

DIN EN 61709

ICS 31.020

Entwurf

Einsprüche bis 2015-02-19
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 61709:2012-01 und
DIN EN 61709
Berichtigung 1:2012-07

**Elektrische Bauelemente –
Zuverlässigkeit –
Referenzbedingungen für Ausfallraten und Beanspruchungsmodelle zur
Umrechnung
(IEC 56/1583/CD:2014)**

Electric components –
Reliability –

Reference conditions for failure rates and stress models for conversion
(IEC 56/1583/CD:2014)

Composants électriques –
Fiabilité –

Conditions de référence pour les taux de défaillance et modèles de contraintes pour la
conversion
(CEI 56/1583/CD:2014)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2014-12-19 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@vde.com 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 in DIN und VDE, 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 232 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	9
Einleitung	11
1 Anwendungsbereich	11
2 Normative Verweisungen	12
3 Begriffe und Formelzeichen	12
3.1 Begriffe	12
3.2 Formelzeichen	15
4 Kontext und Bedingungen	16
4.1 Ausfallarten und -mechanismen	16
4.2 Thermische Modellierung	18
4.3 Berücksichtigung des Beanspruchungsprofils	18
4.4 Umgebungsbedingungen	19
4.5 Bauelementauswahl	21
4.6 Zuverlässigkeitswachstum während der Bereitstellungsphase neuer Geräte	22
4.7 Anwendung dieser Norm	23
5 Allgemeine Referenzbedingungen und Beanspruchungsmodelle	24
5.1 Empfohlene allgemeine Referenzbedingungen	24
5.2 Allgemeine Beanspruchungsmodelle	25
6 Integrierte Halbleiter-Schaltkreise	29
6.1 Spezifische Referenzbedingungen	29
6.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle	31
7 Diskrete Halbleiter	34
7.1 Referenzbedingungen	34
7.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle	35
8 Optoelektronische Bauelemente	38
8.1 Spezifische Referenzbedingungen	38
8.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle	40
9 Kondensatoren	43
9.1 Spezifische Referenzbedingungen	43
9.2 Spezifisches Beanspruchungsmodell	43
10 Widerstände und Widerstandsnetzwerke	46
10.1 Spezifische Referenzbedingungen	46
10.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle	47
11 Induktivitäten, Transformatoren und Spulen	48
11.1 Referenzbedingungen	48
11.2 Spezifisches Beanspruchungsmodell	48
12 Mikrowellenbauelemente	49
12.1 Spezifische Referenzbedingungen	49

	Seite
12.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle	49
13 Sonstige passive Bauelemente	49
13.1 Referenzbedingungen	49
13.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle	50
14 Elektrische Verbindungsstellen	50
14.1 Referenzbedingungen	50
14.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle	50
15 Steckverbinder und Steckfassungen	51
15.1 Referenzbedingungen	51
15.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle	51
16 Relais	51
16.1 Referenzbedingungen	51
16.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle	51
17 Schalter und Tasten	54
17.1 Spezifische Referenzbedingungen	54
17.2 Spezifisches Beanspruchungsmodell	54
18 Signal- und Meldelampen	55
18.1 Spezifische Referenzbedingungen	55
18.2 Spezifisches Beanspruchungsmodell	55
19 Leiterplatten	56
20 Hybridschaltungen	56
Anhang A (normativ) Ausfallarten von Bauelementen	57
A.1 Ausfallarten	57
Anhang B (informativ) Wärmemodell für Halbleiter	60
B.1 Wärmemodell	60
B.2 Berechnung der Sperrschichttemperatur	62
B.3 Berechnung des Wärmewiderstandes	62
B.3.1 Ermittlung der mittleren Verlustleistung P einer integrierten Schaltung	63
Anhang C (informativ) Vorhersage der Ausfallrate	66
C.1 Allgemeines	66
C.2 Vorhersage der Ausfallrate für Baugruppen	66
C.2.1 Allgemeines	66
C.2.2 Annahmen und Grenzen	67
C.2.3 Vorgehensweise für die Vorhersage der Ausfallrate	67
C.2.4 Vorhersagemodelle	68
C.2.5 Weitere Methoden der Zuverlässigkeitsvorhersage	69
C.2.6 Gültigkeitsbetrachtungen für Zuverlässigkeitsmodelle und Vorhersagen	70
C.3 Bauelementebetrachtungen	71
C.3.1 Bauelementemodell	71

	Seite
C.3.2 Bauelementekennzeichnung	71
C.4 Allgemeine Betrachtungen zur Ausfallrate	72
C.4.1 Allgemeines	72
C.4.2 Allgemeines Verhalten der Ausfallrate von Bauelementen	72
C.4.3 Erwartungswerte für die Ausfallrate	73
C.4.4 Ursachen für abweichende Ausfallraten.....	74
Anhang D (informativ) Betrachtungen zum Beanspruchungsprofil	75
D.1 Allgemeines	75
D.2 Ruhezustand	75
D.3 Beanspruchungsprofil.....	76
D.4 Beispiel für ein Beanspruchungsprofil	77
Anhang E (informativ) Modelle für die Brauchbarkeitszeit	78
E.1 Allgemeines	78
E.2 Leistungstransistoren	78
E.3 Optokoppler	78
E.3.1 Lebenserwartung L	78
E.3.2 Faktor L_0	79
E.3.3 Faktor κ_0	79
E.3.4 Faktor κ_1	80
E.3.5 Faktor κ_2	80
E.3.6 Faktor κ_3	80
E.4 LED und Laserdiodenmodule	80
E.4.1 Lebenserwartung L	80
E.4.2 Faktor L_0	81
E.4.3 Faktor κ_0	81
E.4.4 Faktor κ_1	82
E.4.5 Faktor κ_2	82
E.4.6 Faktor κ_3	82
E.5 Aluminium-Elektolytkondensator mit flüssigem Elektrolyt	82
E.6 Relais.....	83
E.6.1 Lebenserwartung L	83
E.6.2 Faktor L_b für Quecksilber-Reedrelais (mercury wetted reed relays), kleine Leistung.....	84
E.6.3 Faktor L_b für Schutzgasrelais (dry reed relays), Kleinleistung	84
E.6.4 Faktor L_b für elektromechanische Relais, Miniatur oder Karten – Europäischer Typ, thermische Relais	85
E.6.5 Faktor L_b für Industrie-Relais, Hochvolt-Vacuumrelais, Leistungs-Quecksilber-Relais	85
E.7 Schalter und Tastaturen	86

	Seite
E.8 Steckverbinder	86
Anhang F (informativ) Ausfallphysik	87
F.1 Ausfallphysik	87
Annex G (informativ) Betrachtungen zur Entwicklung einer Datenbasis über Ausfallraten	88
G.1 Allgemeines	88
G.2 Erfassung der Datensammlung – Erfassungsprozess	88
G.3 Zu erfassende Daten und Art der Datenerfassung	88
G.4 Berechnung und Entscheidung	89
G.5 Datenattribute für Ausfallraten-Datenbasis	89
Anhang H (informativ) Potentielle Quellen für Ausfallratendaten und Methoden für die Auswahl	91
H.1 Allgemeines	91
H.2 Auswahl der Datenquelle	91
H.3 Anwenderdaten	92
H.4 Herstellerdaten	92
H.5 Handbuch-Zuverlässigkeitsdaten	93
H.5.1 Allgemeines	93
H.5.2 Verwendung von Handbuchdaten mit dieser Norm	93
H.5.3 Liste verfügbarer Handbücher	94
Anhang I (informativ) Überblick über Bauelementeklassifikation	99
I.1 Allgemeines	99
I.2 Das IEC 61360-System	99
I.3 Andere Systeme	108
I.3.1 NATO-Produktnummern	108
I.3.2 UNSPSC-Codes	108
I.3.3 STEP/EXPRESS	109
I.3.4 IECQ	109
I.3.5 ECALS	109
I.3.6 ISO 13584	109
I.3.7 MIL-Spezifikationen	109
Anhang J (informativ) Darstellung von Zuverlässigkeitsdaten von Bauelementen	110
J.1 Allgemeines	110
J.2 Kennzeichnung der Bauelemente	110
J.2.1 Allgemeines	110
J.2.2 Bauelementekennzeichnung	111
J.2.3 Bauelementetechnologie	111
J.3 Spezifikation für Bauelemente	111
J.3.1 General	111
J.3.2 Elektrische Spezifikation für Bauelemente	111
J.3.3 Umweltbezogene Spezifikation für Bauelemente	111

	Seite
J.4 Prüfungsbezogene Angaben	112
J.4.1 Allgemeines	112
J.4.2 Aktuelle Prüfbedingungen	112
J.5 Angaben über Prüfausfälle	112
Anhang K (informativ) Beispiele	114
Integrierter Schaltkreis	114
Transistor	114
Kondensator	115
Relais	115
Literaturhinweise	116

Bilder

Bild 1 – Zeitabhängige Ausfallrate einer neuen elektronischen Leiterplatte	22
Bild 2 – Vergleich der Temperaturabhängigkeit für CMOS IS	24
Bild 3 – Auswahl der Beanspruchungsfelder entsprechend Betriebsstrom und -spannung	52
Bild 4 – Auswahl der Beanspruchungsfelder entsprechend Betriebsstrom und -spannung	54
Bild B.1 – Thermisches Modell für Bauelement und Gerät	61
Bild B.2 – Thermisches Widerstandsmodell	62
Bild D.1 – Beanspruchungsprofil	77

Tabellen

Tabelle 1 – Grundlegende Umgebungen	20
Tabelle 2 – Werte für umgebungsbedingte Parameter für grundlegende Umgebungen	21
Tabelle 3 – Empfohlene Referenzbedingungen für umgebungsbedingte und mechanische Beanspruchung	25
Tabelle 4 – Beanspruchungsfaktor für Umgebungsbedingungen, π_E	28
Tabelle 5 – Speicher	29
Tabelle 6 – Mikroprozessoren und Peripherie, Mikrokontroller und Signalprozessoren	30
Tabelle 7 – Digitale Familien- und Bus-Interface-Schaltkreise, Bustreiber- und Empfängerschaltungen	30
Tabelle 8 – Analoge integrierte Schaltkreise (IC)	30
Tabelle 9 – Anwendungsspezifische integrierte Schaltkreise (ASICs)	31
Tabelle 10 – Konstanten für Spannungsabhängigkeit	31
Tabelle 11 – Faktor π_U für digitale integrierte CMOS-Schaltkreise	32
Tabelle 12 – Faktor π_U für bipolare analoge integrierte Schaltkreise	32
Tabelle 13 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit	32
Tabelle 14 – Faktor π_T für integrierte Schaltkreise (ohne EPROM, FLASH-EPROM, OTPROM, EEPROM, EAROM)	33
Tabelle 15 – Faktor π_T für EPROM, FLASH-EPROM, OTPROM, EEPROM, EAROM	33
Tabelle 16 – Transistoren allgemein, niederfrequent	34
Tabelle 17 – Mikrowellen-Transistoren, z. B. RF > 800 MHz	34

	Seite
Tabelle 18 – Dioden	35
Tabelle 19 – Leistungshalbleiter.....	35
Tabelle 20 – Konstanten für Spannungsabhängigkeit der Transistoren	36
Tabelle 21 – Faktor π_U für Transistoren.....	36
Tabelle 22 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit der diskreten Halbleiter.....	36
Tabelle 23 – Faktor π_T für Transistoren, Referenz- und Mikrowellendioden.....	37
Tabelle 24 – Faktor π_T für Dioden (ohne Referenz- und Mikrowellendioden) und Leistungshalbleiter.....	37
Tabelle 25 – optoelektronische Halbleiter-Signalempfänger.....	38
Tabelle 26 – Leuchtdioden (LED, IRED), Laserdioden und optische Sende-Bauelemente	38
Tabelle 27 – Optokoppler und Lichtschranken.....	39
Tabelle 28 – Passive optoelektronische Bauelemente	39
Tabelle 29 – Transceiver, Transponder und optische Subsysteme.....	39
Tabelle 30 – Konstanten für Spannungsabhängigkeit der Phototransistoren.....	40
Tabelle 31 – Faktor π_U für Phototransistoren.....	40
Tabelle 32 – Konstanten für Stromabhängigkeit der LEDs und IREDs	40
Tabelle 33 – Faktor π_I für LEDs und IREDs	40
Tabelle 34 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit der optoelektronischen Bauelemente	41
Tabelle 35 – Faktor π_T für optoelektronische Bauelemente	42
Tabelle 36 – Kondensatoren	43
Tabelle 37 – Konstanten für Spannungsabhängigkeit der Kondensatoren.....	44
Tabelle 38 – Faktor π_U für Kondensatoren	44
Tabelle 39 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit der Kondensatoren	45
Tabelle 40 – Faktor π_T für Kondensatoren	46
Tabelle 41 – Widerstände und Widerstandsnetzwerke	47
Tabelle 42 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit der Widerstände	47
Tabelle 43 – Faktor π_T für Widerstände.....	47
Tabelle 44 – Induktivitäten, Transformatoren und Spulen	48
Tabelle 45 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit der Induktivitäten, Transformatoren und Spulen	48
Tabelle 46 – Faktor π_T für Induktivitäten, Transformatoren und Spulen	49
Tabelle 47 – Mikrowellenbauelemente	49
Tabelle 48 – Sonstige passive Bauelemente	50
Tabelle 49 – Elektrische Verbindungen.....	50
Tabelle 50 – Steckverbinder und Steckfassungen.....	51
Tabelle 51 – Relais.....	51
Tabelle 52 – Faktor π_{ES} für Schwachstromrelais.....	52
Tabelle 53 – Faktor π_{ES} für allgemeine Schaltrelais.....	53

	Seite
Tabelle 54 – Faktor π_{ES} für KFZ-Relais	53
Tabelle 55 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit der Relais	53
Tabelle 56 – Faktor π_T für Relais	53
Tabelle 57 – Schalter und Tasten.....	54
Tabelle 58 – Faktor π_{ES} für Schalter und Tasten für Schwachstromanwendungen	55
Tabelle 59 – Faktor π_{ES} für Schalter und Tasten für höhere elektrische Belastbarkeit	55
Tabelle 60 – Signal- und Meldelampen	55
Tabelle 61 – Faktor π_U für Signal- und Meldelampen	56
Tabelle A.1 – Ausfallarten – Integrierte Schaltkreise (digital).....	57
Tabelle A.2 – Ausfallarten – Transistoren, Dioden, Optokoppler	58
Tabelle A.3 – Ausfallarten: optische Bauelemente.....	58
Tabelle A.4 – Ausfallarten von Kondensatoren	59
Tabelle A.5 – Ausfallarten: Widerstände, induktive Bauelemente, Relais.....	59
Tabelle B.1 – Wärmewiderstand als Funktion von Gehäusetyp, Pin-Anzahl und Luftstromfaktor	63
Tabelle G.1 – Attribute für Datenbasis für Zuverlässigkeitsvorhersagen	89
Tabelle H.1 – Quellen für Ausfallratendaten (alphabetisch geordnet).....	94
Tabelle I.1 – Klassifikationsbaum (IEC 61360).....	100

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 56/1583/CD:2014 „Electric components – Reliability – Reference conditions for failure rates and stress models for conversion“ (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 beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 56 „Dependability“ 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 132 „Zuverlässigkeit“ 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.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO [und/oder] IEC sind 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 61709:2012-01 und DIN EN 61709 Berichtigung 1:2012-07 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Überarbeitung des Hauptteiles der Norm;
- b) Anhang A überarbeitet „Ausfallarten von Bauelementen“;
- c) Anhang B übernommen von TR 62380, überarbeitet „Wärmemodell für Halbleiter“;

- d) Anhang C übernommen von Anhang B, überarbeitet „Vorhersage der Ausfallrate“;
- e) Anhang D „Betrachtungen zum Beanspruchungsprofil“;
- f) Anhang E übernommen von TR 62380, überarbeitet „Modelle für die Brauchbarkeitszeit“;
- g) Anhang F „Ausfallphysik“;
- h) Anhang G übernommen von Anhang C, überarbeitet „Betrachtungen zur Entwicklung einer Datenbasis über Ausfallraten“;
- i) Anhang H übernommen von Anhang D, überarbeitet „Potentielle Quellen für Ausfallratendaten und Methoden für die Auswahl“;
- j) Anhang I übernommen von Anhang E, überarbeitet „Überblick über Bauelementeklassifikation“;
- k) Anhang J teilweise übernommen von IEC 60319, überarbeitet „Darstellung von Zuverlässigkeitsdaten von Bauelementen“;
- l) Anhang K übernommen von Anhang F „Beispiele“.

Elektrische Bauelemente – Zuverlässigkeit – Referenzbedingungen für Ausfallraten und Beanspruchungsmodelle zur Umrechnung

Einleitung

Diese Internationale Norm ist für die Zuverlässigkeitsvorhersage von Bauelementen bestimmt, die in Geräten verwendet werden, und zielt auf Organisationen, die ihre eigenen Ausfallratendaten haben, und sie beschreibt, wie diese Daten zur Durchführung von Zuverlässigkeitsvorhersagen angegeben und verwendet werden können.

Sie kann von einer Organisation auch dazu verwendet werden, eine Ausfallratensammlung zu erstellen, und sie beschreibt die Referenzbedingungen, für die Feldausfallraten angegeben werden sollten. Die in diese Norm übernommenen Referenzbedingungen sind typisch für die Mehrzahl der Bauelementeanwendungen in Geräten, werden jedoch Bauelemente unter anderen Bedingungen betrieben, dann kann der Anwender diese Bedingungen als seine Referenzbedingungen angeben.

Die vorgestellten Beanspruchungsmodelle ermöglichen die Extrapolation der Ausfallraten von Referenzbedingungen auf andere Betriebsbedingungen, was wiederum die Ausfallratenvorhersage auf der Baugruppenebene erlaubt. Dies ermöglicht die Abschätzung der Auswirkung von Entwicklungsänderungen oder Änderungen der Umgebungsbedingungen auf die Bauelementezuverlässigkeit. Die Zuverlässigkeitsvorhersage ist in der frühen Entwicklungsphase von Geräten äußerst nützlich. Sie kann zum Beispiel dazu verwendet werden, potentielle Zuverlässigkeitsprobleme aufzuzeigen, Strategien für die logistische Unterstützung zu planen und Entwicklungskonzepte zu bewerten.

Die hier angegebenen Beanspruchungsmodelle sind von Natur aus generisch und so einfach wie möglich, jedoch vergleichbar mit komplexeren Gleichungen in anderen Modellen.

Diese Norm enthält keine Ausfallratenwerte, aber sie beschreibt, wie Ausfallraten angegeben und verwendet werden können. Diese Vorgehensweise ermöglicht Anwendern, die relevantesten und aktuellsten Ausfallraten für Vorhersagen von der von ihnen ausgewählten Quelle auszuwählen. Diese Norm enthält auch Information über die Auswahl der Daten, die in den dargestellten Modellen verwendet werden können.

Die in dieser Norm betrachteten Ausfallraten werden als konstant angenommen, entweder für eine unbegrenzte Betriebsdauer (allgemeiner Fall) oder für begrenzte Dauern. Die Begrenzung der Lebenserwartung heißt Brauchbarkeitszeit und gilt nur für einige wenige Bauelementefamilien, die die Verschleißausfallphase (während der die Ausfälle einen systematischen Charakter annehmen) innerhalb der normalen Nutzungsdauer erreichen. Es wird daher angenommen, dass während der Brauchbarkeitszeit die Ausfallrate für jede praktische Anwendung als konstant betrachtet werden kann.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm gibt Anleitung für die Verwendung von Ausfallratendaten für die Zuverlässigkeitsvorhersage von elektrischen Bauelementen, die in Geräten eingesetzt werden.

Die in dieser Norm dargestellte Methode verwendet das Konzept von Referenzbedingungen, das sind typische Werte von Beanspruchungen, die für Bauelemente in der Mehrzahl der Anwendungen beobachtet werden.

Referenzbedingungen sind nützlich, da sie eine bekannte Standardbasis bereitstellen, von der aus Ausfallraten modifiziert werden können, um Abweichungen der Umgebung von den als Referenzbedingungen angenommenen Umgebungen zu berücksichtigen. Es können die in dieser Norm angegebenen oder eigene Referenzbedingungen verwendet werden. Werden Ausfallraten bei Referenzbedingungen angegeben, dann können realistische Zuverlässigkeitsvorhersagen in der frühen Entwicklungsphase durchgeführt werden.

Die in dieser Norm beschriebenen Beanspruchungsmodelle sind generisch und können, wenn notwendig, als Basis für die Umrechnung der gegebenen Ausfallratendaten bei diesen Referenzbedingungen zu den tat-

sächlichen Betriebsbedingungen verwendet werden. Dies vereinfacht die Vorgehensweise bei der Vorhersage. Die Umrechnung der Ausfallratendaten ist nur innerhalb der angegebenen Beanspruchungsgrenzwerte der Bauelemente zulässig.

Diese Internationale Norm enthält auch Hinweise, wie eine Ausfallratensammlung erstellt werden kann, um Ausfallraten bereitzustellen, die mit den zugehörigen Beanspruchungsmodellen verwendet werden können. Es werden Referenzbedingungen für Ausfallratendaten festgelegt, damit Daten von verschiedenen Quellen auf einheitlicher Basis verglichen werden können. Werden Daten über Ausfallraten in Übereinstimmung mit dieser Internationalen Norm angegeben, dann ist keine zusätzliche Information über die festgelegten Bedingungen notwendig.

In dieser Norm sind keine Werte für Ausfallraten angegeben – sie stellt vielmehr Modelle bereit, mit denen Ausfallraten, die auf andere Weise erhalten wurden, von einer Betriebsbedingung zu einer anderen Betriebsbedingung umgerechnet werden können.

Für die in dieser Norm beschriebene Vorhersagemethode wird davon ausgegangen, dass die verwendeten Bauelemente innerhalb ihrer Brauchbarkeitszeit verwendet werden. Die Methoden in dieser Norm können allgemein angewendet werden, sie werden aber spezifisch auf die Bauelementefamilien angewendet, die in den Abschnitten 6 bis 20 und I.2 angegeben sind.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente 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 60050-191, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 191: Dependability and quality of service*

IEC 60605-6, *Equipment reliability testing – Part 6: Tests for the validity and estimation of the constant failure rate and constant failure intensity*

IEC 60721-3-4, *Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 4: Stationary use at non-weatherprotected locations*

IEC/PAS 62435:2005, *Electronic components – Long-duration storage of electronic components – Guidance for implementation*

3 Begriffe und Formelzeichen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-191 und die folgenden Begriffe.

3.1.1

elektrisches Bauteil

Bauteil mit leitenden Anschlüssen, die mit Spannungen oder Strömen beaufschlagt werden dürfen oder Spannungen oder Ströme liefern können

[modifiziert von IEC 61360-1]

ANMERKUNG Der Begriff „elektrisches Bauteil“ schließt die allgemein verwendenden Begriffe „elektronisches Bauelement“, „elektrisches Bauelement“ und „elektromechanisches Bauelement“ ein.

3.1.2

Ausfall (einer Einheit)

Beendigung der Fähigkeit, eine geforderte Funktion zu erfüllen

ANMERKUNG 1 Wenn die Beendigung der Fähigkeit durch einen latenten Fehlzustand verursacht wird, dann tritt der Ausfall auf, wenn bestimmte Umstände zusammentreffen.

ANMERKUNG 2 Der Ausfall einer Einheit ist ein Ereignis, der zum Fehlzustand dieser Einheit führt, was ein Zustand ist.

3.1.3

Ausfallart

Art, in der Ausfälle auftreten

ANMERKUNG Eine Ausfallart kann durch den Verlust der Funktion oder den erfolgten Zustandsübergang definiert sein.

3.1.4

momentane Ausfallrate

Ausfallrate

Grenzwert – falls er existiert – des Quotienten der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass der Zeitpunkt des Ausfalls einer nicht instandzusetzenden Einheit in ein gegebenes Zeitintervall $(t, t + \Delta t)$ fällt, durch Dauer Δt dieses Zeitintervalls, wenn Δt gegen null geht, unter der Bedingung, dass die Einheit im Zeitintervall $(0, t)$ nicht ausgefallen ist

ANMERKUNG 1 Die momentane Ausfallrate $\lambda(t)$ wird ausgedrückt durch die Gleichung

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t \cdot R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Dabei sind $F(t)$ und $f(t)$ die Verteilungsfunktion und die Wahrscheinlichkeitsdichte des Ausfallzeitpunktes, $R(t)$ ist die Zuverlässigkeitsfunktion bezogen auf die Zuverlässigkeit $R(t_1, t_2)$ durch $R(t) = R(0, t)$.

ANMERKUNG 2 Siehe IEC 61703.

ANMERKUNG 3 Andere im Englischen verwendete Begriffe für die momentane Ausfallrate sind „hazard function“, „hazard rate“ und „force of mortality“ (Abkürzung FOM).

ANMERKUNG 4 In dieser Norm wird $\lambda(t)$ über der Zeit als konstant angenommen.

3.1.5

Referenzbedingungen

Beanspruchungen sind so gewählt, dass sie der Mehrzahl der Bauelementeanwendungen in Geräten entsprechen.

ANMERKUNG Die Beanspruchungen beinhalten elektrische Beanspruchungen, Temperatur und Umgebungsbedingungen.

3.1.6

Ausfallrate unter Referenzbedingungen

Ausfallrate unter den in dieser Norm angegebenen Referenzbedingungen

ANMERKUNG Die Ausfallrate ist bauelementespezifisch, d. h. sie beinhaltet die Auswirkung der Komplexität, der Gehäusetechnologie, die Abhängigkeit von Herstellern und den Herstellprozess usw.

3.1.7

Betriebszyklus

festgelegte Folge von Betriebsbedingungen

[IEV 151-16-02]

ANMERKUNG Der Betriebszyklus gibt an, ob Bauelemente während des Betriebes dauernd oder intermittierend beansprucht werden. Dauerbetrieb ist als Betrieb über einen längeren Zeitraum bei konstanter oder wechselnder Belastung definiert (z. B. Leitsysteme, Fernsprechvermittlungseinrichtungen). Aussetzbetrieb ist als Betrieb bei konstanter oder wechselnder Belastung während des betriebsfähigen Zustandes definiert (z. B. numerische Maschinensteuerungen, Straßenverkehrssampeln).

3.1.8

Betriebszustand (einer Einheit)

Zustand, in dem eine Einheit wie gefordert funktioniert

ANMERKUNG 1 Für ein Bauelement bedeutet dies, dass es unter Spannung steht und/oder mit einer Last verbunden ist.

[IEC 60050-192:FDIS 192-02-04 modifiziert]

3.1.9

Nichtbetriebszustand (einer Einheit)

Zustand, in dem eine Einheit keine geforderte Funktion ausführt

ANMERKUNG 1 Ein Bauelement kann im Nichtbetriebszustand sein aufgrund eines Ausfalls oder weil es im Leerlauf (192-02-15) ist, wenn es nicht notwendig ist, im betriebsfähigen bzw. im Stand-by-Zustand (192-02-13) zu sein, während der geforderten Anwendungsdauer oder während einer extern bedingten Nichtverfügbarkeitszeit (192-02-24), wenn der Stillstand aufgrund fehlender Ressourcen auftritt.

[IEC 60050-192:FDIS 192-02-06 modifiziert]

3.1.10

Ruhezustand

inaktiver Zustand, aber in der Lage, aktiv zu werden

ANMERKUNG 1 Für ein Bauelement bedeutet dies, dass es bereit ist, unter Spannung zu stehen und/oder mit einer Last verbunden zu werden.

3.1.11

Lagerungszustand

Zustand der Einlagerung in einer bestimmten Einrichtung unter festgelegten Bedingungen, ohne unter Spannung zu stehen und/oder an einer Last angeschlossen zu sein

ANMERKUNG 1 Das Bauelement ist nicht in einem Gerät eingebaut.

3.1.12

Vorhersage

Berechnungsvorgang zur Ermittlung des vorhergesagten Wertes einer Größe

3.1.13

Bauelement

wesentlicher Bestandteil einer Einrichtung, der nicht physisch in kleinere Bestandteile aufgeteilt werden kann, ohne seine spezifische Funktion zu verlieren

[IEV 151-11-21]

3.1.14

Ausrüstung

Betriebsmittel

einzelnes Gerät oder Gesamtheit von Einrichtungen oder Geräten oder Gesamtheit der wesentlichen Einrichtungen einer Anlage oder alle zur Ausführung einer bestimmten Aufgabe notwendigen Einrichtungen

ANMERKUNG Beispiele für Ausrüstungen oder Betriebsmittel sind ein Transformator, die Ausrüstung einer Schaltstation oder eine Messeinrichtung.

[IEV 151-11-25]

3.1.15**Brauchbarkeitszeitintervall****Brauchbarkeitsdauer**

Zeitintervall, von der ersten Verwendung und das dann endet, wenn die Nutzeranforderung nicht länger eingehalten wird, und zwar wegen unwirtschaftlichem Betrieb oder Obsoleszenz

3.1.16**Drift**

Differenz zwischen dem Endwert einer Kenngröße am Ende eines spezifizierten Zeitintervalls und dem Startwert, wenn alle anderen Betriebsbedingungen konstant gehalten wurden

ANMERKUNG Die Verwendung des Begriffs „Drift“ mit Bezug auf die unmittelbare Änderung einer Kenngröße als direkte Reaktion auf geänderte Betriebsbedingungen (z. B. Temperatur) wird abgelehnt.

3.1.17**Ersatztemperatur** (eines Halbleiterbauelements)

theoretischer Temperaturwert, der mit Hilfe einer vereinfachten Darstellung des thermischen und elektrischen Verhaltens des Halbleiterbauelements berechnet werden kann

[IEV 521-05-14]

ANMERKUNG Die Ersatztemperatur ist nicht notwendigerweise die höchste Temperatur im Bauelement.

3.1.18**Ersatz-Sperrschichttemperatur**

Ersatztemperatur des Übergangs eines Halbleiterbauelements

[IEV 521-05-15]

3.2 Formelzeichen

In dieser Internationalen Norm werden folgende Formelzeichen verwendet:

E_a	Aktivierungsenergie eines Ausfallprozesses
L	Brauchbarkeitsintervall, Brauchbarkeitszeit
λ	Ausfallrate unter Betriebsbedingungen
λ_{ref}	Ausfallrate unter Referenzbedingungen
λ_i	Ausfallrate bei Stillstand für eine Baugruppe
λ_p	Ausfallrate bei Teillast für eine Baugruppe
$\lambda_{\text{component}}$	Ausfallrate eines Bauelementes
λ_{mode}	Ausfallrate einer Ausfallart eines Bauelementes
λ_S	Ausfallrate eines Systems
λ_f	Ausfallrate bei Volllast für eine Baugruppe
π_I	Faktor für Stromabhängigkeit
π_E	Faktor für Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen
π_{ES}	Faktor für Abhängigkeit von der elektrischen Beanspruchung
π_T	Faktor für Temperaturabhängigkeit
π_U	Faktor für Spannungsabhängigkeit

t_i	Zeitanteil des Stillstands für eine Baugruppe
t_f	Zeitanteil mit Volllast für eine Baugruppe
t_p	Zeitanteil mit Teillast für eine Baugruppe
I_{op}	Betriebsstrom
I_{rat}	Bemessungsstrom
P_{op}	Betriebsverlustleistung
P_{rat}	Bemessungsverlustleistung
R_{th}	Wärmewiderstand
$R_{th,amb}$	Wärmewiderstand (gegen die Umgebung)
S	Anzahl der Schaltspiele je Stunde
U_{op}	Betriebsspannung
ΔT	tatsächliche Eigenerwärmung in Grad Celsius
θ_0	Referenzumgebungstemperatur in Grad Celsius
θ_{amb}	Umgebungstemperatur in Grad Celsius
T_{amb}	Umgebungstemperatur in Kelvin
θ_{op}	Betriebstemperatur in Grad Celsius – für Kondensatoren die tatsächliche Kondensatortemperatur, – für diskrete Halbleiter und optoelektronische Bauelemente die tatsächliche Sperrschichttemperatur, – für Induktivitäten die tatsächliche mittlere Wicklungstemperatur, – für integrierte Schaltkreise (ICs) die tatsächliche Ersatz-Sperrschichttemperatur, – für sonstige elektronische Bauelemente die tatsächliche Umgebungstemperatur, – für Widerstände die tatsächliche mittlere Temperatur des Widerstandselementes
θ_{ref}	Referenztemperatur in Grad Celsius – für Kondensatoren die Kondensatortemperatur unter Referenzbedingungen, – für diskrete Halbleiter und optoelektronische Bauelemente die Sperrschichttemperatur unter Referenzbedingungen, – für Induktivitäten die mittlere Wicklungstemperatur unter Referenzbedingungen, – für integrierte Schaltkreise die Ersatz-Sperrschichttemperatur unter Referenzbedingungen, – für sonstige elektronische Bauelemente die Bauelementetemperatur unter Referenzbedingungen, – für Widerstände die mittlere Temperatur des Widerstandselementes unter Referenzbedingungen

4 Kontext und Bedingungen

4.1 Ausfallarten und -mechanismen

Die bevorzugte Kenngröße für Zuverlässigkeitsdaten von elektrischen Bauelementen ist die (momentane) Ausfallrate. Es ist zu beachten, dass das exakt beobachtete Ereignis, das festgestellt wird, eine Ausfallart ist, obwohl es oft allgemein als Ausfall definiert wird.

In Geräten wird ein Ausfall oder ein Funktionsausfall durch einen Bauelementeausfall verursacht, wobei diese Bauelementeausfallart für den vom Gerät ausgeführten Anwendungsfall von Bedeutung ist.

Es sollte beachtet werden, dass ein Bauelement viele Funktionen hat und davon fallweise nur einige für eine spezielle Anwendung verwendet werden. Ein Funktionsausfall auf Geräteebe­ne tritt nur dann auf, wenn ein Ausfall der Bauelementefunktion auftritt, die diese Gerätefunktion unterstützt.

Außerdem ist für einen Schaltkreis das Vorhandensein von Bauelementefunktionen in Bezug auf die Anforderungen des Entwicklers notwendig; das wird nicht immer den ganzen Funktionsumfang des Bauelementes umfassen, und eine spezielle Funktion wird nicht immer in Bezug auf funktionale Kenngrößen bis zu der im Datenblatt angegebenen Leistungsgrenze und Belastbarkeit betrieben werden.

Handbücher definieren üblicherweise die Ausfallrate als einen Gesamtwert, der alle Ausfallarten einschließt. Das bedeutet, dass die Bauelementeausfallrate als Summe der Ausfallraten aller Ausfallarten betrachtet werden kann:

$$\lambda_{\text{component}} = \sum_{i=1}^n (\lambda_{\text{mode}})_i \quad (1)$$

Dabei ist $(\lambda_{\text{mode}})_i$ die Ausfallrate des Bauelementes, in dem die Ausfallart i auftritt, und n die Anzahl der Ausfallarten.

Ausfallarten sind im Anhang A angegeben.

Ein Ausfall steht in Beziehung zu einem Ausfallmechanismus, einem grundlegenden Materialverhalten, das zu einem Ausfall führt.

Die hauptsächlich in Halbleitern beobachteten Ausfälle werden durch thermomechanische Zwänge verursacht, die auf die Bauelemente wirken, die auf Leiterplatten montiert sind. Die Ausfallrate bezüglich der Luftfeuchtigkeit ist unbedeutend (für aktive Bauelemente wegen der allgemeinen Verwendung Nitrid basierter Passivierungen). Darüber hinaus ist in diesen untersuchten Umgebungen kein Fehler in Bezug auf mechanischen Stoß oder aufgrund von Vibrationen oder chemischer Kontamination beobachtet worden. Folglich wurden diese Ausfallmechanismen nicht in den Modellen berücksichtigt.

4.1.1 Ausfallmechanismen integrierter Schaltkreise

Das Ende der Lebensdauer eines integrierten Schaltkreises liegt vermutlich weit über der Nutzungsdauer des Gerätes. Diese Annahme ist durch eine Voruntersuchung zu beurteilen.

Die wichtigsten zu beurteilenden Ausfallmechanismen sind folgende:

- Für Siliziumtechnologien:
 - Elektromigration (en: electromigration);
 - Oxidalterung (en: oxides ageing);
 - heiße Elektronen (en: hot electrons);
 - Ladungsgewinn und -verlust (en: charge gain and charge) (für die Schreib/Lese-Zyklen unterschiedlicher programmierbarer Speicher).
- Für GaAs-Technologien:
 - gate sink ^{N1)};
 - Ohmsche Kontaktdegradation (en: Ohmic contact degradation);
 - Gate- und Drainverzögerung (en: gate and drain lagging);
 - Elektromigration (en: electromigration).
- Gehäuse:
 - thermische Ermüdung (en: thermal fatigue);
 - Purpurpest (en: purple plague).

^{N1)} Nationale Fußnote: Unter „gate sink“ versteht man den Effekt, dass in gate-Metall in die unterliegende Halbleiterschicht diffundiert.

Geschätzte Ausfallraten sind nur gültig, wenn die kälteste Teiltemperatur der betrachteten Karte über der Taupunkttemperatur liegt.

Das Modell enthält keine Ausfallrate aufgrund von „soft errors“, wenn die Funktion ohne äußeren Eingriff wiederherstellbar ist, z. B. hervorgerufen durch die Bildung von Elektron-Loch-Paaren durch das Passieren von Alpha-Teilchen, die von Gehäusematerialien emittiert werden. Diese Ausfallrate aufgrund von „soft-errors“ kann von der gleichen Größenordnung sein wie die inhärente Ausfallrate, speziell für dynamische Speicher.

Für Interface-Schaltungen enthalten die Modelle aufgrund äußerer elektrischer Einflüsse eine konstant angenommene Ausfallrate. Diese Ausfallrate hängt von der elektrischen Umgebung des Gerätes ab, vorausgesetzt das Gerät hat primäre oder sekundäre Schutzmaßnahmen abhängig vom Stand der Technik in der beobachteten Phase. (Für die Zwecke dieser Internationalen Norm werden Interface-Schaltungen als Schaltungen oder Einheiten verwendet, um die Geräte an die äußere Umgebung anzuschließen.)

4.2 Thermische Modellierung

Die Temperatur ist ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Ausfallrate. Es ist in der Tat weithin anerkannt, dass sich die Temperatur auf die Bauelementezuverlässigkeit auswirkt. Der Einfluss ist für einige Familien noch signifikanter (aktive Bauelemente und Aluminiumkondensatoren mit flüssigem Elektrolyt). Die gewählten Modelle geben den Einfluss der Temperatur auf die vorherrschende Ausfallmechanismen an (die normalerweise keine Verschleißmechanismen sind).

Die thermische Modellierung von Bauelementen sollte dann so genau wie möglich sein, insbesondere sollte der thermische Widerstand von Halbleitern gemessen werden, um die genaue Ermittlung der internen Temperatur zu ermöglichen.

Kann der thermische Widerstand nicht gemessen werden, dann können die Wärmewiderstandsmodelle im Anhang B verwendet werden.

4.3 Berücksichtigung des Beanspruchungsprofils

Während ihrer Lebensdauer erfahren Bauelemente unterschiedliche Anwendungsbedingungen, die die wesentlichen Faktoren zur Beeinflussung der Bauelementezuverlässigkeit verkörpern; der Komplex ihrer Bedingungen ist als Beanspruchungsprofil definiert.

Das Beanspruchungsprofil beschreibt die notwendigen Funktions- und Umgebungsbedingungen als Funktion der Zeit. Dieses wird abhängig von der auftretenden Beanspruchungsart variieren. Dies kann Dauerbetrieb über der Zeit auf festem Niveau, Dauerbetrieb über der Zeit auf veränderlichem Niveau oder sporadisch entweder auf festem oder veränderlichem Niveau sein. In einigen Fällen könnte das Ein- und Ausschalten signifikant und von größerer Bedeutung sein als die stationären Betriebsbedingungen. Die sorgfältige Betrachtung des Beanspruchungsprofils ist notwendig, um völlig zu verstehen, wie es die Bauelementezuverlässigkeit beeinflusst.

Das Beanspruchungsprofil kann basierend auf der Kalenderzeit oder auf der aktuellen Betriebszeit berücksichtigt werden, oder es kann Zyklusbezogen sein (z. B. wie oft eine Einheit verwendet wird).

Weitere Betrachtungen zum Beanspruchungsprofil sind detailliert im Anhang D angegeben.

4.3.1 Betriebs- und Nichtbetriebsbedingungen

Das Beanspruchungsprofil kann basierend auf die typische Anwendung in mehrere Phasen zerlegt werden. Die wichtigste Unterteilung dieser Phasen ist zwischen Betriebs- und Nichtbetriebsbedingungen. Obwohl diese Norm sich mit Bauelementen befasst, beziehen sich die Einsatzbedingungen meist auf die Baueinheit (Gerät oder System) und können wie folgt definiert werden, wenn auf Bauelemente bezogen wird.

- Betrieb: Das Bauelement ist eingebaut, beschaltet oder verbunden mit einer Last und arbeitet bei Nennbedingungen. Siehe IEC 60050-192 [192-02-04];

- Bereitschaft: (en: Stand-by) Das Bauelement ist eingebaut, beschaltet oder mit einer Last verbunden und arbeitet unter den Nennbedingungen. Siehe IEC 60050-192 [192-02-10];
- Ruhend: Das Bauelement ist eingebaut, aber nicht beschaltet oder mit einer Last verbunden;
- Lagerung: Das Bauelement ist nicht eingebaut, daher nicht beschaltet oder mit einer Last verbunden. Während der Lagerung werden die Bauelemente verpackt in einem Lager gelagert.

4.3.2 Ruhezustand

Ein Bauelement wird als ruhend betrachtet (d. h. im Ruhezustand), wenn es inaktiv ist (es stellt keine der notwendigen Funktionen bereit), aber es ist in der Lage, auf Anforderung aktiv und ordnungsgemäß betrieben zu werden (unter Spannung stehend und/oder verbunden mit einer Last). Um als ruhend betrachtet zu werden, wird angenommen, dass das Bauelement im Gerät eingebaut ist, aber nicht unter Spannung steht.

Ruhende Bauelemente können ausfallen, aber im Allgemeinen ist die Ausfallrate im Ruhezustand deutlich geringer als die Ausfallrate im Betrieb unter der Annahme, dass das Gerät innerhalb seiner festgelegten Bedingungen gewartet wird, wenn es nicht betrieben wird.

4.3.3 Lagerung

Bauelemente unter Lagerungsbedingungen sind nicht vor Ausfällen geschützt, besonders dann, wenn die Lagerungsbedingungen von den angegebenen abweichen. Aber die in dieser Internationalen Norm angegebenen Beanspruchungsmodelle für die Faktoren für die Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen sind möglicherweise nicht anwendbar, da sie nur Betriebsbedingungen berücksichtigen. Unter Lagerungsbedingungen können unterschiedliche Ausfallmechanismen auftreten, die in den Modellen nicht berücksichtigt sind. Außerdem ist der Fall, bei dem durch die Lagerungsbedingungen die Ausfallrate der Einheit im Betrieb geändert wird, in dieser Norm nicht behandelt.

Lagerungsbedingungen sollten getrennt von Betriebsbedingungen behandelt werden. Sie können das Ausfallverhalten der Bauelemente im späteren Betrieb beeinflussen.

Weitere Informationen über Lagerung sind in IEC/PAS 62435, *Electronic components – Long-duration storage of electronic components – Guidance for implementation* angegeben. Lagerbedingungen müssen genau definiert und überprüft werden, um die Zuverlässigkeit der gelagerten Bauelemente zu gewährleisten.

4.4 Umgebungsbedingungen

Die Umgebung trägt zum Ausfall bei, der während der Lebensdauer des Gerätes auftritt. Deshalb sollten die Dauer und Intensität der umgebungsbedingten Beanspruchungen im Betriebsmodell des Gerätes berücksichtigt werden.

Eine härtere Umgebung kann öfter auftretende Ausfälle verursachen als eine weniger harte. Es gibt normalerweise mehrere Umgebungsaspekte, die für einen spezifischen Ausfall relevant sind und die alle verstanden werden sollten. Die örtliche Lage der Umgebung ist ebenfalls wichtig, z. B. sind bei einem Flugzeug die Umgebungen in der Kabine und am Triebwerk sehr unterschiedlich.

Die Umgebung kann in Form mehrerer Parameter und ihre zugeordneten Wechselbeziehungen beschrieben werden.

IEC 60721-3-3 beschreibt die Umgebung in Form von

- klimatischen Bedingungen;
- speziellen klimatischen Bedingungen;
- biologischen Bedingungen;
- chemisch aktiven Substanzen,
- mechanisch aktiven Substanzen;
- mechanischen Bedingungen (sowohl statisch als auch dynamisch).

Alle oben angegebenen Bedingungen sind im Allgemeinen für die Gerätezuverlässigkeit (Ausfallrate) von Bedeutung und es ist sinnvoll zu berücksichtigen, dass die Zuverlässigkeit von Bauelementen und damit die von den Geräten abnimmt, wenn die umgebungsbedingte Beanspruchung zunimmt (siehe Reihe IEC 60721 für eine detaillierte quantitative Beschreibung der umgebungsbedingten Parameter für jede Umgebung).

In dieser Norm wird angenommen, dass die klimatischen und mechanischen Bedingungen die wichtigsten sind, und dies gilt auch für viele Standardanwendungen von Bauelementen, aber es kann Situationen geben, in denen z. B. chemische Bedingungen eine höhere Ausfallrate ergeben könnten. Dies kann auch eintreten für nukleare, ultraviolette, infrarote und elektromagnetische Strahlung, Akustik, Einsatzhöhe, Softwaresicherheit, Vibration mit sechs Freiheitsgraden, explosionsfähige Atmosphäreumgebungen, einheiteninduzierte Bedingungen und feindliche Waffeneffekte für militärische Geräte.

In dieser Norm werden nur die klimatischen und mechanischen Parameter zur Beschreibung der Auswirkung der Referenz-Umgebungen auf die Ausfallrate verwendet. Die Temperatur wird jedoch in dieser Norm getrennt betrachtet. Der Einfachheit halber werden drei grundlegende Umgebungen ausgewählt, die konventionell mit E1, E2 und E3 bezeichnet werden. Diese Umgebungen beziehen sich auf allgemeine Anwendungssituationen im Einsatz unter Berücksichtigung spezifischer Werte für die umgebungsbedingten Parameter. Diese sind in Tabelle 1 festgelegt.

Tabelle 1 – Grundlegende Umgebungen

E1	Stationäre Anwendung in wettergeschützten Einsatzorten	Diese Umgebung ist höchst unempfindlich gegenüber dem Wetter im Freien, und die Luftfeuchtigkeit wird innerhalb festgelegter Grenzen geregelt. Das ist typisch für Geräte der Nachrichtentechnik und Computer, die in Gebäuden verwendet werden. Dies schließt Büroumgebungen mit ein.
E2	Stationäre Anwendung in teilweise wettergeschützten und nicht wettergeschützten Einsatzorten	Diese Umgebung weist thermische und mechanische Beanspruchungen auf, die direkt durch natürliche Umgebungsbedingungen beeinflusst sind. Das ist typisch für Geräte, die im Freien installiert sind.
E3	Tragbare und ortsveränderliche Anwendung, Installation in Bodenfahrzeugen	Diese Umgebung weist mechanische Beanspruchung und starke Temperaturgradienten auf. Das ist typisch für auf Fahrzeugen installierte Geräte oder tragbare Geräte.

Tabelle 2 enthält die Werte der umgebungsbedingten Parameter und ihre Beziehung zu den in den entsprechenden IEC-Normen angegebenen Klassen.

Der Einfluss der Umgebung kann als eine Änderung der Ausfallrate unter Anwendung eines Faktors für die Umgebungsabhängigkeit π_E beschrieben werden (siehe Tabelle 4). Es ist zu beachten, dass π_E ein diskreter Faktor ist, da er auf nichtkontinuierlichen Daten basiert und eine große Anzahl unterschiedlicher untergeordneter Faktoren zusammenfasst.

Es muss auf jeden Fall darauf hingewiesen werden, dass die meisten Systeme und Geräte unter beherrschter Temperatur betrieben werden und gegen die Auswirkung der externen Umwelt durch geeignete Design-Entscheidungen geschützt ist.

Diese Norm berücksichtigt Temperaturzyklus (Betriebszeiten bei unterschiedlichen Temperaturen) im Beanspruchungsprofil, während schnelle Temperaturwechsel im Faktor für die Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen π_E (siehe Abschnitt 4.5^{N2)} und 5.2.5) enthalten sind.

Die Faktoren für Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen enthalten alle umweltbedingten Parameter (außer Temperatur mit einem spezifischen Modell) wie schnelle Temperaturwechsel, mechanische Vibrationen, usw., für die keine empirischen Modelle verfügbar sind. Die Faktoren für die Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen werden auf Geräteebe verwendet.

^{N2)} Nationale Fußnote: Hinweis auf Abschnitt 4.5 statt auf Abschnitt 4.4.

Tabelle 2 – Werte für umgebungsbedingte Parameter für grundlegende Umgebungen

	E1 Stationäre Anwendung in wettergeschützten Einsatzorten	E2 Stationäre Anwendung in teilweise wetterge- schützten und nicht wetter- geschützten Einsatzorten	E3 Tragbare und ortsveränderliche Anwendung, Installation in Bodenfahrzeugen
Temperaturänderungsrate	≤ 0,5 °C/min	> 0,5°C/min	> 0,5°C/min
Stationäre Vibration, sinusförmig	2-9 Hz < 1,5 mm 9-200 Hz ≤ 5 m/s ²	2-9 Hz ≤ 3 mm 9-200 Hz ≤ 10 m/s ²	2-9 Hz > 3 mm 9-200 Hz ≥ 10 m/s ² 200-500 Hz ≥ 15 m/s ²
Nichtstationäre Vibration einschließlich Schock	≤ 70 m/s ²	≤ 250 m/s ²	> 250 m/s ²
IEC 60721-3-3-Klassen	3K1 3K2 3K3 3K4 3K5 3K6 3M1 3M2 3M3	3K7 3K7L 3K8 3K8H 3K8L 3K9 3K10 3M4 3M5 3M6 3M7	—
IEC 60721-3-4-Klassen	—	—	4K1 4K2 4K3 4K4 4K4H 4K4L
IEC 60721-3-5-Klassen	—	—	5K1 5K2 5K3 5K4 5K4H 5K4L 5K5 5K6 5M1 5M2 5M3
IEC 60721-3-7-Klassen	—	—	7K1 7K2 7K3 7K4 7K5
ETS 300 019-1-3-Klassen	3.1; 3.2; 3.3	3.4; 3.5	—
ETS 300 019-1-4-Klassen	—	4.1; 4.1E	—
ETS 300 019-1-8-Klassen	8.1 + Note	—	—
ETS 300 019-1-5-Klassen	—	—	5.1; 5.2
ETS 300 019-1-7-Klassen	—	—	7.1; 7.2; 7.3; 7.3E

Diese Internationale Norm enthält der Einfachheit halber nur die drei Umgebungen. Der Anwender kann jede Umgebung mit derselben Methodik beschreiben und die Wirkung der Umweltanwendung π_E beurteilen, wie in 5.2.5 beschrieben.

4.5 Bauelementauswahl

Es ist die Verantwortung des Herstellers, die vom Endanwender spezifizierte Lebensdauer sicherzustellen und dass die in den Geräten verwendeten Bauelemente umweltverträglich sind. Deshalb wird vorausgesetzt, dass frühzeitiger Verschleiß nicht während der Brauchbarkeitsdauer des Gerätes unter normalen Betriebsbedingungen, wie vom Endanwender vorgeschrieben, auftritt.

Einige Komponenten können jedoch eine begrenzte Lebensdauer haben und deshalb ist der Endanwender auf vorbeugende Wartung hinzuweisen. Es liegt in der Verantwortung des Bauelementeherstellers, dem Systemhersteller Qualifikations- und Bewertungsergebnisse über Degradationsmechanismen zur Verfügung zu stellen und sicherzustellen, dass das Auftreten von Verschleißmechanismen unter normalen Betriebsbedingungen über die Brauchbarkeitsdauer des Gerätes hinaus verschoben werden.

Gute Bauelemente- und Gerätezuverlässigkeit ist nicht ohne Aufwand zu erreichen. Gerätezuverlässigkeit ist hinein entwickelt, beginnend von den ersten Entwicklungsphasen durch die Anwendung eines gründlichen Qualitätssicherungssystems, dass auf Verbesserung ausgerichtet ist. Dies bedeutet, dass sich die unzureichende Anwendung der Regeln für hervorragende Exzellenz in Qualität und Zuverlässigkeit – unter Berücksichtigung des Produkttyps und seiner Anwendung und der Instandhaltungskritikalität – auf die Erreichung des Zieles auswirken wird.

Bauelementeausfälle, selbst diejenigen die normalerweise als zufällig betrachtet werden, ausgenommen Verschleiß und externe Ursachen, sind durch Herstellungsfehler oder falsche Anwendung verursacht. Diese zeigen ihre Auswirkungen im Betrieb.

Deshalb müssen Hersteller und Anwender geeignete vorbeugende Maßnahmen ergreifen:

- Qualifikation und Überwachung des Bauelemente-Herstellprozesses;
- Beschreibung und Qualifikation der Bauelemente;
- Abnahmeprüfungen;
- Anwendung guter Entwicklungsregeln (thermisch, elektrisch, mechanisch).

Diese Norm beschreibt keine Qualitätsniveaus, da sie keine Qualitätsniveaus berücksichtigt, die niedriger sind als die am besten erreichbaren, welche als Entwicklungsstandard festgelegt sind. Erfahrung von schlechter Qualität kann nicht zur Einführung von Modellen berücksichtigt werden, und Verzicht auf die Anwendung der Qualitätsgrundsätze basierend auf wirtschaftlichen Überlegungen können nicht gerechtfertigt werden, wenn die gesamten Bauelemente-/Geräte-Kosten entweder des Herstellers oder des Anwenders betrachtet werden.

Es gibt spezielle Anwendungen, die, wie Raumfahrt, Avionik und Unterseekabel, wo die Unmöglichkeit – oder zumindest die große Schwierigkeit – Instandhaltung durchzuführen, sowie aus Sicherheitsgründen, auf noch strengere Regeln drängen. Diese Fälle können nicht verallgemeinert werden und müssen unter Verwendung spezifischer Erfahrungen mit den Geräten und den eingeführten Maßnahmen (z. B. Screening, Einbrennen (en: Burn-in), spezielle Qualitätssicherungsprogramme) untersucht werden.

Folglich hat der Gerätehersteller Bauelementehersteller zu wählen, die die beste „Geschäftspraxis“ in Bezug auf Qualität haben, z. B. diejenigen, die ISO 9000 zertifiziert sind, statistische Prozesslenkung praktizieren und qualifiziert sind unter der „qualified manufacturing line“ Zulassung (oder dazu in der Lage sind).

Unter diesen Bedingungen gibt es keine Gründe mehr, Qualitätsfaktoren zu berücksichtigen und bei neuen Bauelementetechnologien wird die Frühausfallphase vernachlässigt, da hier nur qualifizierte und stabilisierte Produktionslinien betrachtet werden.

Verwendet ein Gerätehersteller eine neue Bauelementetechnologie und ist solch ein Hersteller nicht in der Lage, die Lebensdauer unter normalen Anwendungsbedingungen seines Gerätes zu rechtfertigen, dann hat der Gerätehersteller Prüfungen durchzuführen, die die Begründung für die Lebensdauer dieses Bauelementes an den Endverbraucher ermöglichen.

4.6 Zuverlässigkeitswachstum während der Bereitstellungsphase neuer Geräte

Die in dieser Norm dargelegten Modelle ermöglichen die Berechnung der Ausfallrate einer elektrischen Einheit, die sich bereits in einer ausgereiften Herstellphase befindet. Vorher kann jedoch eine neu entwickelte Einheit in der einen oder anderen Art einem Zuverlässigkeitswachstumsprozess unterzogen worden sein, der sich durch eine zunehmende Zuverlässigkeit während einer mehr oder weniger langen Phase widerspiegelt.

Zum Beispiel wird Zuverlässigkeitswachstum durch die Behebung von Fertigungsproblemen erreicht, wie z. B. die Rückkehr zu einem beherrschten Prozess oder die Modifikation eines Prozesses, um ihn zu verbessern. In Bezug auf Zuverlässigkeitswachstum im Feldbetrieb ist es die Modifikation der Einheit, ihre Entwicklung, Herstellung oder ihr Betrieb, die zu einer zuverlässigeren Einheit führt. Für eine umfassende Darstellung von in den Produktlebenszyklus integrierten Zuverlässigkeitsprozessen und Aktivitäten, die zum Produkt-Zuverlässigkeitswachstum beitragen oder unterstützen, wird auf IEC 61014 verwiesen.

Als ein erläuterndes Beispiel ist im Bild 1 die zeitabhängige Ausfallrate einer neu entwickelten elektronischen Leiterplatte, die im Feld nach Einführen von Verbesserungsmaßnahmen beobachtet wurde, dargestellt.

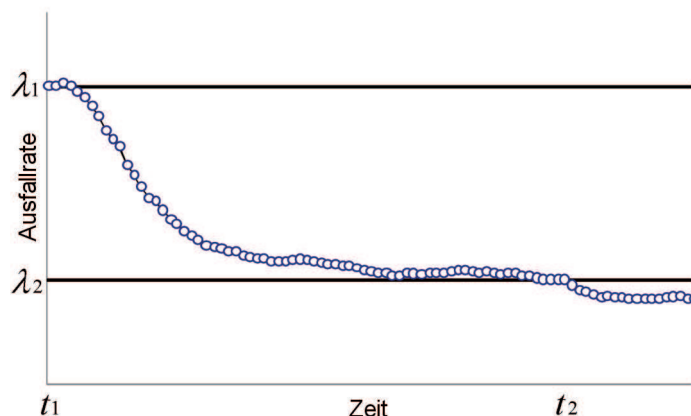


Bild 1 – Zeitabhängige Ausfallrate einer neuen elektronischen Leiterplatte

Ein Hersteller sollte die Zuverlässigkeitswachstumsphase nach eigener Erfahrung abstimmen. Es wurde experimentell bei vielen elektrischen Einheiten und mit mehreren Herstellern nachgewiesen, dass das Verhältnis zwischen der Ausfallrate während der Anfangsphase der Bereitstellung und der Ausfallrate in der Reifephase sehr unterschiedlich sein kann. Daher sollte eine Korrekturmaßnahme eingeleitet werden, sobald die beobachtete Ausfallrate während des Beginns der Bereitstellung einer elektrischen Einheit deutlich den geschätzten Wert überschreitet.

4.7 Anwendung dieser Norm

Diese Norm stellt eine Methode bereit, mit der Ausfallraten von einem Satz von Betriebsbedingungen zu einem anderen umgerechnet werden können. Dazu wird das Konzept von Ausfallraten bei Referenzbedingungen verwendet und Gleichungen zur Umrechnung in andere Bedingungen bereitgestellt. Referenzbedingungen sind die am häufigsten auftretenden Umweltbedingungen für den Anwender. Setzt zum Beispiel eine Organisation die meisten seiner Geräte bei 30 °C ein, dann sollte sie die Ausfallraten bei dieser Temperatur angeben und diese als Referenzbedingung festlegen. Der Grund, dass sie die typischen Betriebsbedingungen als Referenzbedingungen auswählen sollten, ist, dass keine Anpassungen aufgrund von Veränderungen der Umwelt gemacht werden müssen, wenn Felddaten erfasst werden, deren typische Bedingungen sehr wahrscheinlich diese Bedingungen sind. Denn jede Anpassung der Daten wird die Daten weniger zuverlässig machen, aufgrund der Veränderungen, die wahrscheinlich durch jede empirische Umrechnung eingeführt wird.

Hat eine Organisation keine typische Betriebsumgebung, dann sollte sie entscheiden, die Referenzbedingungen auf einem Niveau festzulegen, das für sie am geeignetsten ist, oder sie können die Referenzbedingungen, verwenden, die in dieser Norm in den Abschnitten 5 bis 20^{N3)} festgelegt sind. Werden in diesem Fall Felddaten gesammelt, dann könnten Anpassungen an den Daten notwendig sein, um sie alle auf einem Satz von Referenzbedingungen zu bringen, damit sie kombiniert und verglichen werden können.

Viele Organisationen werden nicht über eigene Zuverlässigkeitsdaten verfügen und werden deshalb andere Datenquellen verwenden. Diese Norm kann dann dazu verwendet werden, Ausfallraten von den in der Datenquelle verwendeten Umgebungsbedingungen zu den von der Organisation verwendeten Referenzbedingungen umzurechnen und dann wieder, wenn notwendig, auf die Betriebsumgebung für die jeweilige betrachtete Anwendung. Wenn zum Beispiel eine Organisation eine Vorhersage für ein Gerät bei einer Betriebstemperatur von 34 °C durchführen möchte und das verwendete Bauelement nicht in einer einzelnen Datenquelle mit einigen Daten aus dem MIL-HBK-217 und einigen aus dem IRPH 2003 enthalten ist, dann können die Basis-Ausfallraten, die bei speziellen und unterschiedlichen umgebungsbedingten Beanspruchungen in jeder Quelle angegeben sind, mit den Gleichungen in dieser Norm umgerechnet und kombiniert werden.

Die Gleichungen in dieser Norm wurden von empirischen Daten unter Anpassung von Felddaten abgeleitet und in einigen Fällen von Gleichungen, die in anderen Normen und Handbüchern verwendet werden. Dies bedeutet, dass die Gleichungen hier eine allgemeine Anpassung der Daten darstellen, wie es in einer internationalen Norm angemessen ist.

Bild 2 zeigt einen Vergleich zwischen der Temperaturabhängigkeit der π_T Werte von einer Reihe von Vorhersage-Handbüchern und dem π_T Wert in dieser Norm.

^{N3)} Nationale Fußnote: Abschnitt 5 bis 20 statt nur Abschnitt 5.

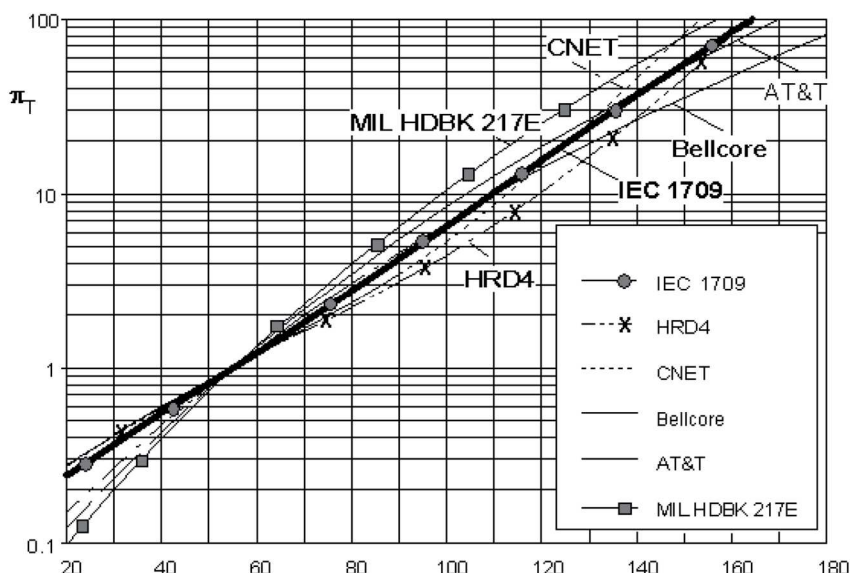


Bild 2 – Vergleich der Temperaturabhängigkeit für CMOS IS

Bild 2 zeigt, dass die Raffungsfaktoren in dieser Norm kompatibel sind mit vielen in vorhandenen Vorhersage-Handbüchern.

Um die Gleichungen in dieser Norm verwenden zu können, sind bestimmte Daten notwendig, die sich geringfügig nach Bauelementtyp unterscheiden, aber die wichtigste Angabe ist eine bei Referenzbedingungen angegebene Basis-Ausfallrate. Diese kann von Felddaten (siehe IEC 60300-3-3, IEC 60300-3-5), von Herstellerdaten oder von anderen Handbüchern (siehe Anhang H) gewonnen werden. Ist diese Ausfallrate nicht bei Referenzbedingungen angegeben, dann kann sie mit Hilfe der Gleichungen in dieser Norm auf die Referenzbedingungen umgerechnet werden. Dazu ist die Kenntnis über die Betriebsumgebung, für die die Ausfallrate angegeben ist, notwendig. Ist die Ausfallrate bei Referenzbedingungen angegeben, dann kann sie auf andere Betriebsbedingungen mit den in dieser Norm angegebenen Gleichungen umgerechnet werden.

5 Allgemeine Referenzbedingungen und Beanspruchungsmodelle

5.1 Empfohlene allgemeine Referenzbedingungen

Allgemeine Referenzbedingungen sind jene Werte von Umweltfaktoren, die von einer Organisation als typisch für die Art der Umgebung festgelegt sind, der das Gerät der Organisation während des normalen Betriebes unterworfen ist. Die Faktoren können alles sein, was die Organisation für wichtig hält und für alle Bauelementtypen gilt.

Diese Norm gibt notwendigerweise eine begrenztere Sicht und definiert die interessierenden Umgebungsfaktoren als elektrische Beanspruchung, Temperatur und Umgebungsbedingungen. Erweiterungen dazu werden von dieser Norm nicht unterstützt.

Tabelle 3 enthält einige Empfehlungen, die von einer Organisation verwendet werden können, es sei denn, diese sind für die normalen Einsatzbedingungen der Geräte dieser Organisation nicht zutreffend. Jede Organisation sollte Bedingungen wählen, die näher an den eigenen aktuellen Erfahrungen liegen, wenn diese von den in Tabelle 3 angegebenen abweichen.

Die gewählten Werte sind typisch für die Mehrzahl der Bauelemente-Betriebsbedingungen.

Tabelle 3 – Empfohlene Referenzbedingungen für umgebungsbedingte und mechanische Beanspruchung

Beanspruchungsart	Referenzbedingung ¹⁾
Umgebungstemperatur ²⁾	$\theta_0 = 40 \text{ °C}$
Umgebungsbedingung	Umgebung E1 (siehe Tabelle 1)
Sonderbeanspruchungen	In dieser Norm nicht angesprochen ³⁾
¹⁾ Die unter diesen Bedingungen angegebenen Ausfallraten gelten nur für Bauelemente, die nicht während des Transports bzw. der Lagerung beschädigt wurden. ²⁾ Im Sinne dieser Norm ist die Umgebungstemperatur die Temperatur des Mediums direkt am Bauelement während der Betriebszeit des Gerätes ohne Berücksichtigung einer möglichen Eigenerwärmung des Bauelementes. Die Umgebung des Bauelementes sollte festgelegt sein. ³⁾ Sonderbeanspruchungen schließen Wind, Regen und Schnee, Vereisung, Tropf-, Sprüh-, Spritz- oder Strahlwasser, Staub (chemisch wirksam oder nicht wirksam), Einwirkung von tierischen Schädlingen, aggressiven Gasen, radioaktive Strahlung usw. ein. Diese Beanspruchungen können in Bezug auf Ausfälle signifikant sein, nach allgemein guter Praxis sollten sie jedoch durch Entwicklungspraktiken berücksichtigt werden. Es kann Fälle geben, in denen ihr Einfluss durch anwendbare Modelle behandelt werden kann. Diese Beanspruchungen haben einen derart weiten Bereich von Einflüssen, dass es nicht angebracht wäre, sie in dieser Norm anzusprechen.	

5.2 Allgemeine Beanspruchungsmodelle

5.2.1 Allgemeines

Bauelemente werden nicht immer unter Referenzbedingungen betrieben. In solchen Fällen werden die Betriebsbedingungen zu Ausfallraten führen, die von denen unter Referenzbedingungen abweichen. Deshalb werden gegebenenfalls Modelle für Beanspruchungsfaktoren benötigt, mit denen die Ausfallraten unter Referenzbedingungen in Werte unter Betriebsbedingungen (tatsächliche Umgebungstemperatur und tatsächliche elektrische Beanspruchung der Bauelemente) und umgekehrt umgerechnet werden können. In den Abschnitten 6 bis 20 ^{N3)} sind spezifische Beanspruchungsmodelle und Werte für π -Faktoren für Bauelementegruppen angegeben, und sie sollten für die Umrechnung von Referenzausfallraten in Ausfallraten unter Feldeinsatzbedingungen verwendet werden. Sie sind ein Maß für die Veränderung der Ausfallrate aufgrund der Änderungen von Beanspruchung oder Bedingungen. Sind jedoch spezifischere Modelle für bestimmte Bauelementetypen anwendbar, dann sollten sie verwendet und ihre Anwendung begründet und dokumentiert werden.

Die Umrechnung der Ausfallraten ist nur innerhalb der festgelegten Grenzwerte der Bauelemente zulässig.

Die Bauelementeausfallrate unter Betriebsbedingungen berechnet sich zu:

$$\lambda = \lambda_{\text{ref}} \times \pi_U \times \pi_I \times \pi_T \times \pi_E \times \pi_S \times \pi_{ES} \quad (2)$$

Dabei ist

- λ_{ref} die Ausfallrate unter Referenzbedingungen;
- π_U der Faktor für Spannungsabhängigkeit;
- π_I der Faktor für Stromabhängigkeit;
- π_T der Faktor für Temperaturabhängigkeit;
- π_E der Faktor für die Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen;
- π_S der Faktor für die Abhängigkeit von der Schalthäufigkeit;
- π_{ES} der Faktor für die Abhängigkeit von der elektrischen Beanspruchung.

^{N3)} Nationale Fußnote: Abschnitte 6 bis 20 statt nur Abschnitt 6.

5.2.2 Beanspruchungsfaktor für Spannungsabhängigkeit, π_U

$$\pi_U = \exp \left\{ C_3 \left[\left(\frac{U_{op}}{U_{rat}} \right)^{C_2} - \left(\frac{U_{ref}}{U_{rat}} \right)^{C_2} \right] \right\} \quad (3)$$

Dabei ist

- U_{op} die Betriebsspannung in V;
- U_{ref} die Referenzspannung in V;
- U_{rat} die Bemessungsspannung in V;
- C_2, C_3 sind Konstanten.

Gleichung (3) ist ein empirisches Modell zur Beschreibung der Spannungsabhängigkeit von Ausfallraten und basiert auf vorhandene Bauelemente-Zuverlässigkeitshandbücher, vorhandene Zuverlässigkeitsdaten von Bauelementen und öffentlich zugänglichen Publikationen.

ANMERKUNG Wenn es für einige Bauelementetypen notwendig ist, absolute Spannungswerte zu verwenden, dann kann die Gleichung modifiziert werden zu $\pi_U = \exp \left\{ C_1 \left(U_{op}^{C_2} - U_{ref}^{C_2} \right) \right\}$ mit $C_1 = C_3 / U_{op}^{C_2}$

5.2.3 Beanspruchungsfaktor für Stromabhängigkeit, π_I

$$\pi_I = \exp \left\{ C_4 \left[\left(\frac{I_{op}}{I_{rat}} \right)^{C_5} - \left(\frac{I_{ref}}{I_{rat}} \right)^{C_5} \right] \right\} \quad (4)$$

Dabei ist

- I_{op} der Betriebsstrom in A;
- I_{ref} der Referenzstrom in A;
- I_{rat} der Bemessungsstrom in A;
- C_4, C_5 sind Konstanten.

Gleichung (4) ist ein empirisches Modell zur Beschreibung der Stromabhängigkeit von Ausfallraten und basiert auf vorhandene Bauelemente-Zuverlässigkeitshandbücher, vorhandene Zuverlässigkeitsdaten von Bauelementen und öffentlich zugänglichen Publikationen.

5.2.4 Beanspruchungsfaktor für Temperaturabhängigkeit, π_T

$$\pi_T = \exp \left[\frac{E_{a1}}{k_0} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{op}} \right) \right] \quad (5)$$

Gleichung (5) ist ein empirisches Modell basierend auf der Arrhenius-Gleichung, und sie beschreibt die Temperaturabhängigkeit von Ausfallraten. Idealerweise sollte diese Berechnung für jede Ausfallart durchgeführt werden, aber es ist allgemeine Praxis, die Berechnung unter Mittelung aller Aktivierungsenergien für alle Ausfallarten durchzuführen. Es sollte beachtet werden, dass im letzteren Fall die Aktivierungsenergie wegen der unterschiedlichen Aktivierungsenergien der zu Grunde liegenden Ausfallarten auch eine Funktion der Temperatur sein kann. Aber dieser Effekt wird im Allgemeinen nicht berücksichtigt.

In bestimmten Fällen ist es zweckmäßig, ein komplexeres Modell mit zwei Aktivierungsenergien zu verwenden, um die Temperaturabhängigkeit der Ausfallraten zu beschreiben. In solch einem Fall kann die folgende Gleichung (6) verwendet werden. Die Anwendung des Modells mit zwei Aktivierungsenergien (E_{a1}, E_{a2}) wird

als ausreichend angesehen, den Zusammenhang zwischen Temperatur und Ausfallrate zu modellieren. (Dies ist mitunter als „konkurrierende Risiken“ bekannt, siehe JESD-85 zu Details.)

Diese erweiterte Arrhenius-Gleichung ist standardisiert, um temperaturabhängige Aktivierungsenergien zu vermeiden, wenn die Referenztemperatur T_{ref} geändert wird.

$$\pi_T = \frac{A \cdot \exp(E_{a1} \cdot z) + (1 - A) \cdot \exp(E_{a2} \cdot z)}{A \cdot \exp(E_{a1} \cdot z_{\text{ref}}) + (1 - A) \cdot \exp(E_{a2} \cdot z_{\text{ref}})} \quad (6)$$

mit den Hilfsvariablen

$$z = \frac{1}{k_0} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\text{op}}} \right) \quad \text{und} \quad z_{\text{ref}} = \frac{1}{k_0} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \quad \text{in } (\text{eV})^{-1}$$

Dabei ist in den Gleichungen (5) und (6)

- A eine Konstante;
- E_{a1}, E_{a2} sind Aktivierungsenergien in eV;
- $k_0 = 8,616 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K};$
- $T_0 = 313 \text{ K};$
- $T_{\text{ref}} = (\theta_{\text{ref}} + 273) \text{ in K};$
- $T_{\text{op}} = (\theta_{\text{op}} + 273) \text{ in K}.$

Die oben verwendeten Temperaturen θ_{ref} und θ_{op} in Grad Celsius bedeuten

- für integrierte Schaltkreise:
 θ_{ref} : Ersatz-Sperrschichttemperatur unter Referenzbedingungen;
 θ_{op} : tatsächliche Ersatz-Sperrschichttemperatur;
- für diskrete Halbleiter und optoelektronische Bauelemente:
 θ_{ref} : Sperrschichttemperatur unter Referenzbedingungen;
 θ_{op} : tatsächliche Sperrschichttemperatur;
- für Kondensatoren:
 θ_{ref} : mittlere (*) Kondensatortemperatur unter Referenzbedingungen;
 θ_{op} : mittlere (*) tatsächliche Kondensatortemperatur;
- für Widerstände:
 θ_{ref} : mittlere (*) Temperatur des Widerstandselementes unter Referenzbedingungen (z. B., Schicht);
 θ_{op} : mittlere (*) tatsächliche Temperatur des Widerstandselementes;
- für Induktivitäten:
 θ_{ref} : mittlere (*) Wicklungstemperatur unter Referenzbedingungen;
 θ_{op} : mittlere (*) tatsächliche Wicklungstemperatur;
- für sonstige elektrische Bauelemente:
 θ_{ref} : mittlere (*) Referenz-Umgebungstemperatur;
 θ_{op} : mittlere (*) tatsächliche Umgebungstemperatur.

ANMERKUNG (*) „mittlere“ bedeutet in diesem Fall „über den gesamten Bauelementekörper“.

5.2.5 Beanspruchungsfaktor für Umgebungsbedingungen, π_E

Einige Datenhandbücher enthalten Anleitungen zur Umrechnung einer Ausfallratenschätzung von einer allgemeinen Umgebungsbedingung in eine andere. Das Konzept ist logisch, aber es beinhaltet einige Risiken. Deshalb konzentriert sich diese Norm mehr auf Situationen, bei denen die Basis-Ausfallraten bei Umgebungsbedingungen gesammelt werden, die ähnlich zu denen in der praktischen Anwendung der Bauelemente sind.

Der Einfluss der umgebungsbedingten Anwendungsbedingungen auf das Bauelement hängt wesentlich von der Auslegung des Gerätes ab; z. B. kann beim Einsatz des Gerätes auf Schiffen oder in der Kfz-Umgebung statt in geschützten Räumen (Laborbedingungen) der Einfluss durch die Umgebungsbedingungen minimiert und in einigen Fällen vollständig vermieden werden, wenn das Bauelement im Gerät in gewisser Weise geschützt ist. Natürlich wird dies einigen zusätzlichen Entwicklungsaufwand erfordern und wird sich deshalb nicht in allen Fällen lohnen. Ob und welche Umgebungseinflüsse vorkommen, hängt deshalb wesentlich vom Gerätehersteller ab und es ist die Aufgabe einer Organisation, für eine spezifische Umgebung zu entwickeln oder wenn der Einfluss dieser Beanspruchungen nicht vermieden werden kann, dann sind für diese Geräte spezifische Untersuchungen notwendig.

Kommen die einzig verfügbaren Ausfallratendatenbücher von einer Quelle mit sehr unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, dann ergibt sich die Notwendigkeit für einen Beanspruchungsfaktor für Umgebungsbedingungen. Die Verwendung eines solchen Beanspruchungsfaktors für Umgebungsbedingungen bedeutet anzunehmen, dass eine härtere Umgebung die Aktivierung interner Ausfallmechanismen in einer vorher-sagbaren mehr oder weniger linearen Weise verursacht. Es gibt Situationen, in denen diese Annahme falsch ist. Wenn ein Bauelement, das für stationäre Geräte entwickelt wurde, unter harten Schlag- und Vibrationsbedingungen verwendet wird – was alle Bauelemente in einigen Stunden zerstören kann –, dann könnte ein π_E -Faktor berechnet werden, aber dieser ist nicht sinnvoll. Die einzige Lösung ist, das Bauelement nicht in dieser Umgebung zu verwenden.

Der Beanspruchungsfaktor für Umgebungsbedingungen π_E sollte mit Vorsicht gehandhabt werden.

Tabelle 4 – Beanspruchungsfaktor für Umgebungsbedingungen, π_E

Stationäre Anwendung in wettergeschützten Einsatzorten	Stationäre Anwendung in teilweise wettergeschützten und nicht wettergeschützten Einsatzorten	Tragbare und ortsveränderliche Anwendung, Installation in Bodenfahrzeugen
E1	E2	E3
1	2	4

ANMERKUNG Ausfallratendatenbücher eines Bauelementeherstellers geben oft Hinweise, wie die Ausfallrate auf andere Betriebs- und Umgebungsbedingungen überführt werden kann.

5.2.6 Faktor für die Abhängigkeit von der Schalthäufigkeit, π_S

Dieser π – Faktor berücksichtigt die Anzahl der Schaltspiele S je Stunde und wird nur für Relais verwendet.

π_S ist nicht definiert für $S < 0,01$ (7)

ANMERKUNG Der Faktor π_S kann einen Wert bis zu 100 annehmen für hermetisch abgedichtete Öffnerkontakte, die normalerweise geschlossen sind, oder bei geringer Last für nicht abgedichtete Schließerkontakte, die normalerweise geöffnet sind.

$$\pi_S = 1 \quad \text{für } 0,01 < S \leq S_{\text{ref}} \quad (8)$$

$$\pi_S = S/S_{\text{ref}} \quad \text{für } S > S_{\text{ref}} \quad (9)$$

Dabei ist

S die Schaltspielanzahl je Stunde;
 S_{ref} die Referenz-Schaltspielanzahl je Stunde.

5.2.7 Faktor für die Abhängigkeit von der elektrischen Beanspruchung, π_{ES}

Dieser π -Faktor ist nur für bestimmte Bauteile anwendbar und wird im Detail in den entsprechenden Abschnitten erklärt.

5.2.8 Sonstige Einflussfaktoren

Andere Beanspruchungsfaktoren sind für einzelne Bauelementtypen in den Abschnitten 6 bis 20 angegeben, soweit die Abhängigkeit bekannt ist.

Derzeit können keine allgemein anwendbaren Umrechnungsmethoden für die Abhängigkeit der Ausfallrate von Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, mechanischer Beanspruchung usw. angegeben werden.

Beanspruchungsfaktoren müssen auf Hersteller/Anwender-Historie von ähnlichen Anwendungen oder auf entsprechenden Prüfungen beruhen.

Sofern die Abhängigkeit der Ausfallrate von diesen Beanspruchungen bekannt ist, sollte sie berücksichtigt werden.

Ist die Abhängigkeit der Ausfallrate von diesen Beanspruchungsarten nicht bekannt, aber als Funktion dieser Beanspruchungsarten zu erwarten, können angemessene Untersuchungen erforderlich sein.

6 Integrierte Halbleiter-Schaltkreise

6.1 Spezifische Referenzbedingungen

Die folgenden Empfehlungen für die Referenztemperaturen in Tabelle 5 bis Tabelle 9 basieren auf einer Bauelemente-Umgebungstemperatur von 40 °C und entsprechen der Mehrzahl der Bauelementeanwendungen in Geräten.

Die Referenz-Eigenerwärmung $\Delta T_{ref} = P_{ref} \cdot R_{th,amb}$ ist anzugeben, wenn Referenztemperaturen verwendet werden, die von den in den Tabellen angegebenen abweichen.

Für jeden integrierten Schaltkreis werden im Allgemeinen zwei Wärmewiderstände berücksichtigt, einer zwischen Sperrschicht und Gehäuse und der andere zwischen Gehäuse und Umgebung. Der oben angegebene Wärmewiderstand $R_{th,amb}$ sollte der sein, der für die betrachtete Anwendung am bedeutendsten ist.

Wird eine Ausfallrate für eine Umgebungstemperatur von 40 °C angegeben, dann sind die Referenzverlustleistung P_{ref} und der Wärmewiderstand $R_{th,amb}$ zur Umgebung, für welche der Wert gilt, mit anzugeben.

Tabelle 5 – Speicher

Bauelement		θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Bipolar	RAM, FIFO statisch	75	–
	PROM	75	
MOS, CMOS, BICMOS	RAM dynamisch	55	
	RAM, FIFO statisch langsam (≥ 30 ns) statistisch schnell (< 30 ns)	55	
	ROM Maske	55	
	EPROM, OTPROM UV löschbar	55	
	FLASH	55	
	EEPROM, EAROM	55	

Tabelle 6 – Mikroprozessoren und Peripherie, Mikrokontroller und Signalprozessoren

Bauelement		θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Bipolar		70	–
NMOS	Anzahl der Transistoren ≤ 50 k	70	
	Anzahl der Transistoren > 50 k	90	
CMOS	Anzahl der Transistoren ≤ 5 k	50	
	Anzahl der Transistoren > 5 k bis 50 k	60	
	Anzahl der Transistoren > 50 k bis 500 k	80	
	Anzahl der Transistoren > 500 k	90	
BICMOS		75	

Tabelle 7 – Digitale Familien- und Bus-Interface-Schaltkreise, Bustreiber- und Empfängerschaltungen

Bauelement		θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Bipolar	TTL, -LS, -A(L)S, -F	45	–
	Bus-Interface	55	
	TTL S	80	
	ECL	65	
	10(LV)E(L) / 100(LV)E(I)(P)	75	
CMOS	HCMOS, CMOS B, AC MOS (FCT, HC, A(U), C, LVX), (LVC, LCX, LV) (VCX, ALVC, AVC, AHC, VHC)	45	$U_{\text{ref}} = 5\text{ V}$
	Logik		
	Analogschalter, Bus-Interface		
	Bus-Interface	50	
BICMOS	Bustreiber / Receiver RS422, RS423, RS485, CAN etc. RS232, RS644/899, CML etc.	55	–
	Logik	45	
	Bus-Interface	50	
	ABT, BCT	50	
	LVT, ALVT	50	
	GTL(p)	50	
	BTL, ETL	95	
	Bustreiber / Receiver	55	

Tabelle 8 – Analoge integrierte Schaltkreise (IC)

Bauelement		θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Operationsverstärker, Komparatoren und Spannungsüberwachung	Bipolar, BIFET	55	$U_{\text{ref}}/U_{\text{rat}} = 0,7$
	CMOS	45	
Referenzelemente	alle Technologien	45	—
Schaltregler	alle Technologien	55	
Leistungsverstärker und Regler (alle Technologien)	$\leq 1\text{ W}$	70	
	$> 1\text{ W}$	90	
Hochfrequenz IC (> 100 MHz)			
HF-Modulator, Demodulator PLL, VCO	bipolar	65	
	CMOS, BICMOS	45	
Transmitter, Receiver	bipolar	70	
	CMOS, BICMOS	45	
Leistungsverstärker / Receiver	GaAs	80	

Tabelle 9 – Anwendungsspezifische integrierte Schaltkreise (ASICs)

Bauelement			θ_{ref} (°C)	Anmerkung
ASICs, Full Custom, Gate Arrays, Telecom ICs, A/D-Konverter				—
Bipolar	TTL		55	
	ECL		70	
	HV (> 50 V)		80	
NMOS			55	
CMOS, BICMOS	digital, analog / gemischt	Anzahl der Transistoren ≤ 50 k	55	
		Anzahl der Transistoren > 50 k bis 50 M	70	
		Anzahl der Transistoren > 50 M	80	
	HV (> 50 V)		75	
Programmierbare ASICs (PLD) nicht löschbar				
Bipolar	TTL		80	
	ECL		85	
CMOS	(anti-fuses)		80	
Programmierbare ASICs (PLD) löschbar				
NMOS, CMOS	RAM basis		80	
	EPROM basis	Anzahl der Transistoren ≤ 5 k	70	
	EEPROM basis	Anzahl der Transistoren > 5 k	80	
	Flash-EPROM		80	

6.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle

Die spezifischen Beanspruchungsmodelle sind für die Umrechnung der Ausfallraten zwischen unterschiedlichen Bedingungen angegeben. Diese Beanspruchungsmodelle enthalten Konstanten, die Mittelwerte für die einzelnen Bauelementtypen von verschiedenen Herstellern sind (festgelegt aufgrund von Feldeinsatzprüfung und Laborprüfungen).

$$\lambda = \lambda_{\text{ref}} \cdot \pi_U \cdot \pi_T \quad \text{für digitale CMOS und bipolare analoge integrierte Schaltkreise;} \quad (10)^{\text{N4)}}$$

$$\lambda = \lambda_{\text{ref}} \cdot \pi_T \quad \text{für alle sonstigen integrierten Schaltkreise.} \quad (11)$$

Die Beanspruchungsfaktoren für Spannungs- und Temperaturabhängigkeit sind in 6.2.1 und 6.2.2 angegeben.

6.2.1 Spannungsabhängigkeit, Faktor π_U

Die Spannungsabhängigkeit wird nur für digitale CMOS und bipolare analoge integrierte Schaltkreise nach Gleichung (3) berücksichtigt. Es werden die in Tabelle 10 angegebenen Konstanten C_1 , C_2 und C_3 angewendet, sofern dafür keine anderen Werte angegeben sind. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 und Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 10 – Konstanten für Spannungsabhängigkeit

Integrierter Schaltkreis	$U_{\text{ref}}/U_{\text{rat}}$	U_{ref}	C_1	C_2	C_3
Digitale CMOS-Familie	–	5 V	$0,1 \text{ V}^{-1}$	1	–
Analog	0,7	–	–	4,4	1,4

^{N4)} Nationale Fußnote: Formelnummern ab hier geändert, damit fortlaufende Nummerierung erfolgt.

Tabelle 11 – Faktor π_U für digitale integrierte CMOS-Schaltkreise

$U_{op} (V)$	≤ 3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Faktor π_U	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7

Tabelle 12 – Faktor π_U für bipolare analoge integrierte Schaltkreise

U_{op}/U_{rat}	$\leq 0,3$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Faktor π_U	0,75	0,77	0,80	0,87	1,0	1,3	1,8	3,0

6.2.2 Temperaturabhängigkeit, Faktor π_T

Der nach Gleichung (6) angegebene Zusammenhang gilt nur bis Bemessungssperrschichttemperatur. Dabei werden die in Tabelle 13 angegebenen Konstanten A , E_{a1} und E_{a2} angewendet, sofern keine anderen Werte dafür angegeben sind. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 13 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit

	A	E_{a1} (eV)	E_{a2} (eV)
Integrierte Schaltkreise (ohne EPROM, OTPROM, EEPROM, EAROM)	0,9	0,3	0,7
EPROM, OTPROM, EEPROM, EAROM	0,3	0,3	0,6

Der Faktor π_T folgt aus Tabelle 14 und Tabelle 15

- als eine Funktion der tatsächlichen Ersatz-Sperrschichttemperatur

$$\theta_{op} = \theta_{amb} + P_{op} \cdot R_{th,amb} \quad \text{in } ^\circ\text{C} \quad (12)$$

- und als eine Funktion der Ersatz-Sperrschichttemperatur unter Referenzbedingungen (siehe 6.1)

$$\theta_{ref} = 40 + \Delta T_{ref} \quad \text{in } ^\circ\text{C}, \quad (13)$$

wobei ΔT_{ref} gemessen oder berechnet wird mit $\Delta T_{ref} = P_{ref} \cdot R_{th,amb}$.

Tabelle 14 – Faktor π_T für integrierte Schaltkreise (ohne EPROM, FLASH-EPROM, OTPROM, EEPROM, EAROM)

θ_{ref} (°C) (siehe 6.1)	Faktor π_{T} für θ_{op} (°C)																					
	≤ 25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110	120	130	140	150	175
40	0,54	0,67	0,82	1	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	4,1	5,1	6,3	7,7	9,6	12	18	28	44	67	102	275
45	0,44	0,54	0,67	0,82	1	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,4	4,1	5,1	6,3	7,8	9,7	15	23	36	55	83	225
50	0,36	0,45	0,55	0,67	0,82	1	1,2	1,5	1,8	2,2	2,8	3,4	4,2	5,2	6,4	8	12	19	29	45	68	184
55	0,3	0,37	0,45	0,55	0,67	0,82	1	1,2	1,5	1,8	2,3	2,8	3,4	4,2	5,3	6,5	10	16	24	37	56	150
60	0,24	0,3	0,37	0,45	0,55	0,67	0,82	1	1,2	1,5	1,8	2,3	2,8	3,5	4,3	5,3	8,2	13	20	30	46	123
65	0,2	0,24	0,3	0,37	0,45	0,55	0,67	0,82	1	1,2	1,5	1,9	2,3	2,8	3,5	4,4	6,7	10	16	24	37	100
70	0,16	0,2	0,24	0,3	0,37	0,45	0,54	0,67	0,82	1	1,2	1,5	1,9	2,3	2,9	3,6	5,5	8,5	13	20	30	82
75	0,13	0,16	0,2	0,24	0,3	0,36	0,44	0,54	0,66	0,81	1	1,2	1,5	1,9	2,3	2,9	4,5	6,9	11	16	25	67
80	0,11	0,13	0,16	0,2	0,24	0,29	0,36	0,44	0,54	0,66	0,81	1	1,2	1,5	1,9	2,3	3,6	5,69	8,6	13	20	54
85	0,087	0,11	0,13	0,16	0,2	0,24	0,29	0,36	0,44	0,54	0,66	0,81	1	1,2	1,5	1,9	2,9	4,5	7	11	16	44
90	0,07	0,086	0,11	0,13	0,16	0,19	0,24	0,29	0,35	0,43	0,53	0,66	0,81	1	1,2	1,5	2,4	3,7	5,6	8,7	13	36
95	0,057	0,07	0,085	0,1	0,13	0,16	0,19	0,23	0,29	0,35	0,43	0,53	0,65	0,81	1	1,2	1,9	3	4,6	7	11	29
100	0,046	0,056	0,069	0,084	0,1	0,13	0,15	0,19	0,23	0,28	0,35	0,43	0,53	0,65	0,81	1	1,5	2,4	3,7	5,6	8,5	23

Tabelle 15 – Faktor π_T für EPROM, FLASH-EPROM, OTPROM, EEPROM, EAROM

θ_{ref} (°C)	Faktor π_{T} für θ_{op} (°C)																					
(siehe 6.1)	≤ 25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110	120	130	140	150	175
55	0,16	0,22	0,3	0,41	0,55	0,75	1	1,3	1,8	2,3	3,1	4,0	5,2	6,7	8,6	11	18	28	43	65	96	238

7 Diskrete Halbleiter

7.1 Referenzbedingungen

Die folgenden Empfehlungen für die Referenztemperaturen in Tabelle 16 bis 19 basieren auf einer Bauelemente-Umgebungstemperatur von 40 °C und entsprechen der Mehrzahl der Bauelementeanwendungen in Geräten.

Die Referenz-Eigenerwärmung $\Delta T_{\text{ref}} = P_{\text{ref}} \cdot R_{\text{th,amb}}$ ist anzugeben, wenn andere Referenztemperaturen als die in den Tabellen angegebenen verwendet werden. Wird eine Ausfallrate für eine Umgebungstemperatur von 40 °C angegeben, dann sind die Referenzverlustleistung P_{ref} und der Wärmewiderstand $R_{\text{th,amb}}$ zur Umgebung, für welche der Wert gilt, mit anzugeben.

Für diskrete Halbleiter werden im Allgemeinen zwei Wärmewiderstände berücksichtigt, einer zwischen Sperrschicht und Gehäuse und der andere zwischen Gehäuse und Umgebung. Der oben angegebene Wärmewiderstand $R_{\text{th,amb}}$ sollte der sein, der für die betrachtete Anwendung am bedeutendsten ist.

Tabelle 16 – Transistoren allgemein, niederfrequent

Bauelement		θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Bipolar, universal	z. B. TO18, TO92, SOT(D)(3)23 oder ähnliche	55	$U_{\text{ref}}/U_{\text{rat}} = 0,5$
Transistor Arrays		55	
Bipolar, Kleinleistung	z. B. TO5, TO39, SOT223, SO8, SMA-SMC	85	
Bipolar, Leistung	z. B. TO3, TO220, D(D)-Pack	100	
FET	Sperrschicht	55	
	MOS	55	
MOS Leistung (SIPMOS)		100	

Tabelle 17 – Mikrowellen-Transistoren, z. B. RF > 800 MHz

Bauelement		θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Bipolar	Breitband, Kleinsignal	55	$U_{\text{ref}}/U_{\text{rat}} = 0,5$
	Leistung	125	
GaAs FET	Kleinsignal, rauscharm	95	
	mittlere Leistung	110	
	Hochleistung	145	
MOSFET	Breitband, Kleinsignal	55	
	Leistung	125	

Tabelle 18 – Dioden

Bauelement	θ_{ref} (°C)	Anmerkung	
Universal-Diode (auch mit Avalanche-Charakter)	55	—	
Schottky-Diode	55		
Begrenzungsdiode (Suppressordiode)	40		
Z-Diode, ($P_{\text{tot}} < 1 \text{ W}$) Spannungsschutz ¹⁾	40		
Z-Diode, Leistung Stabilisation ²⁾	100		
Referenzdiode	45		
Mikrowellen-Diode, Kleinsignal	Detektordiode		45
	Kapazitätsdiode		45
	Mischerdiode		70
	Pindiode		55
Mikrowellen-Diode, Leistung	Speichervaraktor		100
	Gunndiode		160
	Impattdiode		180
	Pindiode		100
Hochspannungsgleichrichterdiode	85		

¹⁾ Bei der Anwendung für Spannungsschutz kann ohne Eigenerwärmung gerechnet werden ($\theta_{\text{ref}} = 40 \text{ °C}$).

²⁾ Bei der Anwendung für Stabilisation muss die Eigenerwärmung berücksichtigt werden.

Tabelle 19 – Leistungshalbleiter

Bauelement	θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Gleichrichterdioden (auch mit Avalanche-Charakter)	70	—
Gleichrichterbrücken	85	
Schottky-Dioden	85	
Thyristoren	85	
TRIACs, DIACs	85	
Sondergefertigte und kundenspezifische Leistungshalbleiter	Rücksprache mit Hersteller	

7.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle

Die spezifischen Beanspruchungsmodelle sind für die Umrechnung der Ausfallraten zwischen unterschiedlichen Bedingungen angegeben. Diese Umrechnungsmodelle enthalten Konstanten, die Mittelwerte für die einzelnen Bauelementtypen von verschiedenen Herstellern sind (festgelegt aufgrund von Feldeinsatzprüfung und Laborprüfungen).

Die Ausfallrate unter Betriebsbedingungen nach Gleichung (2) ist:

$$\lambda = \lambda_{\text{ref}} \cdot \pi_U \cdot \pi_T \quad \text{für Transistoren;} \quad (14)$$

$$\lambda = \lambda_{\text{ref}} \cdot \pi_T \quad \text{für Dioden}^{1)} \text{ und Leistungshalbleiter}^{2)}. \quad (15)$$

Die Beanspruchungsfaktoren für Spannungs- und Temperaturabhängigkeit sind in 7.2.1 und 7.2.2 angegeben. Strom kann auch ein wesentlicher Faktor sein.

¹⁾ Universal-, Schottky-, Begrenzer- und Zener-Dioden.

²⁾ Gleichrichterdioden, Brückendioden, Thyristoren, TRIACs und DIACs.

7.2.1 Spannungsabhängigkeit für Transistoren, Faktor π_U

Die Spannungsabhängigkeit wird nur für Transistoren nach Gleichung (3) berücksichtigt. Es werden die in Tabelle 20 angegebenen Konstanten A , C_2 und C_3 angewendet, sofern keine anderen Werte dafür angegeben sind. Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 20 – Konstanten für Spannungsabhängigkeit der Transistoren

$U_{\text{ref}}/U_{\text{rat}}$	C_2	C_3
0,5	8,0	1,4

Tabelle 21 – Faktor π_U für Transistoren

$U_{\text{op}}/U_{\text{rat}}$	$\leq 0,6$	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
Faktor π_U	1	1,04	1,08	1,14	1,26	1,46	1,82	2,52	4

7.2.2 Temperaturabhängigkeit, Faktor π_T

Der nach Gleichung (6) angegebene Zusammenhang gilt nur bis zur Bemessungssperrschichttemperatur. Dabei werden die in Tabelle 22 angegebenen Konstanten A , E_{a1} und E_{a2} angewendet, sofern keine anderen Werte dafür angegeben sind. Die Ergebnisse sind in Tabelle 23 und Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 22 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit der diskreten Halbleiter

Bauelement	A	E_{a1} (eV)	E_{a2} (eV)
Transistoren, Referenz- und Mikrowellendioden	0,9	0,3	0,7
Dioden (ohne Referenz- und Mikrowellendioden) Leistungshalbleiter ¹⁾	1,0	0,4	–
¹⁾ Gleichrichterioden, -brücken, Schottkydioden, Thyristoren, TRIACs und DIACs.			

Der Faktor π_T folgt aus Tabelle 23 und Tabelle 24

- als eine Funktion der tatsächlichen Sperrschichttemperatur

$$\theta_{\text{op}} = \theta_{\text{amb}} + P_{\text{op}} \cdot R_{\text{th,amb}} \quad \text{in } ^\circ\text{C} \quad (16)$$

- und als eine Funktion der Sperrschichttemperatur unter Referenzbedingungen (siehe 7.1)

$$\theta_{\text{ref}} = 40 + \Delta T_{\text{ref}} \quad \text{in } ^\circ\text{C}, \quad (17)$$

wobei ΔT_{ref} gemessen oder berechnet wird mit $\Delta T_{\text{ref}} = P_{\text{ref}} \cdot R_{\text{th,amb}}$.

Tabelle 23 – Faktor π_T für Transistoren, Referenz- und Mikrowellendioden

θ_{ref} (°C) (siehe 7.1)	Faktor π_{T} für θ_{op} (°C)																											
	≤ 25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110	120	125	130	140	145	150	160	175	180	200	
40	0,54	0,67	0,82	1	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	4,1	5,1	6,3	7,7	9,6	12	18	28	35	44	67	83	102	153	275	332	689	
45	0,44	0,54	0,67	0,82	1	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,4	4,1	5,1	6,3	7,8	9,7	15	23	29	36	55	68	83	125	225	272	563	
55	0,3	0,37	0,45	0,55	0,67	0,82	1	1,2	1,5	1,8	2,3	2,8	3,4	4,2	5,3	6,5	10	16	19	24	37	45	56	84	150	182	377	
70	0,16	0,2	0,24	0,3	0,37	0,45	0,54	0,67	0,82	1	1,2	1,5	1,9	2,3	2,9	3,6	5,5	8,5	11	13	20	25	30	46	82	99	206	
85	0,087	0,11	0,13	0,16	0,2	0,24	0,29	0,36	0,44	0,54	0,66	0,81	1	1,2	1,5	1,9	2,9	4,5	5,6	7	11	13	16	24	44	53	110	
95	0,057	0,07	0,085	0,10	0,13	0,16	0,19	0,23	0,29	0,35	0,43	0,53	0,65	0,81	1	1,2	1,9	3	3,7	4,6	7	8,6	11	16	29	35	72	
100	0,046	0,056	0,069	0,084	0,1	0,13	0,15	0,19	0,23	0,28	0,35	0,43	0,53	0,65	0,81	1	1,5	2,4	3,0	3,7	5,6	6,9	8,5	13	23	28	58	
110	0,03	0,036	0,045	0,055	0,067	0,081	0,099	0,12	0,15	0,18	0,22	0,28	0,34	0,42	0,52	0,65	1	1,5	1,9	2,4	3,6	4,5	5,6	8,3	15	18	38	
125	0,015	0,019	0,023	0,028	0,035	0,043	0,052	0,063	0,078	0,095	0,12	0,14	0,18	0,22	0,27	0,34	0,52	0,81	1	1,2	1,9	2,3	2,9	4,3	7,8	9,4	20	
145	0,006 6	0,008 1	0,009 9	0,012	0,015	0,018	0,022	0,027	0,033	0,041	0,05	0,061	0,076	0,094	0,12	0,14	0,22	0,34	0,43	0,53	0,81	1	1,2	1,85	3,3	4,0	8,3	
160	0,003 5	0,005 4	0,004 4	0,006 6	0,008 0	0,009 8	0,012	0,015	0,018	0,022	0,027	0,033	0,041	0,051	0,063	0,074	0,12	0,19	0,24	0,3	0,44	0,54	0,67	1	1,87	2,2	4,6	
180	0,001 6	0,002 0	0,002 5	0,003 0	0,003 7	0,004 5	0,005 5	0,006 7	0,008 2	0,01	0,012	0,015	0,019	0,023	0,029	0,036	0,055	0,085	0,11	0,13	0,2	0,25	0,31	0,46	0,83	1	2,1	

Tabelle 24 – Faktor π_T für Dioden (ohne Referenz- und Mikrowellendioden) und Leistungshalbleiter

θ_{ref} (°C) (siehe 7.1)	Faktor π_{T} für θ_{op} (°C)																											
	≤ 25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110	120	125	130	140	145	150	160	175	180	200	
40	0,47	0,61	0,79	1	1,3	1,6	2	2,4	3	3,7	4,4	5,4	6,5	7,7	9,2	11	15	20	24	27	36	41	47	61	87	98	151	
55	0,24	0,31	0,4	0,51	0,64	0,80	1	1,2	1,5	1,9	2,3	2,7	3,3	3,9	4,7	5,5	7,6	10	12	14	18	21	24	31	44	50	77	
70	0,13	0,17	0,21	0,27	0,35	0,43	0,54	0,67	0,82	1	1,2	1,5	1,8	2,1	2,5	3,0	4,1	5,6	6,5	7,5	9,9	11,3	13	17	24	27	41	
85	0,074	0,095	0,12	0,16	0,2	0,25	0,31	0,38	0,46	0,57	0,69	0,83	1	1,2	1,4	1,7	2,3	3,2	3,7	4,3	5,6	6,4	7,3	9,5	14	15	23	
100	0,044	0,056	0,072	0,092	0,12	0,15	0,18	0,22	0,28	0,34	0,41	0,49	0,59	0,71	0,84	1	1,4	1,9	2,2	2,5	3,3	3,8	4,4	5,6	8,0	9,0	14	

8 Optoelektronische Bauelemente

8.1 Spezifische Referenzbedingungen

Die folgenden Empfehlungen für die Referenztemperaturen in Tabelle 25 bis Tabelle 29 basieren auf einer Bauelemente-Umgebungstemperatur von 40 °C und entsprechen der Mehrzahl der Bauelementeanwendungen in Geräten.

Die Referenz-Eigenerwärmung $\Delta T_{\text{ref}} = P_{\text{ref}} \cdot R_{\text{th,amb}}$ ist anzugeben, wenn Referenztemperaturen verwendet werden, die von denen in den Tabellen angegebenen abweichen.

Wird eine Ausfallrate für eine Umgebungstemperatur von 40 °C angegeben, dann sind die Referenzverlustleistung P_{ref} und der Wärmewiderstand $R_{\text{th,amb}}$ zur Umgebung, für welche der Wert gilt, mit anzugeben.

Für optoelektronische Bauelemente werden im Allgemeinen zwei Wärmewiderstände berücksichtigt, einer zwischen Sperrschicht und Gehäuse und der andere zwischen Gehäuse und Umgebung. Der oben angegebene Wärmewiderstand $R_{\text{th,amb}}$ sollte derjenige sein, der für die betrachtete Anwendung am bedeutendsten ist.

Tabelle 25 – optoelektronische Halbleiter-Signalempfänger

Bauelement	Referenz-Sperrschichttemperatur θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Phototransistor Plastik und hermetisch gekapselt	45	$U_{\text{ref}}/U_{\text{rat}} = 0,5$
Photodiode (Si und Si PIN, InP, InP APD, Ge, Ge APD)	45	–
Photoelement	45	
Detektormodul	40	
Solarbauelement	40	

Tabelle 26 – Leuchtdioden (LED, IRED), Laserdioden und optische Sende-Bauelemente

Bauelement	Referenz-Sperrschichttemperatur θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Leuchtdiode sichtbares Licht (radial und SMT, Leistungsgehäuse (> 100 mA DC))	45	$I_{\text{ref}}/I_{\text{rat}} = 0,5$
LED, IRED ((Al)GaAs, InP)	75	–
Laserdiode (GaAs 880 nm, InP 1 300 nm, InP 1 500 nm)	75	
Laser-Array, Pump-Laser / Pump-Laser gekühlt (GaAs 980 nm, InP 1 480 nm)	45	
Laser-Sendemodul	Rücksprache mit Hersteller	
Displays (LED)	55	
Displays (LCD, Vakuumfluoreszenz)	Rücksprache mit Hersteller	
Optische Verstärker (SOA)	45	
Glasfiber (EDFA)	Rücksprache mit Hersteller	
Modulatoren (InP, LiNbO ₃)	40	

Tabelle 27 – Optokoppler und Lichtschranken

Bauelement		Referenz-Sperrschicht- temperatur θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Optokoppler	mit bipolarem Ausgang	55	—
	mit FET-Ausgang	65	
	mit nachgeschalteter Elektronik	55	
	mit nachgeschalteter Leistungselektronik	65	
Lichtschranke	mit Dioden-/Transistorausgang	55	
	mit nachgeschalteter Elektronik	55	

Tabelle 28 – Passive optoelektronische Bauelemente

Bauelement		Referenz-Sperrschicht- temperatur θ_{ref} (°C)	Anmerkung
LWL-Steckverbinder (n-fach)		40	—
LWL-Anschlussfaser (LWL-Faser und ein Stecker)		40	
LW-Leitung		40	Keine Temperatur- abhängigkeit zu berücksichtigen
DCF-Faser (Dispersion compensating fibre)		40	
Isolatoren		40	
Zirkulatoren		40	
Optische Multiplexer, Demultiplexer (Dünnschicht, arrayed-waveguide grating (AWG))		40	
Optische Attenuatoren (Festwert, elektromechanisch)		40	
Schalter (elektromagnetisch, MEMS)		40	
Koppler, Splitter, Filter (Dünnschicht, Bragg)		40	

Tabelle 29 – Transceiver, Transponder und optische Subsysteme

Bauelement	Referenz-Sperrschicht-temperatur θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Transceiver, Transponder	40	—
SFF, SFP	Rücksprache mit Hersteller	
Xponder / Long Haul tunable		
Optische Spektrumanalysatoren (OPA, komplex / OSA, komplex)		
Aktive Dispersionskompensatoren		
Wellenlängenselektiver Schalter (Wavelength selective switch)		
Wellenlängenblocker (Wavelength blocker)		
Ground trip current (GTC) Interrupter (elektro-mechanisch)	40	Keine Temperatur-abhängigkeit zu berücksichtigen

8.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle

Die spezifischen Beanspruchungsmodelle sind für die Umrechnung der Ausfallraten zwischen unterschiedlichen Bedingungen angegeben. Diese Umrechnungsmodelle enthalten Konstanten. Sie sind Mittelwerte für die einzelnen Bauelementetypen von verschiedenen Herstellern (festgesetzt aufgrund von Feldeinsatzprüfung und Laborprüfungen).

Die Ausfallrate unter Betriebsbedingungen nach Gleichung (2) ist:

$$\lambda = \lambda_{\text{ref}} \cdot \pi_U \cdot \pi_T \quad \text{für Phototransistoren;} \quad (18)$$

$$\lambda = \lambda_{\text{ref}} \cdot \pi_T \quad \text{für sonstige optische Halbleiter-Signalempfänger, Optokoppler und Lichtschranken, LWL-Steckverbinder und LWL-Anschlussfasern, Transceiver, Transponder;} \quad (19)$$

$$\lambda = \lambda_{\text{ref}} \cdot \pi_I \cdot \pi_T \quad \text{für Licht-emittierende Halbleiter (LEDs) und Infrarot-emittierende Dioden (IREDS);} \quad (20)$$

$$\lambda = \lambda_{\text{ref}} \quad \text{für sonstige optische Bauelemente.} \quad (21)$$

Die Beanspruchungsfaktoren für Spannungs-, Strom- und Temperaturabhängigkeit sind in 8.2.1 bis 8.2.3 angegeben.

8.2.1 Spannungsabhängigkeit, Faktor π_U

Die Spannungsabhängigkeit wird nur für Phototransistoren nach Gleichung (3) berücksichtigt. Es werden die in Tabelle 30 angegebenen Konstanten C_2 und C_3 angewendet, sofern keine anderen Werte dafür angegeben sind. Die Ergebnisse sind in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 30 – Konstanten für Spannungsabhängigkeit der Phototransistoren

$\frac{U_{\text{ref}}}{U_{\text{rat}}}$	C_2	C_3
0,5	8,0	1,4

Tabelle 31 – Faktor π_U für Phototransistoren

$\frac{U_{\text{op}}}{U_{\text{rat}}}$	$\leq 0,6$	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
Faktor π_U	1	1,04	1,08	1,14	1,26	1,46	1,82	2,52	4

8.2.2 Stromabhängigkeit, Faktor π_I

Die Stromabhängigkeit wird nur für LEDs und IREDS nach Gleichung (4) berücksichtigt. Es werden die in Tabelle 32 angegebenen Konstanten C_4 und C_5 angewendet, sofern keine anderen Werte dafür angegeben sind. Die Ergebnisse sind in Tabelle 33 dargestellt.

Tabelle 32 – Konstanten für Stromabhängigkeit der LEDs und IREDS

$\frac{I_{\text{ref}}}{I_{\text{rat}}}$	C_4	C_5
0,5	1,4	8,0

Tabelle 33 – Faktor π_I für LEDs und IREDS

$\frac{I_{\text{op}}}{I_{\text{rat}}}$	$\leq 0,6$	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
Faktor π_I	1	1,04	1,08	1,14	1,26	1,46	1,82	2,52	4

8.2.3 Temperaturabhängigkeit, Faktor π_T

Der nach Gleichung (5) angegebene Zusammenhang gilt nur bis zur Bemessungssperrschichttemperatur. Es werden die in Tabelle 34 angegebenen Werte für die Konstante E_{a1} angewendet, sofern keine anderen Werte dafür angegeben sind. Die Ergebnisse sind in Tabelle 35 dargestellt.

Tabelle 34 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit der optoelektronischen Bauelemente

Bauelement		E_{a1} (eV)
Optischer Halbleiter-Signalempfänger	Si	0,3
	InP	0,7
	Ge	0,6
Leuchtdioden (LED)		0,65
Infrarotdioden (IRED)	(Al)GaAs	0,65
	InP	1,0
Halbleiter-Laser	GaAs	0,6
	InP	0,8
Optokoppler und Lichtschranken		0,5
LWL-Steckverbinder; LWL-Anschlussfaser		0,3
Transceiver, Transponder		0,4

Der Faktor π_T folgt aus Tabelle 35

- als eine Funktion der tatsächlichen Sperrschichttemperatur

$$\theta_{op} = \theta_{amb} + P_{op} \cdot R_{th,amb} \quad \text{in } ^\circ\text{C} \quad (22)$$

- und als eine Funktion der Sperrschichttemperatur unter Referenzbedingungen (siehe 8.1)

$$\theta_{ref} = 40 + \Delta T_{ref} \quad \text{in } ^\circ\text{C}, \quad (23)$$

wobei ΔT_{ref} gemessen oder berechnet wird mit $\Delta T_{ref} = P_{ref} \cdot R_{th,amb}$.

Tabelle 35 – Faktor π_T für optoelektronische Bauelemente

Optischer Halbleiter-Signalempfänger																	
	θ_{ref} (°C)	Faktor π_T für θ_{op} (°C)															
		≤ 25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Si	40	0,57	0,69	0,83	1	1,2	1,4	1,7	2	2,3	2,6	3,1	3,5	4	4,6	5,3	6
	45	0,48	0,58	0,7	0,84	1	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,6	3	3,4	3,9	4,4	5
InP	40	0,27	0,42	0,66	1	1,5	2,2	3,3	4,8	6,8	9,7	14	19	26	36	48	65
	45	0,18	0,28	0,44	0,66	1	1,5	2,2	3,2	4,5	6,4	9	13	17	24	32	43
Ge	40	0,33	0,48	0,7	1	1,4	2	2,8	3,8	5,2	7	9,4	12	16	21	28	36
	45	0,23	0,34	0,49	0,7	1	1,4	1,9	2,7	3,7	4,9	6,6	8,8	12	15	20	25
Leuchtdiode (sichtbares Licht (LED) und Infrarot (IRED))																	
	θ_{ref} (°C)	Faktor π_T für θ_{op} (°C)															
		≤ 25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
(Al)GaAs	45	0,20	0,31	0,46	0,68	1	1,4	2,1	2,9	4,1	5,6	7,7	11	14	19	25	33
	55	0,099	0,15	0,22	0,33	0,49	0,7	1	1,4	2	2,7	3,7	5,1	6,9	9,2	12	16
	75	0,026	0,04	0,06	0,088	0,13	0,19	0,27	0,38	0,53	0,73	1	1,4	1,8	2,4	3,2	4,3
InP	75	0,004	0,007	0,013	0,024	0,043	0,076	0,13	0,22	0,37	0,62	1	1,6	2,5	4	6,1	9,3
Halbleiterlaser																	
	θ_{ref} (°C)	Faktor π_T für θ_{op} (°C)															
		≤ 25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
GaAs	75	0,035	0,051	0,074	0,11	0,15	0,21	0,3	0,41	0,55	0,75	1	1,3	1,7	2,3	3	3,8
InP	75	0,035	0,051	0,074	0,11	0,15	0,21	0,3	0,41	0,55	0,75	1	1,3	1,7	2,3	3	3,8
Optokoppler und Lichtschranke																	
	θ_{ref} (°C)	Faktor π_T für θ_{op} (°C)															
		≤ 25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	55	0,17	0,23	0,32	0,43	0,57	0,76	1	1,3	1,7	2,2	2,8	3,5	4,4	5,5	6,8	8,5
	65	0,1	0,14	0,19	0,25	0,34	0,45	0,59	0,77	1	1,3	1,6	2,07	2,6	3,3	4,05	5,01
LWL-Steckverbinder; LWL-Anschlussfaser; Modulator; Wavelength selective switch; Wavelength-Blocker																	
	θ_{ref} (°C)	Faktor π_T für θ_{op} (°C)															
		≤ 25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	40	0,57	0,69	0,83	1	1,2	1,4	1,7	2	2,3	2,6	3,1	3,5	4	4,6	5,3	6
Transceiver, Transponder																	
	θ_{ref} (°C)	Faktor π_T für θ_{op} (°C)															
		≤ 25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	40	0,47	0,61	0,79	1	1,3	1,6	2	2,4	3	3,7	4,4	5,4	6,5	7,7	9,2	11

9 Kondensatoren

9.1 Spezifische Referenzbedingungen

Die Empfehlungen für die Referenztemperaturen in Tabelle 36 basieren auf einer Bauelemente-Umgebungstemperatur von 40 °C und entsprechen der Mehrzahl der Bauelementeanwendungen in Geräten.

Tabelle 36 – Kondensatoren

Kondensatortyp	Referenz-Kondensator-temperatur θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Metallfolie Polystyrol, Polypropylen, Polycarbonat, Polyethylenterephthalat	40	50 % der Bemessungsspannung bei 40 °C $U_{\text{ref}} / U_{\text{rat}} = 0,5$
Metallisierter Film Polypropylen, Polycarbonat, Polyethylenterephthalat, Acetyl-Cellulose		
Metall-Papier (Film)		
Glimmer		
Glas		
Acetyl-Cellulose		
Keramik		
Kondensatoren, aufgebracht auf Hybridschaltungen (deposited)		
Tantal-Elektrolyt – flüssiger Elektrolyt – fester Elektrolyt		
Aluminium-Elektrolyt – flüssiger Elektrolyt – fester und Polymer Elektrolyt	40	80 % der Bemessungsspannung bei 40 °C $U_{\text{ref}} / U_{\text{rat}} = 0,8$
Veränderbare Kondensatoren	40	—

9.2 Spezifisches Beanspruchungsmodell

Die Ausfallrate unter Betriebsbedingungen nach Gleichung (2) ist:

$$\lambda = \lambda_{\text{ref}} \cdot \pi_U \cdot \pi_T^{1)} \quad (24)$$

Die Beanspruchungsfaktoren für Spannungs- und Temperaturabhängigkeit sind in 9.2.1 und 9.2.2 angegeben.

9.2.1 Spannungsabhängigkeit, Faktor π_U

Die Spannungsabhängigkeit wird nur für Festwert-Kondensatoren nach Gleichung (2) berücksichtigt.

Für veränderbare Kondensatoren gilt $\pi_U = 1$.

Es werden die in Tabelle 37 angegebenen Konstanten C_2 und C_3 angewendet, sofern keine anderen Werte dafür angegeben sind. Die Ergebnisse sind in Tabelle 38 dargestellt.

¹⁾ Aluminiumelektrolytische Bauelemente mit flüssigem Elektrolyt sind elektrochemische Bauelemente mit einem besonders breiten Technologiebereich. Deswegen sind die angegebenen Konstanten und Faktoren nur Schätzungen für die Werte. Spezifischere Werte können in den einschlägigen Bauelementespezifikationen angegeben sein oder können zwischen Anwender und Hersteller vereinbart werden.

Tabelle 37 – Konstanten für Spannungsabhängigkeit der Kondensatoren

Kondensatortyp	$\frac{U_{ref}}{U_{rat}}$	C_2	C_3
Papier, Metallpapier Metallisierter Polypropylenfilm Metallisierter Polyäthylenterephthalatfilm Metallisierter Celluloseacetatfilm	0,5	1,07	3,45
Polycarbonatfilm-Metallfolie Metallisierter Polycarbonatfilm	0,5	1,50	4,56
Polystyrolfilm Polyäthylenterephthalatfilm-Metallfolie Polypropylenfilm-Metallfolie	0,5	1,29	4,0
Glas	0,5	1,11	4,33
Glimmer	0,5	1,12	2,98
Keramik	0,5	1,0	4,0
Kondensatoren, aufgebracht auf Hybridschaltungen (deposited)	0,5	1,0	4,0
Aluminium-Elektrolyt, flüssiger Elektrolyt	0,8	1,0	1,36
Aluminium-Elektrolyt, fester Elektrolyt	0,8	1,9	3,0
Tantal-Elektrolyt, flüssiger Elektrolyt	0,5	1,0	1,05
Tantal-Elektrolyt, fester Elektrolyt	0,5	1,04	9,8

Tabelle 38 – Faktor π_U für Kondensatoren

Kondensatortyp	Faktor π_U für U_{op}/U_{rat}									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Papier, Metallpapier, Metallisierter Polypropylenfilm Metallisierter Polyäthylenterephthalatfilm Metallisierter Celluloseacetatfilm	0,26	0,36	0,50	0,71	1	1,40	2,0	2,9	4,2	6,1
Polycarbonatfilm-Metallfolie Metallisierter Polycarbonatfilm	0,23	0,30	0,42	0,63	1	1,7	2,9	5,2	9,8	19
Polystyrolfilm Polyäthylenterephthalatfilm-Metallfolie Polypropylenfilm-Metallfolie	0,24	0,32	0,45	0,66	1	1,5	2,4	3,9	6,4	11
Glas	0,19	0,28	0,42	0,64	1	1,6	2,5	4,0	6,3	10
Glimmer	0,32	0,42	0,55	0,74	1	1,4	1,9	2,6	3,6	5
Keramik	0,20	0,30	0,45	0,67	1	1,5	2,2	3,3	5,0	7,4
Kondensatoren, aufgebracht auf Hybridschaltungen (deposited)	0,20	0,30	0,45	0,67	1	1,5	2,2	3,3	5,0	7,4
Aluminium-Elektrolyt, flüssiger Elektrolyt	0,39	0,44	0,51	0,58	0,67	0,76	0,87	1,0	1,2	1,3
Aluminium-Elektrolyt, fester Elektrolyt	0,15	0,16	0,19	0,24	0,31	0,44	0,64	1,0	1,6	2,8
Tantal-Elektrolyt, flüssiger Elektrolyt	0,66	0,73	0,81	0,90	1	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7
Tantal-Elektrolyt, fester Elektrolyt	0,021	0,054	0,14	0,37	1,0	2,7	7,4	20	56	154

9.2.2 Temperaturabhängigkeit, Faktor π_T

Der nach Gleichung (6) angegebene Zusammenhang gilt nur bis zur maximal zulässigen Bauelementetemperatur. Es werden die in Tabelle 39 angegebenen Konstanten A , E_{a1} und E_{a2} angewendet, sofern keine anderen Werte dafür angegeben sind. Die Ergebnisse sind in Tabelle 40 dargestellt.

Tabelle 39 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit der Kondensatoren

Kondensatortyp	A	E_{a1} (eV)	E_{a2} (eV)
Papier Metallpapier Metallisierter Polypropylenfilm Metallisierter Polyäthylenterephthalatfilm Metallisierter Celluloseacetatfilm	0,999	0,5	1,59
Polyäthylenterephthalatfilm-Metallfolie Polypropylen-Metallfolie Polystyrolfilm-Metallfolie Metallisierter Papierfilm			
Polycarbonatfilm-Metallfolie Metallisierter Polycarbonatfilm	0,998	0,57	1,63
Glas, Glimmer	0,86	0,27	0,84
Keramik	1,0	0,35	–
Kondensatoren, aufgebracht auf Hybrid-schaltungen (deposited)	1,0	0,35	–
Aluminium-Elektrolyt, flüssiger Elektrolyt	0,87	0,5	0,95
Aluminium-Elektrolyt, fester Elektrolyt	0,40	0,14	0
Tantal-Elektrolyt, flüssiger Elektrolyt	0,35	0,54	0
Tantal-Elektrolyt, fester Elektrolyt	0,961	0,27	1,1
Veränderliche Kondensatoren	1,0	0,15	–

- Der Faktor π_T folgt aus Tabelle 40 als eine Funktion der tatsächlichen Kondensatortemperatur

$$\theta_{op} = \theta_{amb} + \Delta T \quad \text{in } ^\circ\text{C}, \quad (25)$$

wobei ΔT die Temperaturänderung aufgrund der Betriebsbedingungen ist;

- und als eine Funktion der Kondensatortemperatur unter Referenzbedingungen (siehe Tabelle 36)

$$\theta_{ref} = 40 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (26)$$

Tabelle 40 – Faktor π_T für Kondensatoren

Kondensatortyp	Kondensator- temperatur unter Referenz- bedingungen θ_{ref} (°C)	Faktor π_T für θ_{op} (°C) ¹⁾													
		≤ 20	30	40	50	60	70	80	85	90	100	105	110	120	125
Papier Metallpapier Metallisierter Polypropylenfilm Metallisierter Polyäthylenterephthalatfilm Metallisierter Celluloseacetatfilm Polyäthylenterephthalatfilm- Metallfolie Polypropylenfilm-Metallfolie Polystyrolfilm-Metallfolie Metallisierter Papierfilm	40														
Polycarbonatfilm-Metallfolie Metallisierter Polycarbonatfilm	40	0,24	0,50	1,0	1,9	3,6	6,7	13	18	27	63	100	170	510	900
Glas, Glimmer	40	0,45	0,67	1,0	1,5	2,5	4,2	7,5	10	–	–	–	–	–	–
Keramik Kondensatoren, aufgebracht auf Hybridschaltungen (deposited) ^{N5)}	40	0,41	0,65	1,0	1,5	2,2	3,1	4,4	5,1	6	8,1	9,3	11	14	16
Aluminium-Elektrolyt, flüssiger Elektrolyt	40	0,26	0,51	1,0	1,9	3,7	7,2	14	20	28	55	77	110	210	290
Aluminium-Elektrolyt, fester Elektrolyt	40	0,88	0,94	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,6	1,8	1,8
Tantal-Elektrolyt, flüssiger Elektrolyt	40	0,74	0,83	1,0	1,3	1,8	2,7	4	5	–	–	–	–	–	–
Tantal-Elektrolyt, fester Elektrolyt	40	0,49	0,7	1,0	1,45	2,2	3,7	7	10	15	32	49	73	170	250
Veränderliche Kondensatoren	40	0,68	0,83	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	2	2,2	2,5	2,6	2,8	3,1	3,3

¹⁾ Der angegebene Zusammenhang gilt nur bis zur Bemessungs-Kondensatortemperatur.

10 Widerstände und Widerstandsnetzwerke

10.1 Spezifische Referenzbedingungen

Die Empfehlungen für die Referenz-Widerstandselementtemperaturen in Tabelle 41 basieren auf einer Bauelemente-Umgebungstemperatur von 40 °C und entsprechen der Mehrzahl der Bauelementeanwendungen in Geräten. Die Referenz-Eigenerwärmung ΔT_{ref} ist anzugeben, wenn andere Referenztemperaturen verwendet werden.

^{N5)} Nationale Fußnote: Fehlenden Kondensatortyp eingefügt, da er in Tabelle 39 angegeben ist.

Tabelle 41 – Widerstände und Widerstandsnetzwerke

Bauelement	Referenztemperatur des Widerstands- elementes θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Kohleschicht	55	50 % der Bemessungsleistung bei 40 °C $P_{\text{ref}} / P_{\text{rat}} = 0,5$
Metallschicht	55	
Dünnschichtwiderstände, aufgebracht auf Hybridschaltungen (deposited)	55	
Dickschichtwiderstände, aufgebracht auf Hybridschaltungen (deposited)	55	
Netzwerke (Filmschaltungen) pro Widerstandselement	55	
Metalloxidschicht	85	
Draht	85	
Veränderbare	55	

10.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle

Die Ausfallrate unter Betriebsbedingungen nach Gleichung (2) ist:

$$\lambda = \lambda_{\text{ref}} \cdot \pi_T \quad (27)$$

Die Beanspruchungsfaktoren für die Temperaturabhängigkeit sind in 10.2.1 angegeben.

10.2.1 Temperaturabhängigkeit, Faktor π_T

Der nach Gleichung (6) angegebene Zusammenhang gilt nur bis zur maximal zulässigen Temperatur des Widerstandselementes. Es werden die in Tabelle 42 angegebenen Konstanten A , E_{a1} und E_{a2} angewendet, sofern keine anderen Werte dafür angegeben sind. Die Ergebnisse sind in Tabelle 43 dargestellt.

Tabelle 42 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit der Widerstände

A	E_{a1} (eV)	E_{a2} (eV)
0,873	0,16	0,44

Der Faktor π_T folgt aus Tabelle 43

- als eine Funktion der tatsächlichen Temperatur des Widerstandselementes

$$\theta_{\text{op}} = \theta_{\text{amb}} + \Delta T \quad \text{in } ^\circ\text{C}, \quad (28)$$

wobei $\Delta T = P_{\text{op}} \cdot R_{\text{th,amb}} = (\theta_{\text{max}} - 40) \cdot (P_{\text{op}} / P_{\text{rat}})$ in Grad Celsius die Temperaturänderung aufgrund der Betriebsbedingungen ist (mit θ_{max} als Bemessungstemperatur des Widerstandselementes),

- und als eine Funktion der mittleren Temperatur des Widerstandselementes unter Referenzbedingungen (siehe Tabelle 41)

$$\theta_{\text{ref}} = 40 + \Delta T_{\text{ref}} \quad \text{in } ^\circ\text{C}. \quad (29)$$

Tabelle 43 – Faktor π_T für Widerstände

Bauelement	θ_{ref} (°C) (siehe 10.1)	Faktor π_T für θ_{op} (°C)											
		≤ 25	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	125
Widerstände	55	0,49	0,56	0,71	0,89	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	3,6	4,6	5,1
	85	0,25	0,28	0,35	0,45	0,56	0,71	0,89	1,1	1,4	1,8	2,3	2,6

11 Induktivitäten, Transformatoren und Spulen

11.1 Referenzbedingungen

Die Empfehlungen für die Referenztemperaturen in Tabelle 44 basieren auf einer Bauelemente-Umgebungstemperatur von 40 °C und entsprechen der Mehrzahl der Bauelementeanwendungen in Geräten. Die Referenz-Eigenerwärmung ΔT_{ref} ist anzugeben, wenn andere Referenztemperaturen verwendet werden.

Tabelle 44 – Induktivitäten, Transformatoren und Spulen

Bauelement	Mittlere Referenz-Windungs-temperatur θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Induktivitäten für EMV-Anwendungen $\leq 3\text{ A}$	60	50 % der Bemessungsleistung bei 40 °C $P_{\text{ref}} / P_{\text{rat}} = 0,5$
$> 3\text{ A}$	85	
NF-Drosseln und Übertrager $\leq 25\text{ kHz}$	55	
HF-Drosseln und Übertrager $> 25\text{ kHz}$	55	
Netztransformatoren und Übertrager für Schaltnetzteile	85	

11.2 Spezifisches Beanspruchungsmodell

Die Ausfallrate unter Betriebsbedingungen nach Gleichung (2) ist:

$$\lambda = \lambda_{\text{ref}} \cdot \pi_{\text{T}} \quad (30)$$

Die Beanspruchungsfaktoren für die Temperaturabhängigkeit sind in 11.2.1 angegeben.

11.2.1 Temperaturabhängigkeit, Faktor π_{T}

Der nach Gleichung (6) angegebene Zusammenhang gilt nur bis zur maximal zulässigen Windungstemperatur. Es werden die in Tabelle 45 angegebenen Konstanten A , E_{a1} und E_{a2} angewendet, sofern keine anderen Werte dafür angegeben sind. Die Ergebnisse sind in Tabelle 46 dargestellt.

Tabelle 45 – Konstanten für Temperaturabhängigkeit der Induktivitäten, Transformatoren und Spulen

A	E_{a1} (eV)	E_{a2} (eV)
0,996	0,06	1,13

Der Faktor π_{T} folgt aus Tabelle 46

- als eine Funktion der tatsächlichen mittleren Windungstemperatur

$$\theta_{\text{op}} = \theta_{\text{amb}} + \Delta T \quad \text{in } ^\circ\text{C}, \quad (31)$$

wobei ΔT die Temperaturänderung aufgrund der Betriebsbedingungen ist,

- und als eine Funktion der mittleren Wicklungstemperatur unter Referenzbedingungen (siehe Tabelle 44)

$$\theta_{\text{ref}} = 40 + \Delta T_{\text{ref}} \quad \text{in } ^\circ\text{C}, \quad (32)$$

wobei ΔT_{ref} gemessen oder berechnet wird mit $0,5 \cdot P_{\text{rat}}$.

Tabelle 46 – Faktor π_T für Induktivitäten, Transformatoren und Spulen

Baelement	θ_{ref} (°C) (siehe 11.1)	Faktor π_T für θ_{op} (°C)											
		≤ 25	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	125
Induktivitäten, Transformatoren und Spulen	55	0,79	0,82	0,89	0,96	1,1	1,2	1,5	2,3	4,3	8,8	19	29
	60	0,75	0,78	0,84	0,91	1	1,1	1,5	2,2	4	8,4	18	27
	85	0,43	0,44	0,48	0,52	0,57	0,66	0,83	1,3	2,3	4,8	10	15

12 Mikrowellenbauelemente

12.1 Spezifische Referenzbedingungen

Die Referenzbedingungen sind in Tabelle 47 angegeben.

Tabelle 47 – Mikrowellenbauelemente

Baelement	Referenz-Baelemente-temperatur θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Mikrowellenelemente	40	Temperatur und elektrische Beanspruchung haben keinen Einfluss auf die Ausfallraten.
Hohlleiter		
Mikrowellencharge (en: load)		
Festes Dämpfungsglied		
Veränderliches Dämpfungsglied		
Feste Elemente		
Richtungskoppler		
Feste Stichleitungen (en: fixed stubs)		
Mikrowellenkammern (en: cavities)		
Veränderliche Elemente		
Abgestimmte Stichleitungen (en: tuned stubs)	40	
Abgestimmte Mikrowellenkammern (en: tuned cavities)		
Ferritbauelement (en: transmitter)		
Ferritbauelement (en: receiver)		
RF/Mikrowellen Passives		
Filter		
Isolator		
Zirkulator		
Splitter/Kombinator (en: splitter/combiner)		
Synthesizer		

12.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle

Derzeit sind keine Modelle basierend auf Erfahrungswerten für die Anwendung von Temperatur und elektrischen Beanspruchungen bekannt.

13 Sonstige passive Bauelemente

13.1 Referenzbedingungen

Die Referenzbedingungen sind in Tabelle 48 angegeben.

Tabelle 48 – Sonstige passive Bauelemente

Bauelement	Referenz-Bauelemente-temperatur θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Varistoren	40	Temperatur und elektrische Beanspruchung haben keinen Einfluss auf die Ausfallraten.
PTC-Thermistoren, NTC-Thermistoren		
Überspannungsableiter (en: surge arresters)		
Keramische Resonatoren (en: ceramic resonators)		
Filter		
Oberflächenwellenfilter (en: surface wave filter (SAW)), Oberflächenwellenoszillatoren (SAW-Oszillatoren), spannungsgeregelte Oszillatoren (VCO)		
Piezoelektrische Bauelemente (Wandler und Sensoren)		
Kristalle		
Kristalloszillatoren: XO (clock), VCXO (spannungsgeregelt), TCXO (temperaturkompensiert), OCXO (temperaturstabilisiert)		
Durchführungskondensatoren, -filter		
Sicherungen		

13.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle

Derzeit sind keine Modelle basierend auf Erfahrungswerten für die Anwendung von Temperatur und elektrischen Beanspruchungen bekannt.

14 Elektrische Verbindungsstellen

14.1 Referenzbedingungen

Die Referenzbedingungen sind in Tabelle 49 angegeben.

Tabelle 49 – Elektrische Verbindungen

Bauelement	Leiterquerschnitt (mm ²)	θ_{ref} (°C)	Anmerkung
Löten (manuell, maschinell)	–	40	50 % des Bemessungsstromes für den angeschlossenen Leiterquerschnitt $I_{\text{ref}} / I_{\text{rat}} = 0,5$
Drahtanschlüsse für Hybridschaltungen (Al, Au)	–		
Draht-Wickeln	0,05 bis 0,5		
Crimpen (manuell, maschinell)	0,05 bis 300		
Klammern (Termi-Point)	0,1 bis 0,5		
Einpressen	0,3 bis 2		
Schneid-Klemmen	0,05 bis 1		
Schrauben	0,5 bis 16		
Klemmen (Federkraft)	0,5 bis 16		

14.2 Spezifische Beanspruchungsmodelle

Derzeit sind keine Modelle basierend auf Erfahrungswerten für die Anwendung von Temperatur und elektrische Beanspruchungen bekannt.