design)":

Entwurfsstandards (z. B. Fertigungsbedingungen, Entwurfsbedingungen), die der Zuverlässigkeit (oder Entwurfsspezifikationen) genügen, für welche die Lebensdauer im wirklichen Anwendungsfall umgesetzt erforderlich ist, sind mithilfe des Design-Reviews zu erarbeiten, welches auf den Prüfergebnissen der TEG (Test Element Group) für die Bewertung basiert usw., mit Elementen, die Halbleiterbauelemente bilden (z. B. Transistoren, Verdrahtungen) und Aufbauelementen wie Gehäusen und die Halbleiterbauelemente müssen auf Basis von diesen entworfen werden.

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

In den **Bildern 7** und **8** werden die prinzipiellen Kurven gezeigt, die das Konzept der Alterungsausfallrate 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.

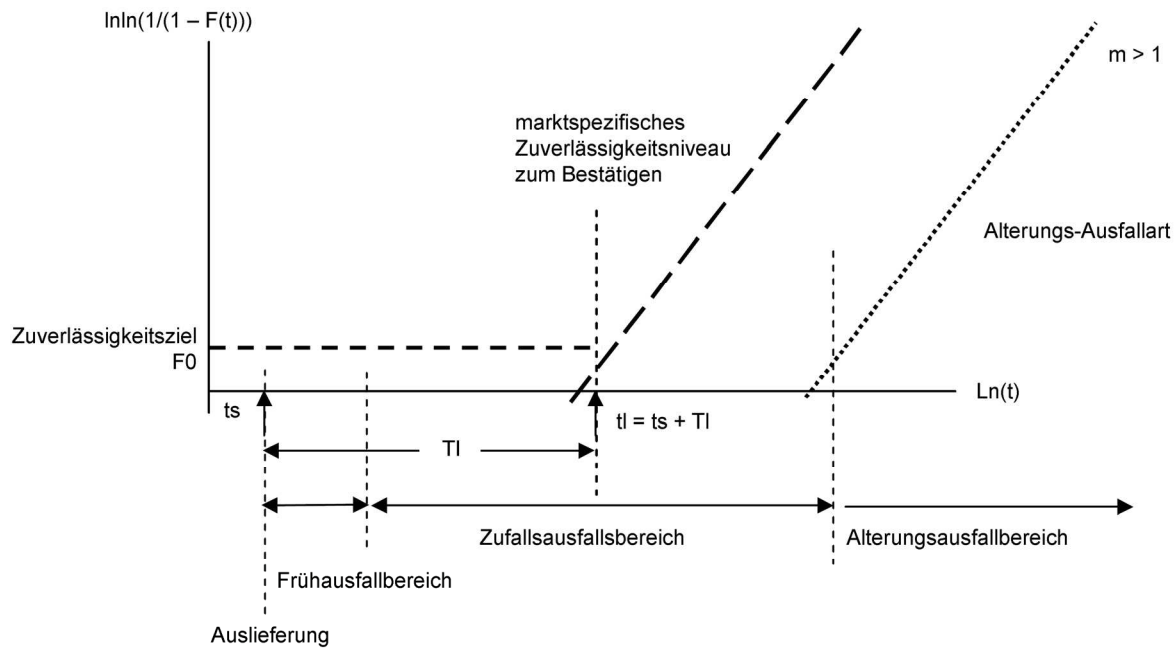


Bild 7 – Prinzipielle Darstellung der Alterungsausfälle

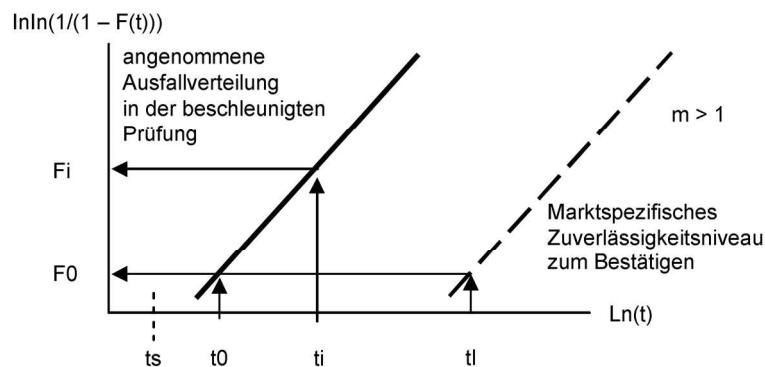


Bild 8 – Prinzipielle Darstellung zur Beschreibung der beschleunigten Prüfung

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

$$t_0 = t_l / \text{Acc} \quad (10)$$

Dabei ist $t_l = t_s + T_I$

t_s : Wert, der die Screeningphase bis zur Auslieferung in die Feld-Anwendungszeit umsetzt

T_I : Brauchbarkeitsdauer

Acc : Beschleunigungsfaktor

Wenn $CL = g \%$ und die Anzahl der Proben, n_i ist, dann wird die geschätzte maximale Ausfallrate (geschätzte kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit, F_i , mithilfe der Binomialverteilung berechnet, falls die Anzahl der Ausfälle 0 ist, wird diese mit der folgenden Gleichung ausgedrückt:

$$F_i = 1 - (1 - g/100)^{(1/n_i)} \quad (11)$$

Die Gleichung (11) kann auch durch die folgende Gleichung ausgedrückt werden.

$$n_i = \frac{\ln(1 - g/100)}{\ln(1 - F_i)} \quad (12)$$

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

$$F_i = 1 - \exp(-t_i^m / \eta^m) \quad (13)$$

$$F_0 = 1 - \exp(-t_0^m / \eta^m) \quad (14)$$

t_i : Prüfdauer, einschließlich der durchgeführten Screeningdauer bis zur Auslieferung

F_0 : kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit, zum Bestätigen während der Brauchbarkeitsdauer

Die folgende Gleichung wird über die o.a. Weibullgleichungen erhalten:

$$\frac{\ln(1 - F_i)}{\ln(1 - F_0)} = \left[\frac{t_i}{t_0} \right]^m = \left[t_i \frac{\text{Acc}}{t_l} \right]^m \quad (15)$$

Sobald $CL = g \%$ und die Anzahl der Proben, n_i , fest sind, wird die geschätzte kumulative Ausfallrate, F_i , erhalten und die Prüfdauer kann einschließlich der Screeningdauer bis zur Auslieferung, t_i , berechnet werden über die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit, um für die Brauchbarkeitsdauer zu bestätigen F_0 und die Gleichung (15).

$$t_i = t_0 \left(\frac{\ln(1 - F_i)}{\ln(1 - F_0)} \right)^{\frac{1}{m}} = \frac{t_l}{\text{Acc}} \left[\frac{\ln(1 - F_i)}{\ln(1 - F_0)} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (16)$$

Falls eine Binomialverteilung mit der Anzahl der Ausfälle, 0, verwendet wird, dann wird die Prüfdauer, t_i , einschließlich der Screeningdauer bis zur Auslieferung wie folgt ausgedrückt:

$$t_i = \left[\frac{\ln(1 - g/100)}{n_i \cdot \ln(1 - F_0)} \right]^{\frac{1}{m}} = \frac{t_l}{\text{Acc}} \left[\frac{\ln(1 - g/100)}{n_i \cdot \ln(1 - F_0)} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (17)$$

Wenn die Prüfung unter Verwendung von Proben durchgeführt wird, für die das Screening der Feld-Anwendungsdauer, t_s , bis zur Auslieferung durchgeführt wurde, dann wird die Prüfdauer ohne die Screeningdauer bis zur Auslieferung, T_i , wie folgt ausgedrückt:

$$T_i = t_i - t_s / \text{Acc}$$

Die geschätzte kumulative Ausfallrate, F_i , erhält man aus der Prüfdauer ohne die Screeningdauer bis zur Auslieferung, T_i ; die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit, um für die Brauchbarkeitsdauer zu bestätigen, F_0 , und die Gleichung (15), und die Anzahl der Proben, n_i , kann aus $CL = g \%$ berechnet werden.

$$t_i = T_i + t_s / \text{Acc}$$

$$F_i = 1 - \exp \left\{ \left[t_i \frac{\text{Acc}}{t_l} \right]^m \cdot \ln(1 - F_0) \right\} \quad (18)$$

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

$$n_i = \left[\frac{t_0}{t_i} \right]^m \cdot \frac{\ln(1 - g/100)}{\ln(1 - F_0)} = \left[\frac{t_l}{\text{Acc} \cdot t_i} \right]^m \cdot \frac{\ln(1 - g/100)}{\ln(1 - F_0)} \quad (19)$$

6 Zuverlässigkeitsprüfungen

Produkt-Zuverlässigkeitsprüfungen werden hauptsächlich durchgeführt, um die Brauchbarkeitsdauer (Alterungsausfälle) und die Stabilität der entwickelten Schaltung zu bestätigen. Der Alterungsausfall verursacht einen Ausfall, wenn der Halbleiter das Ende seiner eigenen Brauchbarkeit (intrinsischer Modus) erreicht. Obwohl die Dauer bis zum Verursachen eines Ausfalls von Schwankungen während der Fertigung und der Beanspruchungen während der Anwendung abhängt, wird jeder Halbleiter schließlich das Ende seiner Lebensdauer erreichen. Aus diesem Grund nimmt die Ausfallrate nach dem Ende der Brauchbarkeitsdauer stark zu. Die Zuverlässigkeitsprüfung wird durchgeführt, um zu bestätigen, dass der Alterungsausfall innerhalb der gewünschten kumulativen Ausfallwahrscheinlichkeit während der Phase liegt, welche für die wirkliche Anwendung angenommen wurde. Da $m > 1$ beim Alterungsausfall ist, kann eine Zuverlässigkeitsprüfung, die nur eine kleine Anzahl von Proben (z. B. einige Dutzend Proben) verwendet, auch äquivalent zu einer Prüfung sein, welche das Mehrfache bis Hundertfache der Dauer ist, die für die wirkliche Anwendung angenommen wird.

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

6.1 Zuverlässigkeitsprüfplan

Zuverlässigkeitsprüfungen werden bei beschleunigender Spannung, Temperatur, Feuchte usw. der tatsächlichen Anwendungsumgebung durchgeführt. Da das Prüfverfahren zur Feststellung von Alterungsausfällen 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 hochbeschleunigenden Bedingungen verwendet werden. Allerdings gibt es auch Mechanismen, die schwach beschleunigt werden, sodass es Betrachtungen hinsichtlich der Anzahl der Prüfproben und der Prüfdauer in Bezug auf die Beschleunigungsfaktoren für die Ausfallphänomene geben sollte. Es sollte auch beachtet werden, dass die Prüfung bedeutungslos wird, wenn eine extrem hohe Beanspruchung verwendet wird, sodass das Bauelement zerbricht, falls das Ausfallphänomen nicht mit den Ausfällen, die im Feld auftreten, korrelieren. 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.

Im Folgenden wird beschrieben, wie ein Zuverlässigkeitsprüfplan zu erstellen ist, um nachzuweisen, dass der Alterungsausfall 0,1 % oder kleiner nach 10 Jahren Dauer beträgt, die bei Verwendung der Beschleunigung bei der tatsächlichen Anwendung angenommen wird, für das Beispiel eines zeitabhängigen dielektrischen Durchbruchs (TDDB; en: time-dependent dielectric breakdown).

[Verfahren zum Erstellen eines Zuverlässigkeitsprüfplans]

- (1) Entscheidung, welche Zuverlässigkeitsprüfelemente 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 Abschnitt wird eine "Betriebs-Lebensdauer-Prüfung" als ein Beispiel für ein Zuverlässigkeitsprüfelement zum TDDB-Nachweis verwendet.

- (2) Berechne den Beschleunigungsfaktor 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.

(Spannung)

Spannung in tatsächlicher Anwendung: 2,5 V; Prüfspannung: 3,4 V

$$\alpha_V = \exp\{B(V_2 - V_1)\} = 36,6 \quad B = 4,0 \text{ V}^{-1}, \text{ im Fall des } V_G\text{-Modells}$$

(Temperatur)

Temperatur in tatsächlicher Anwendung: 70 °C; Prüftemperatur: 125 °C

$$\alpha_T = \exp\left\{\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right\} = 26,4 \quad E_a = 0,7 \text{ eV} \quad (20)$$

$$A_{cc} = \alpha_T \times \alpha_V = 26,4 \times 36,6 = 966$$

- (3) Annahme der Ausfallverteilung. Wenn die Ausfallverteilung, die über eine TEG aus einer Prozess-Zuverlässigkeitsprüfung erhalten wird, bevor die Produkt-Zuverlässigkeitsprüfung durchgeführt wird, und bekannt ist, kann im Allgemeinen der m-Wert, der von der TEG erhalten wurde, verwendet werden.
- (4) Zeichnen einer Ausfallverteilung, die die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit 0,1 % / 10 Jahre erfüllt und auf der angenommenen Ausfallverteilung basiert. In diesem Beispiel wird eine Weibullverteilung mit dem Formparameter $m = 3$ verwendet. Im Normalfall wird eine Ausfallverteilung, die die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit 0,1 % während der angenommenen Einsatzzeit (10 Jahre $\div$ 966 = 90,7 Stunden in diesem Beispiel unter Verwendung des Beschleunigungsfaktors 966) gezeichnet. Die Lebensdauer und die kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit sind falls notwendig zu ändern, zum Nachweis beispielsweise für die Automobilanwendungen durch Änderung von diesen auf 0,1 % in 15 Jahren. Falls das Verhältnis zwischen der Betriebsdauer und der Stillstandsdauer eingeschlossen werden kann, kann es auch zusätzlich verwendet werden.
- (5) Fertigstellen des Prüfplans über die Beziehung zwischen der Prüfdauer, welche die Ausfallverteilung schneidet, und der kumulativen Ausfallwahrscheinlichkeit, um die in (4) angeführte Beschleunigungsprüfung zu bestätigen. Da Alterungsausfälle selten in tatsächlichen Produkt-Zuverlässigkeitsprüfungen festgestellt werden, können die Zuverlässigkeitsprüfresultate mit einer statistischen Anzahl von Ausfallereignissen unter Verwendung eines Konfidenzniveaus wie CL = 60 % ersetzt werden.

In dem Beispiel von **Bild 9** kann die Wahrscheinlichkeit von 0,1 % / 10 Jahre nachgewiesen werden mit einer Probenanzahl von 77 und einer Prüfdauer von 208 h bzw. einer Probenanzahl von: 22 und einer Prüfdauer von 317 h. Auf diese Weise kann die Zuverlässigkeitsprüfung über das Ändern der Kombination Prüfdauer und Probenanzahl optimiert werden. Falls die Probenanzahl 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 Probenanzahl erreicht werden.