

DIN EN 62506

ICS 29.020

**Verfahren für beschleunigte Produktprüfungen
(IEC 62506:2013);
Deutsche Fassung EN 62506:2013**

Methods for product accelerated testing
(IEC 62506:2013);
German version EN 62506:2013

Méthodes d'essais accélérés de produits
(CEI 62506:2013);
Version allemande EN 62506:2013

Gesamtumfang 91 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn für die von CENELEC am 2013-06-21 angenommene Europäische Norm als DIN-Norm ist 2014-03-01.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN IEC 62506:2010-02.

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.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 56 „Dependability“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem Datum (stability date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu dieser Publikation angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, 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.

Verfahren für beschleunigte Produktprüfungen
(IEC 62506:2013)

Methods for product accelerated testing
(IEC 62506:2013)

Méthodes d'essais accélérés de produits
(CEI 62506:2013)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2013-06-21 angenommen. CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC Management Centre oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem CEN-CENELEC Management Centre mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, der ehemaligen jugoslawischen Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

© 2013 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. EN 62506:2013 D

Vorwort

Der Text des Dokuments 56/1503/FDIS, zukünftige 1. Ausgabe der IEC 62506, erarbeitet vom IEC/TC 56 „Dependability“, wurde zur parallelen IEC-CENELEC-Abstimmung vorgelegt und von CENELEC als EN 62506:2013 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem dieses Dokument auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2014-03-21
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die diesem Dokument entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2016-06-21

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CENELEC [und/oder CEN] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 62506:2013 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

In der offiziellen Fassung sind unter „Literaturhinweise“ zu den aufgelisteten Normen die nachstehenden Anmerkungen einzutragen:

IEC 60812 ANMERKUNG Harmonisiert als EN 60812:2006.

IEC 61125:1992 ANMERKUNG Harmonisiert als EN 61125:1993 (nicht modifiziert).

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe, Formelzeichen und Abkürzungen	7
3.1 Begriffe	7
3.2 Formelzeichen und Abkürzungen	9
4 Allgemeine Beschreibung der beschleunigten Prüfverfahren	10
4.1 Modell der kumulativen Schädigung	10
4.2 Klassifizierung, Verfahren und Typen beschleunigter Prüfungen	12
5 Beschleunigte Prüfmodelle	15
5.1 Typ A, beschleunigte Prüfungen qualitativer Art	15
5.2 Typen B und C – Verfahren beschleunigter Prüfungen quantitativer Art	21
5.3 Ausfallmechanismen und Gestaltung der Prüfung	25
5.4 Bestimmung von Belastungsniveaus, Profilen und Kombinationen für Betrieb und Prüfung – Belastungsmodellierung	26
5.5 Methodik der multiplen Belastungsbeschleunigung – Typ B-Prüfungen	27
5.6 Einfache und multiple Belastungsbeschleunigung bei Typ B-Prüfungen	29
5.7 Beschleunigung quantitativer Zuverlässigkeitsprüfungen	39
5.8 Beschleunigte Zuverlässigkeits-Konformitätsprüfungen	47
5.9 Beschleunigte Zuverlässigkeitswachstumsprüfung	49
5.10 Leitlinien für beschleunigte Prüfung	49
6 Strategie der beschleunigten Prüfung in der Produktentwicklung	50
6.1 Stichprobenplan für beschleunigte Prüfung	50
6.2 Allgemeines zu Prüfbelastungen und Dauern	51
6.3 Bauelemente auf multiple Belastungen prüfen	52
6.4 Beschleunigte Prüfung von Baugruppen	52
6.5 Beschleunigte Prüfung von Systemen	52
6.6 Analyse der Prüfergebnisse	52
7 Einschränkungen der Methodologie beschleunigter Prüfungen	53
Anhang A (informativ) Stark erhöhte Grenzlastprüfung (HALT-Prüfung)	54
Anhang B (informativ) Gestaltung einer beschleunigten Zuverlässigkeits-Konformitätsprüfung und einer Zuverlässigkeitswachstumsprüfung	58
Anhang C (informativ) Vergleich zwischen einer HALT-Prüfung und einer konventionellen beschleunigten Prüfung	73
Anhang D (informativ) Schätzung der Aktivierungsenergie E_a	74
Anhang E (informativ) Kalibrierte beschleunigte Lebensdauerprüfung (CALT)	76
Anhang F (informativ) Beispiel für die Schätzung empirischer Faktoren	78
Anhang G (informativ) Bestimmung von Beschleunigungsfaktoren durch Prüfung bis zum Ausfall	83

	Seite
Literaturhinweise.....	87
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	89
Bilder	
Bild 1 – Funktionen der Wahrscheinlichkeitsdichte (PDF) für kumulative Schädigung, Verschlechterung und Prüfungsarten.....	11
Bild 2 – Beziehung von PDFs der Beanspruchbarkeit gegenüber der Last eines Produkts im Betrieb.....	16
Bild 3 – Auswirkung der Unsicherheit von Last und Beanspruchbarkeit auf die Prüfstrategie.....	17
Bild 4 – PDFs der Betriebsgrenzen und Zerstörungsgrenzen als Funktion der angelegten Belastung.....	18
Bild 5 – Eingezeichnete Gerade für das Arrhenius-Reaktionsmodell.....	33
Bild 6 – Diagramm zur Bestimmung der Aktivierungsenergie	34
Bild 7 – Multiplikator der Prüfbelastungsdauer zum Nachweis der geforderten Zuverlässigkeit für die Prüfungen zur Übereinstimmung und zum Zuverlässigkeitswachstum	44
Bild 8 – Multiplikator der Dauer der Belastungsanwendung für die erwünschte Zuverlässigkeit.....	45
Bild B.1 – Zuverlässigkeit als Funktion von Multiplikator k und für Kombinationen der Parameter a und b	60
Bild B.2 – Bestimmung des Multiplikators k	63
Bild B.3 – Bestimmung der Wachstumsrate	72
Bild D.1 – Diagramm der Ausfälle zur Schätzung der Aktivierungsenergie E_a	75
Bild F.1 – Graphische Datenanalyse nach Weibull	79
Bild F.2 – Längenparameter als Funktion des Temperaturbereichs	81
Bild F.3 – Ausfallwahrscheinlichkeit als Funktion der Anzahl von Zyklen $\Delta T = 50\text{ °C}$	82
Bild G.1 – Weibull-Diagramm der drei Datensätze.....	85
Bild G.2 – Werte von Längenparametern, eingefügt mit einer Leistungslinie	86
Tabellen	
Tabelle 1 – Arten von Prüfungen, abgebildet auf den Zyklus der Produktentwicklung	12
Tabelle A.1 – Zusammenfassung der Ergebnisse einer HALT-Prüfung für einen Gleichspannungswandler	55
Tabelle A.2 – Zusammenfassung der Ergebnisse einer HALT-Prüfung für ein medizinisches System	56
Tabelle A.3 – Zusammenfassung der Ergebnisse einer HALT-Prüfung für ein Gerät der Unterhaltungselektronik (Hi-Fi).....	57
Tabelle B.1 – Umweltbelastungsbedingungen eines elektronischen Gerätes in Fahrzeugen	62
Tabelle B.2 – Einsatzparameter des Produkts	66
Tabelle B.3 – Angenommenes Einsatzprofil des Gerätes.....	70
Tabelle B.4 – Arbeitsblatt zur Bestimmung der Einsatzdauern bis zum Ausfall.....	71
Tabelle B.5 – Daten für ein Zuverlässigkeitswachstumsdiagramm.....	72
Tabelle C.1 – Vergleich zwischen einer HALT-Prüfung und einer konventionellen beschleunigten Prüfung	73
Tabelle F.1 – Ausfallwahrscheinlichkeit bei Prüfmustern A und B	79
Tabelle F.2 – Datenübertragung für Weibull-Diagramm.....	79
Tabelle G.1 –Ausfalldaten der Spannungsprüfung für die Weibull-Verteilung	83

Einleitung

Für die Prüfung der Zuverlässigkeit oder für die Untersuchung von Ausfällen wurden viele Prüfverfahren entwickelt, und die meisten sind aktuell in Gebrauch. Diese Verfahren dienen entweder der Bestimmung der Produktzuverlässigkeit oder der Ermittlung potenzieller Produktausfallarten, und sie werden als effektiv erachtet für den Nachweis der Zuverlässigkeit von:

- festgelegter Prüfdauer;
- sequentieller Wahrscheinlichkeitsquote;
- Zuverlässigkeitswachstumsprüfungen;
- Prüfungen bis zum Ausfall usw.

Diese Prüfungen sind zwar sehr nützlich, aber auch sehr langwierig, insbesondere, wenn die nachzuweisende Produktzuverlässigkeit hoch ist. Die Tendenz hin zu kurzen Perioden von der Entwicklung bis zur Markteinführung als auch hin zu dem Wettbewerb standhaltenden Produktkosten ergibt sehr strenge Anforderungen an sowohl wirtschaftliche als auch wirksam beschleunigte Prüfungen. Deshalb werden die Produktprüfungen verkürzt, entweder durch die Verwendung erhöhter Belastungsniveaus oder durch eine häufigere Anwendung sich wiederholender Belastungen, wodurch eine schnellere Beurteilung und ein Wachstum der Produktzuverlässigkeit aufgrund des Erkennens und der Abmilderung von Produktausfallarten ermöglicht werden.

Es gibt zwei deutlich unterschiedliche Vorgehensweisen für Maßnahmen zur Produktzuverlässigkeit:

- Durch die erste Vorgehensweise wird mittels Analyse und Prüfung verifiziert, dass das Produkt keine Ausfallarten enthält, die möglicherweise während der erwarteten Lebensdauer des Produktes bei den erwarteten Betriebsbedingungen aktiviert werden könnten;
- durch die zweite Vorgehensweise wird geschätzt, wie viele Ausfälle nach einer bestimmten Betriebsdauer bei den erwarteten Betriebsbedingungen zu erwarten sind.

Für beide Fälle sind beschleunigte Prüfverfahren geeignet, werden aber auf unterschiedlich Weise verwendet. Die erste Vorgehensweise steht im Zusammenhang mit beschleunigten Prüfungen qualitativer Art, wobei das Ziel die Ermittlung potenzieller Fehlzustände ist, die möglicherweise zu Produktausfällen im Betrieb führen können. Die zweite Vorgehensweise steht im Zusammenhang mit beschleunigten Prüfungen quantitativer Art, bei welchen die Produktzuverlässigkeit anhand der Ergebnisse beschleunigter Simulationsprüfungen geschätzt werden kann, indem diese Simulationen auf die Umgebung und das Nutzungsprofil zurückgeführt werden.

Beschleunigte Prüfungen können auf vielen Ebenen angewendet werden, welche Hardware- oder Softwareeinheiten enthalten. Verschiedene Zuverlässigkeitsprüfverfahren, wie festgelegte Prüfdauer, sequentielle Stichprobenprüfungen (auch Folge-Stichprobenprüfungen genannt) bis zum Ausfall, Erfolgsprüfungen, Zuverlässigkeitsnachweisprüfungen oder Zuverlässigkeitswachstumsprüfungen können mögliche Kandidaten für beschleunigte Prüfverfahren sein. Die vorliegende Norm stellt einen Leitfaden für ausgewählte, allgemein verwendete, beschleunigte Prüfverfahren bereit. Diese Norm sollte in Verbindung mit Normen zu statistischen Prüfplänen wie etwa IEC 61123, IEC 61124, IEC 61649 und IEC 61710 verwendet werden.

Der relative Nutzen der verschiedenen Verfahren und deren individuelle oder kombinierte Anwendbarkeit zur Bewertung eines/einer gegebenen Systems oder Einheit sollte von dem Produktentwicklungsteam (einschließlich der Zuverlässigkeitsfachleute) vor Auswahl eines bestimmten Prüfverfahrens oder einer Kombination von Verfahren überprüft werden. Für jedes Verfahren sollten die Prüfdauer, die produzierten Ergebnisse, deren Glaubwürdigkeit, die für eine aussagekräftige Analyse erforderlichen Daten, der Einfluss der Kosten über die Lebensdauer, die Komplexität der Analyse und andere ermittelte Faktoren berücksichtigt werden.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm stellt einen Leitfaden zur Anwendung verschiedener beschleunigter Prüfverfahren für die Messung und Verbesserung der Produktzuverlässigkeit bereit. Die Ermittlung potenzieller Ausfallarten, welche beim Einsatz eines Produktes oder einer Einheit auftreten könnten, sowie deren Abmilderung ist eine Voraussetzung für die Zuverlässigkeitssicherung einer Einheit.

Das Ziel der Verfahren ist zum einen die Ermittlung potenzieller Entwurfsschwächen bzw. die Bereitstellung von Angaben über die Produktzuverlässigkeit und zum anderen das Erreichen der notwendigen Verbesserungen von Zuverlässigkeit/Verfügbarkeit innerhalb eines komprimierten oder beschleunigten Zeitraums. Die vorliegende Norm behandelt die beschleunigte Prüfung von nicht instandsetzbaren sowie von instandsetzbaren Systemen. Sie kann angewendet werden auf Folge-Stichprobenprüfungen, auf Prüfungen fester Dauer und auf Zuverlässigkeitswachstumsprüfungen, bei denen die Maßgröße für die Überlebenswahrscheinlichkeit von der üblichen Ausfalleintrittswahrscheinlichkeit abweicht.

Die vorliegende Norm erweitert auch derzeitige Verfahren zum beschleunigten Prüfen oder zur Sortierprüfung in der Fertigung, die in das Produkt eingebrachte Schwächen infolge von Fertigungsfehlern ermitteln würden, welche die Produktzuverlässigkeit beeinträchtigen könnten.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60068 (alle Teile), *Environmental testing*

IEC 60300-3-1:2003, *Dependability management – Part 3-1: Application guide – Analysis techniques for dependability – Guide on methodology*

IEC 60300-3-5, *Dependability management – Part 3-5: Application guide – Reliability test conditions and statistical test principles*

IEC 60605-2, *Equipment reliability testing – Part 2: Design of test cycles*

IEC 60721 (alle Teile), *Classification of environmental conditions*

IEC 61014:2003, *Programmes for reliability growth*

IEC 61164:2004, *Reliability growth – Statistical test and estimation methods*

IEC 61124:2012, *Reliability testing – Compliance tests for constant failure rate and constant failure intensity*

IEC 61163-2, *Reliability stress screening – Part 2: Electronic components*

IEC 61649:2008, *Weibull analysis*

IEC 61709, *Electronic components – Reliability – Reference conditions for failure rates and stress models for conversion*

IEC 61710, *Power law model – Goodness-of-fit tests and estimation methods*

IEC 62303, *Radiation protection instrumentation – Equipment for monitoring airborne tritium*

IEC/TR 62380, *Reliability data handbook – Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment*

IEC 62429, *Reliability growth – Stress testing for early failures in unique complex systems*

3 Begriffe, Formelzeichen und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-191:2014 und die folgenden Begriffe.

ANMERKUNG Formelzeichen für Maßgrößen der Überlebenswahrscheinlichkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit werden, soweit verfügbar, nach IEC 60050-191:1990 verwendet.

3.1 Begriffe

3.1.1

Einheit

Gegenstand der Betrachtung

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit kann ein/eine einzelnes/einzelne Teil, Bauelement, Baugruppe, Subsystem, Funktionseinheit, Gerät oder System sein.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit kann aus Hardware, Software, Personen oder einer jeden Kombinationen aus diesen bestehen.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Einheit setzt sich häufig aus Elementen zusammen, welche jedes einzeln betrachtet werden dürfen. Siehe „Untereinheit“, Definition 191-41-02 und „Gliederungsebene“, Definition 191-41-05.

Anmerkung 4 zum Begriff: IEC 60050-191, erste Ausgabe, identifiziert den Begriff „Einheit“ als ein Synonym, welches nicht für alle Anwendungen gilt.

Anmerkung 5 zum Begriff: Die in der ersten Ausgabe gegebene Definition für Einheit ist eher eine Beschreibung als eine Definition. Diese neue Definition stellt durchgängig einen aussagekräftigen Ersatz in der vorliegenden Norm bereit. Der Wortlaut der vorangegangenen Definition bildet die neue Anmerkung 1.

[QUELLE: IEC 60050-191:2014, Definition 191-41-01] [1]¹⁾

3.1.2

schrittweise Laststeigerung

Stufenprüfung

Prüfung, bei welcher die angewendete Belastung nach jedem festgelegten Intervall erhöht wird, bis ein Ausfall auftritt oder ein vorher bestimmtes Belastungsniveau erreicht wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die „Intervalle“ können anhand der Anzahl der Lastanwendungen, der Dauer oder der Prüfsequenzen festgelegt werden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Prüfung sollte die grundlegenden Ausfallarten, Ausfallmechanismen oder ihre betreffende Häufigkeit nicht ändern.

[QUELLE: IEC 60050-191:2014, Definition 191-49-10]

3.1.3

Beschleunigungsfaktor

Verhältnis zwischen den Ausfallverteilungseigenschaften oder Zuverlässigkeitskenngößen (z. B. der Ausfalldichte) einer Einheit, wenn diese den Belastungen im erwarteten Einsatz ausgesetzt ist, und denjenigen Eigenschaften oder Kenngößen, welche die Einheit annimmt, wenn die höheren Belastungen zum Erreichen einer Verkürzung der Prüfdauer angewendet werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Für die effektive Beschleunigung einer Prüfung muss der Beschleunigungsfaktor > 1 sein.

¹⁾ Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf die Literaturhinweise.

Anmerkung 2 zum Begriff: Falls die Ausfallverteilung einer Poisson-Verteilung mit konstanter Ausfallrate folgt, dann entspricht der Beschleunigungsfaktor dem Verhältnis der Belastungsdauer im Einsatz zu der Zeitdauer unter erhöhter Prüfbelastung.

3.1.4

stark beschleunigte Grenzlastprüfung

HALT

(en: highly accelerated limit test; HALT)

Prüfung oder Abfolge von Prüfungen mit dem Ziel, die wahrscheinlichsten Ausfallarten eines Produkts in einem festgelegten Belastungsumfeld zu ermitteln

Anmerkung 1 zum Begriff: HALT wird gelegentlich als stark erhöhte Lebensdauerprüfung (en: highly accelerated life test) benannt (wie es ursprünglich fälschlich benannt wurde). Als nicht messbare beschleunigte Prüfung stellt sie jedoch keine Informationen bezüglich der Lebensdauer bereit, aber bezüglich der Größenordnung der Belastung, welche den Grenzwert für den Entwurf darstellt.

3.1.5

Prüfung bei stark erhöhter Belastung

HAST

(en: highly accelerated stress test; HAST)

Prüfung, bei welcher die angewendeten Belastungen erheblich verstärkt werden, um die Dauer dieser Anwendung zu verkürzen

3.1.6

Sortierprüfung bei stark erhöhter Belastung

HASS

(en: highly accelerated stress screening; HASS)

Sortierprüfung mit dem Ziel, potenzielle Schwachstellen in einem Produkt zu ermitteln, die durch den Fertigungsprozess oder Fehler in der Kontrolle verursacht wurden

3.1.7

Prozessüberwachung

HASA

(en: highly accelerated stress audit; HASA)

Werkzeug zur Prozessüberwachung, wobei eine Probe aus einem Fertigungslos geprüft wird, um potenzielle, bei der Fertigung verursachte Schwachstellen in einem Produkt zu erkennen

3.1.8

Aktivierungsenergie

E_a

empirischer Faktor zur Schätzung der Beschleunigung, die durch eine Änderung der absoluten Temperatur verursacht wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Aktivierungsenergie wird üblicherweise in Elektronvolt je Grad Kelvin gemessen.

3.1.9

Ereigniskompression

Erhöhen der Häufigkeit der Belastungswiederholung, die erheblich höher sein soll als im Betrieb

3.1.10

Zeitkompression

Auslassen von Perioden mit niedrigen Belastungsniveaus oder mit Belastungsniveaus ohne Schädigungen aus einer Prüfung zum Zweck der Beschleunigung

3.1.11

ausfällende Sortierprüfung

Profil einer Sortierprüfung, bei welcher durch Ausfall erreicht wird, dass latente Fehlzustände zu dauerhaften Fehlzuständen werden

3.1.12

erkennende Sortierprüfung

Anwendung eines niedrigen Belastungsniveaus zum Erkennen intermittierender Ausfälle

3.2 Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen/

Abkürzung Beschreibung

$R(t)$ zeitabhängige Zuverlässigkeit; Überlebenswahrscheinlichkeit als Funktion der Zeit t

ANMERKUNG 1 In IEC 60050-191:1990, Definition 191-12-01 wird das allgemeine Formelzeichen $R(t_1, t_2)$ verwendet. Zeit kann durch Zyklen, Entfernungsangaben usw. ersetzt werden.

$\lambda(t)$ zeitabhängige Ausfallrate

ANMERKUNG 2 Bei Prüfungen zum Zuverlässigkeitswachstum kann das gleiche Formelzeichen, das üblicherweise für die Ausfallrate verwendet wird, für die veränderliche Ausfalldichte verwendet werden.

HALT	stark beschleunigte Grenzlastprüfung (en: highly accelerated limit test)
HASS	Sortierprüfung bei stark erhöhter Belastung (en: highly accelerated stress screening test)
HAST	Prüfung bei stark erhöhter Belastung (en: highly accelerated stress test)
HASA	Prozessüberwachung bei stark erhöhter Belastung (en: highly accelerated stress audit)
$\lambda(s)$	lastabhängige Ausfallrate
UUT	Prüfling (en: unit under test)
A	Beschleunigung, Beschleunigungsfaktor
$A_{\text{Prüfung}}$	Gesamtbeschleunigung in einer Prüfung
ADT	Prüfung auf beschleunigte Verschlechterung (en: accelerated degradation testing)
DSL	Grenze der Entwurfsspezifikation (en: design specification limit)
RTL	Niveau der Zuverlässigkeitsprüfung (en: reliability test level)
SL	Spezifikationsgrenze (en: specification limit)
DL	Zerstörungsgrenze (en: destruct limit)
LDL	untere Zerstörungsgrenze (en: lower destruct limit)
UDL	obere Zerstörungsgrenze (en: upper destruct limit)
OL	Betriebsgrenze (en: operating limit)
UOL	obere Betriebsgrenze (en: upper operating limit)
LOL	untere Betriebsgrenze (en: lower operating limit)
SPRT	sequentielle Stichprobenprüfung (en: sequential probability ratio test)
RG	Zuverlässigkeitswachstum (en: reliability growth)
URLT	obere Grenze der Zuverlässigkeitsprüfung (en: upper reliability test limit)
LRTL	untere Grenze der Zuverlässigkeitsprüfung (en: lower reliability test limit)
THB	Temperatur/Luftfeuchte-Beständigkeitsprüfung (en: temperature humidity bias test)
TTF	Dauer bis zum Ausfall (en: time to failure)
MTBF	mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen (en: mean operating time between failures)
MTTF	mittlere Dauer bis zum Ausfall (en: mean time to failure)
AF	Beschleunigungsfaktor (en: acceleration factor)

FIT	Ausfälle in Bezug auf Dauer (en: failure to time)
CALT	kalibrierte beschleunigte Lebensdauerprüfung (en: calibrated accelerated life testing)
PDF	Wahrscheinlichkeitsdichte (en: probability density function)
ADT	Prüfung auf beschleunigte Verschlechterung (en: accelerated degradation testing)
t_0	Beginn einer Periode zur Bestimmung der verbleibenden Lebensdauer des Produkts bis zur Zerstörung
t_L	Dauer einer vorbestimmten Zeit, z. B. Lebensdauer

4 Allgemeine Beschreibung der beschleunigten Prüfverfahren

4.1 Modell der kumulativen Schädigung

Beschleunigte Prüfungen jeder Art basieren auf dem Prinzip der kumulativen Schädigung. Die Belastungen des Produkts während seiner Lebensdauer verursachen fortschreitende Schädigungen, welche sich während der Produktlebensdauer kumulieren. Diese Schädigung kann zu einem Ausfall des Produkts während des Betriebs führen oder nicht.

Die Strategie jeder Art von beschleunigter Prüfung ist es, durch Erhöhung der Belastungsniveaus während der Prüfung eine kumulative Schädigung zu erzeugen, welche mit derjenigen vergleichbar ist, die in der über die Lebensdauer des Produkts für diese Art von erwarteter Belastung angenommen wird. Die Bestimmung von Zerstörungsgrenzen des Produkts ohne Zuverlässigkeitsschätzung liefert Informationen dahingehend, ob es eine ausreichende Marge zwischen solchen Zerstörungsgrenzen und den Spezifikationsgrenzen des Produkts gibt, wodurch sichergestellt wird, dass das Produkt seine vorbestimmte Lebensdauer ohne Ausfall in Bezug auf diese spezifische Belastungsprüfung besteht. Dieses Verfahren kann, muss jedoch nicht notwendigerweise eine Überlebenswahrscheinlichkeit des Produkts für seine Lebensdauer quantifizieren bzw. nur die Zusicherung geben, dass die erforderlichen Anpassungen der Produktbelastbarkeit die Vermeidung solcher Ausfälle bei Verwendung des Produkts unterstützen würden. Wenn ausreichende Margen ohne Bezug zur Überlebenswahrscheinlichkeit ermittelt werden, ist die Art der Prüfung qualitativ. Bei Prüfungen, in welchen die Überlebenswahrscheinlichkeit ermittelt wird, steht die Größenordnung der Belastung in Beziehung zur Wahrscheinlichkeit, dass das Produkt diese Art von Belastung über die vorbestimmte Lebensdauer hinaus bestehen würde, und diese Art von Prüfung ist quantitativ.

Bild 1 stellt das Prinzip der kumulativen Schädigung sowohl für qualitative als auch für quantitative beschleunigte Prüfungen dar.

In Bild 1 sind zur Vereinfachung alle Belastungen, Betriebsgrenzen, Zerstörungsgrenzen usw. als absolute Werte dargestellt. Die Spezifikationswerte für eine Einheit werden üblicherweise als obere und untere Extremwerte angegeben, also die obere und die untere (oder niedere) Spezifikationsgrenze, USL und LSL, mit den entsprechenden Grenzen der Entwurfsspezifikation (DSL) UDL und LDL, die obere und die untere Betriebsgrenze, UOL und LOL, und auch die oberen Grenzen der Zuverlässigkeitsprüfung URTL und LRTL. Die Annahme ist, dass die entgegengesetzten (negativen) Belastungen ebenfalls kumulative Schädigungen verursachen können, möglicherweise mit einem unterschiedlichen Ausfallmechanismus, wodurch der Zusammenhang zwischen den erwarteten und spezifizierten Grenzen in der gleichen Weise dargestellt werden kann, wie für die hohen oder positiven Belastungen. Zum Beispiel könnten niedrige Temperaturextreme die gleichen oder andere Ausfallarten in einem Produkt hervorrufen. Um Stördaten zu vermeiden, sind die positiven und die negativen thermischen oder anderen Belastungen nicht einzeln in Bild 1 dargestellt, wodurch die Größenordnungen von Belastungen entweder positiv oder negativ sind, und sind deshalb nur als absolute Werte für obere oder untere Grenzen dargestellt.

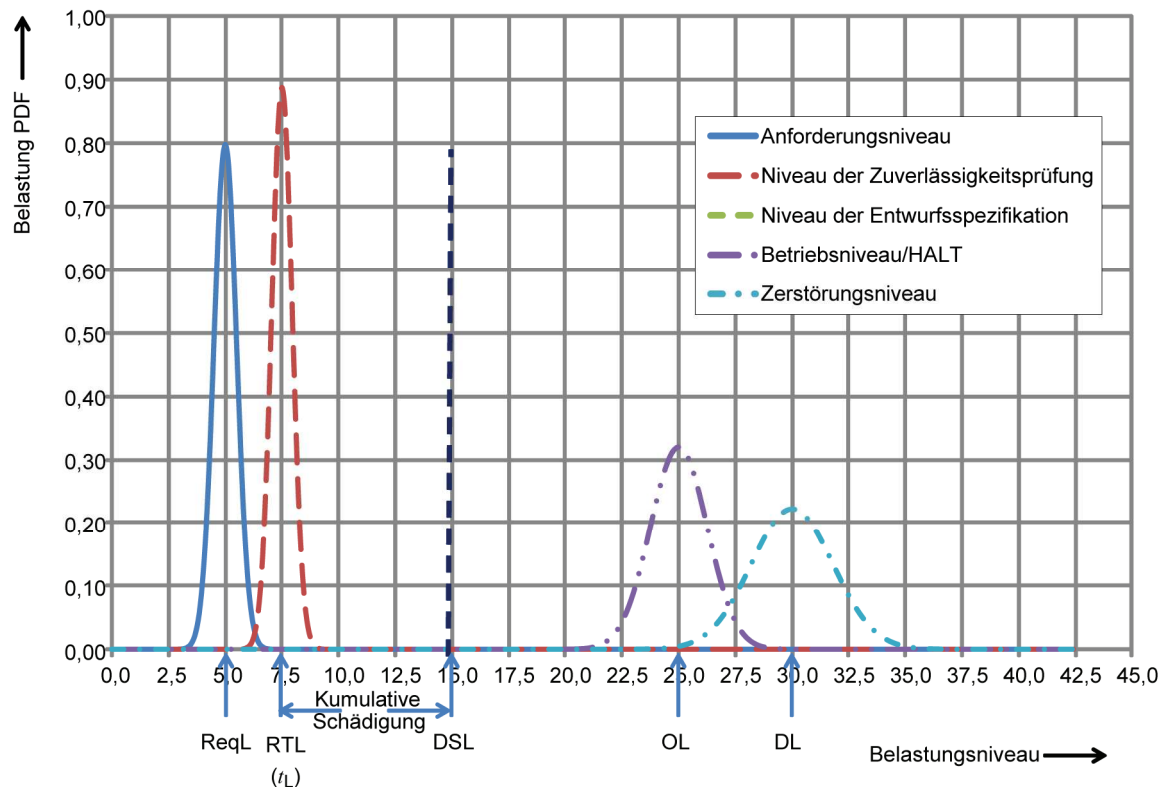


Bild 1 – Funktionen der Wahrscheinlichkeitsdichte (PDF) für kumulative Schädigung, Verschlechterung und Prüfungsarten

Der Graph in Bild 1 zeigt die erforderliche Beanspruchbarkeit eines Produkts bezüglich einer Belastung für die Zeit seiner Lebensdauer, vom Beginn der Lebensdauer (z. B. Zeitpunkt der Fertigung) t_0 bis hin zum Ende der Lebensdauer t_L . Für die Beanspruchbarkeit und die Belastungen in Prüfungen wird auch eine Gaußsche Verteilung angenommen.

Die unterschiedlichen Arten von beschleunigten Prüfungen können nun in Bild 1 als konzeptionelles Modell dargestellt werden.

Funktionsprüfungen werden innerhalb des Bereichs der Anforderungsspezifikation durchgeführt und auf dem Niveau der Spezifikation. In diesem Bereich sollten keine Ausfälle während der Prüfung auftreten; der Entwurf wird bestätigt, um den Betrieb innerhalb der oberen und unteren Spezifikationsgrenzen zuzulassen. Beschleunigte Prüfungen vom Typ B und C (4.2.3 und 4.2.4), d. h. Prüfungen auf beschleunigte Verschlechterung (ADT) oder Prüfungen auf kumulative Schädigung, können dargestellt werden als Abstand zwischen dem Niveau der Entwurfsspezifikation (DSL) und dem Niveau, bei welchem die Prüfung zum Nachweis der Zuverlässigkeit durchgeführt werden sollte (RTL). Wenn durch die Verschlechterung das Leistungsvermögen bis unter die in der Anforderungsspezifikationen geforderten Werte absinkt, darf das Produkt als „ausgefallen“ erklärt werden, sofern ein solches Verhalten als Ausfall definiert ist. Bei der Prüfung des Produkts bei t_0 sollten für Belastungsniveaus bis einschließlich zur Grenze der Entwurfsspezifikation (DSL) keine Ausfälle erwartet werden.

Die Produktentwicklungsspezifikation sollte eine gewisse Verschlechterung während der Lebensdauer des Produkts berücksichtigen, welche sich aus der kumulativen Schädigung durch die erwarteten Belastungen während der Lebensdauer ergibt. Dadurch ist seine Grenze die Grenze der Entwurfsspezifikation (DSL), die höher als die Anforderungsgrenze (RL) ist, um eine erforderliche Marge bereitzustellen. Nach der Verschlechterung des Produkts aufgrund kumulativer Schädigung durch erwartete Belastungen liefert die Zuverlässigkeitsprüfung Informationen bezüglich der vorhandenen Marge zwischen dem Prüfniveau (die verbleibende Beanspruchbarkeit) und der Anforderung. Diese Marge ist eine Maßgröße der Zuverlässigkeit am Ende der geforderten Periode t_L .

Die ultimative Beanspruchbarkeit des Entwurfs ist erheblich höher als die Entwurfsspezifikationen, und dieses ist das Niveau, welches in der qualitativen beschleunigten Prüfung bestimmt wird, wobei das Ziel darin besteht, die Schwächen der Auslegung zu identifizieren, welche die Zuverlässigkeit des Produkts beeinträchtigen könnten, d. h. die Schwächen, welche über die Lebensdauer des Produkts auftreten könnten, wenn sich das Produkt verschlechtert. Daher wird die Beanspruchbarkeit in der qualitativen Prüfung bei der Betriebsgrenze (OL) nachgewiesen.

Die Zerstörungsgrenze liegt oberhalb (außerhalb) der Betriebsgrenze und wird als DL bezeichnet. Dies ist die Stelle, an welcher ein dauerhafter Ausfall beobachtet wird. Wenn OL oder DL nahe der DSL oder der Normabweichung der OL oder DL liegen, sind die Verteilungen hoch, und die Prüfung wird dann eine potenzielle Schwäche im Entwurf anzeigen, wie in Bild 1 dargestellt.

Produktzuverlässigkeit ist eine Funktion der Zeit, üblicherweise der vorbestimmten Lebensdauer t_L .

Die kumulative Normalverteilung der Marge (Abweichung von Belastungsdurchschnittswerten geteilt durch ihre allgemeine Normalabweichung) zwischen der festgelegten Beanspruchbarkeit (Betriebsbedingungen), welche durch die Anforderung repräsentiert wird, und dem Niveau der Zuverlässigkeitsprüfung (RTL) bestimmen die Produktzuverlässigkeit. Das Prüfniveau und seine Dauer werden so gewählt, dass während der Prüfung eine kumulative Schädigung hervorgerufen wird, welche der Verschlechterung aufgrund kumulativer Schädigungen über die Lebensdauer des Produkts entspricht. Der berechnete Wert ergibt die erforderliche Produktzuverlässigkeit, welche dann eine quantitative Maßgröße ist.

Eine Zusammenfassung von aufgelisteten Prüfungen und die Abbildung ihrer Anwendungen auf den Zyklus der Lebensdauer des Produkts sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 – Arten von Prüfungen, abgebildet auf den Zyklus der Produktentwicklung

Typ	Entwurf	Integration	Validierung	Annahme	Herstellung	Wartung
A Qualitativ	FMECA	HALT			HASS/HASA	
	Schaffung der Produktreife		Bestätigung der Produktreife			
B & C Quantitativ			Zuverlässigkeits- wachstumsprüfung	Zuverlässigkeits- qualifikationsprüfung	Zuverlässigkeits- Produktionsannahme- prüfung	
	Beurteilung der Produktreife					
Mögliche Produkt- Ausfall- Strukturen	Typ B/C: Bauelement					
	Typ A: Bauelement	Typ A: Baugruppe und/oder Subsystem				
		Typ B/C: Baugruppe	Typ B/C: System			

Tabelle 1 stellt dem Anwender der vorliegenden Norm eine Synthese bereit, um ein besseres Verständnis dafür zu erlangen, wie und wann die unterschiedlichen Verfahren während des gesamten Zyklus der Lebensdauer des Produkts erforderlich sind.

4.2 Klassifizierung, Verfahren und Typen beschleunigter Prüfungen

4.2.1 Allgemeines

Auf der Grundlage des Modells der kumulativen Schädigung, der von der Prüfung erwarteten Informationen und der Annahmen zur Produktanwendung können die beschleunigten Prüfverfahren in drei Gruppen eingeteilt werden:

- Typ A: beschleunigte Prüfungen qualitativer Art: zur Ermittlung von Ausfallart und/oder -phänomenen;

- Typ B: beschleunigte Prüfungen quantitativer Art: zur Vorhersage von Ausfallverteilung bei bestimmungsgemäßer Verwendung;
- Typ C: quantitative Prüfungen bei komprimierter Zeit und komprimierten Ereignissen: für die Vorhersage von Ausfallverteilung bei bestimmungsgemäßer Verwendung.

ANMERKUNG Sowohl Prüfungen vom Typ B als auch vom Typ C können zur Reduzierung der Prüfdauer führen. Eine Prüfung vom Typ B sollte auf der Grundlage besonderer Ausfallmechanismen durchgeführt werden, und im Allgemeinen darf sie für die Beschleunigung der Lebensdauer verwendet werden. Eine Prüfung vom Typ C erfordert eine Untersuchung der Anwendung oder spezifischer Annahmen zu Bedingungen vor der Prüfung. Eine Prüfung vom Typ C darf für die Beschleunigung der Ausfallrate verwendet werden.

4.2.2 Typ A: beschleunigte Prüfungen qualitativer Art

Die beschleunigten Prüfungen gemäß Typ A sind so gestaltet, dass man durch sie potenzielle Entwurfschwachstellen sowie durch den Fertigungsprozess verursachte Schwachstellen ermitteln kann. Sie können daher auf Niveaus wesentlich höher als OL, wie in Bild 1 dargestellt, veranlasst werden. Der Zweck dieser Prüfungsarten liegt nicht in der Quantifizierung der Produktzuverlässigkeit, sondern darin, während der Prüfung solche Produktschwachstellen zum Auftreten oder zum Ausfallen zu bringen, für die es wahrscheinlich ist, dass sie ansonsten irgendwann während der nützlichen Produktlebensdauer auftreten und zu einem Produktausfall führen. Verbesserungen der Produktgestaltung oder des Fertigungsprozesses werden vorgenommen, um solche Ausfälle auszuschließen und ein stärker beanspruchbares robusteres Produkt zu fertigen, von dem man erwarten kann, dass es im Betrieb auch unter den extremen wiederholten Belastungen gemäß den Auslegungsspezifikationen zuverlässiger sein wird.

Produktentwicklungsprozesse, in denen solche Prüfungsarten eingesetzt werden, erhöhen die Produktzuverlässigkeit durch die Abmilderung von Ausfallarten und durch die Erhöhung der Produktrobustheit, ohne dass dabei das Zuverlässigkeitsziel nachgewiesen oder die Zuverlässigkeitsverbesserung gemessen wird. Diese Prüfungen finden oft bei solch hohen Belastungsniveaus statt, dass Ausfälle reichlich außerhalb der Grenzen der Auslegungsspezifikation (DL in Bild 1) beobachtet werden sollten. Der Zweck ist es, die Ausfallarten, die Schwachpunkte im Entwurf und die Marge zwischen den oberen Funktionsgrenzen Betriebsgrenze (OL) und Zerstörungsgrenze (DL) in Bild 1 zu ermitteln. Die Marge zwischen der Spezifikationsgrenze und der Betriebsgrenze stellt sicher, dass die Schwächen in der HALT-Prüfung ermittelt werden und nicht zu erwarten ist, dass sie als Ausfälle während der erwarteten Lebensdauer des Produkts t_L auftreten.

4.2.3 Typ B: beschleunigte Prüfungen quantitativer Art

Beschleunigte Prüfungen des Typ B verwenden Verfahren der kumulativen Schädigung, um die bis zum Ende der erwarteten Lebensdauer vorausgesagte Produktzuverlässigkeit zu bestimmen. Die erforderliche Marge zwischen der erwarteten kumulativen Schädigung und der Anforderung liefert eine verlässliche Maßgröße. Diese Prüfungen werden dann beschleunigt, um die erforderliche kumulative Schädigung in einer erheblich kürzeren Zeit als der erwarteten Lebensdauer des Produkts zu erreichen. Beschleunigte Prüfungen des Typ B verwenden quantifizierbare Beschleunigungsfaktoren, welche sich an der Physik spezifischer Ausfälle (oder Ausfallarten) orientieren und einen Zusammenhang zwischen der Dauer der Aussetzung gegenüber den spezifischen Belastungen während der Prüfung und der Betriebsumgebungen liefern. Die Ausfall- oder Ausfallartenverteilung wird anhand der Informationen separater beschleunigter Prüfungen bestimmt. Solche Prüfungserkenntnisse bilden die Grundlage für ein Lebensdauer-Funktionsmodell und können dann je nach Bedarf und/oder Anwendbarkeit für die Quantifizierung der Prüfbeschleunigung für diverse Zuverlässigkeitsberechnungen verwendet werden. Auf diese Weise kann die Produktzuverlässigkeit durch die Schätzung der Zuverlässigkeit oder der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von individuellen Ausfallarten für jedes Niveau von erwarteten Belastungen geschätzt werden. Falls für die Analyse von Daten unter Verwendung anderer Prüfungsarten (z. B. Prüfungen zum Zuverlässigkeitswachstum oder zum Nachweis der Zuverlässigkeit) benötigt, kann der bestimmte Beschleunigungsfaktor für die Neuberechnung der Daten für die Dauern bis zum Ausfall von beschleunigten Prüfungen verwendet werden, um die Ereignisse der Dauern bis zum Ausfall in Betriebsumgebung darzustellen, und diese Ergebnisse dann für Zuverlässigkeitsberechnungen zu verwenden. In Bild 1 sind diese Prüfungen als Niveaus der Zuverlässigkeitsprüfung (RTL) dargestellt.

Ein weiterer Weg, um Informationen aus diesem Typ von Prüfungen zu gewinnen, besteht darin, Stichproben von Einheiten auf die spezifischen Ausfallarten und die spezifischen Umgebungen bis zum Ausfall zu prüfen. Dies ermöglicht die Bestimmung anwendbarer Ausfallverteilungen und geeigneter Beschleunigungsfaktoren, welche dann für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens der jeweiligen Ausfallart verwendet werden können. Diese Informationen können sowohl für zukünftige Prüfungen als auch für Weibayes-Tests (Ein-Parameter-Weibull-Verteilung; siehe IEC 61649) nützlich sein. Das Belastungsniveau der Typ B-Prüfungen kann in Bild 1 als außerhalb der Anforderung gelegen dargestellt werden, aber unterhalb des Belastungsniveaus, welches bei einer HALT-Prüfung angelegt werden würde. Das Niveau der Belastung darf zwischen der Grenze der Entwicklungsspezifikation und dem Belastungsniveau von DL liegen. Die Dauer der Belastungsanwendung muss ausreichend sein, um eine kumulative Schädigung zu verursachen, die eine Marge gegenüber der kumulativen Schädigung hat, welche durch die erwartete Lebensdauerbelastung während der Lebensdauer des Produktes verursacht wird. Diese Marge liefert dann die Maßgröße für die Produktzuverlässigkeit $R(t_L)$ während der Zeit t_L .

Eine Verkürzung der Prüfdauer wird häufig erreicht, indem die betriebs- und umweltbedingten Belastungen über jene für den Betrieb festgelegten hinaus erhöht werden. Das erhöhte Niveau dieser Belastungen erzeugt eine Auswirkung kumulativer Schädigung, welche mit jenen vergleichbar ist, die für die Lebensdauer des Produktes erwartet werden, aber in einem erheblich reduzierten Zeitraum.

Prüfung auf beschleunigte Verschlechterung (ADT) ist ein Verfahren, bei welchem die Verschlechterung einer Einheit in Abhängigkeit von Zeit oder Belastungszyklen gemessen wird. Die Verschlechterung wird aufgezeichnet und extrapoliert, bis der Parameter ein nicht annehmbares Niveau (Ausfall) erreicht. Dieses Verfahren ist sehr nützlich für Ausfälle, welche keine plötzlich auftretenden Ausfälle sind, sondern sich schrittweise entwickeln. Diese Belastungsniveaus können bei der Anwendung in Prüfungen den Nennwerten oder den Schlimmstfall-Werten der Betriebsgrenzen entsprechen, welche für den Betrieb erwartet werden, oder die Prüfung kann durch Erhöhung von Prüfbelastungen beschleunigt werden, wie in der vorliegenden Norm beschrieben [7].

4.2.4 Typ C: quantitative Prüfungen mit komprimierter Zeit oder komprimierten Ereignissen

4.2.4.1 Verwendung von Prüfungen des Typ C

Die Prüfungen des Typ C werden hauptsächlich für die Schätzung der Lebensdauer von Bauelementen verwendet, bei denen Verschleiß im bestimmungsgemäßen Einsatz die dominierende Ausfallart ist; Beispiele sind Schalter, Tastaturen, Relais, Steckverbinder oder Lager. Die Daten aus diesen Prüfungen werden häufig anhand der Weibull-Verteilung analysiert, dabei häufig in Form der sogenannten „plötzlicher Tod“-Prüfung (siehe IEC 61649).

Zeitkompressionsprüfungen des Typ C werden ebenfalls häufig verwendet zum Ermitteln von:

- Aspekten der Systemintegration (wie etwa die Integration und das Zusammenspiel von Hardware und Software);
- Ausfallarten, die spezifisch für den Betriebszustand sind, z. B. Betriebszyklen für alle mechanischen und elektrischen zyklischen Ereignisse;
- Ausfallarten spezifisch für Umgebungen, in welchen das Belastungsspektrum breit ist; dabei ist jedoch eine Schwelle dergestalt festgelegt, dass die unterhalb der Schwelle gelegene Aussetzung gegenüber Belastungen nicht maßgeblich zur Schädigung des Produkts beiträgt.

Durch die Zeitkompression oder Ereigniskompression wird die Belastung durch die Dauer oder die Häufigkeit ihrer Anwendung beschleunigt, aber nicht durch die Erhöhung ihres Niveaus.

Jedes der vorgenannten beschleunigten Prüfverfahren ist in Abschnitt 5 näher beschrieben.

4.2.4.2 Zeitkompression

Zeitkompression ist eine Art der Prüfungsbeschleunigung, die unter gewissen Umständen angewendet werden kann, bei welchen die Prüfung lediglich die Zeit berücksichtigt, in der das Produkt tatsächlich in Betrieb ist oder es sich in einem besonders schädigenden Betriebszustand befindet (auch bekannt als Beseitigung „nicht schädigender Beanspruchungen“). Die Umstände, unter welchen diese Art der Beschleunigung eingesetzt werden darf, sind solche Fälle, in denen die betrieblichen Belastungen und deren

kumulative Schädigung maßgeblich höher sind als diejenigen in anderen Betriebszuständen, z. B. außer Betrieb oder Bereitschaft usw. Bei dieser Vorgehensweise muss jedoch darauf geachtet werden, dass die in Perioden geringer Belastung akkumulierten Schädigungen unbedeutend im Vergleich mit den in Perioden hoher Belastung akkumulierten Schädigungen sein müssen, was physikalisch nicht unbedingt einfach sichergestellt werden kann (IEC 60605-2).

4.2.4.3 Ereigniskompression

Findet eine Belastung wiederholt statt, wie etwa Ein/Aus-Schaltzyklen, dann darf die Prüfung dadurch beschleunigt werden, dass die Wiederholungsrate der Belastung zeitlich verkürzt wird (Ereigniskompression). Dies ist besonders dann zweckmäßig, wenn die Prüfung nicht durch die Erhöhung des Belastungsniveaus selbst beschleunigt werden kann. Auf diese Weise bleibt die Anzahl der Betätigungen dieselbe, und somit bleibt auch die Wirkung der kumulativen Schädigung gleich. Es muss hierbei jedoch sorgfältig darauf geachtet werden, dass durch die höhere Wiederholungsrate der Belastung keine Ausfallarten verursacht werden, die im bestimmungsgemäßen Betrieb nicht auftreten würden. Beispiele hierfür sind Eigenerwärmung in Plastikteilen, vor der nächsten Belastung noch nicht abgeklungene Schwingungen und Softwaresequenzen, die vor Eintritt des nächsten Signals noch nicht beendet sind.

5 Beschleunigte Prüfmodelle

5.1 Typ A, beschleunigte Prüfungen qualitativer Art

5.1.1 Stark erhöhte Grenzlastprüfung (HALT-Prüfung)

5.1.1.1 Allgemeines

Jeder Typ der allgemein angewendeten beschleunigten Prüfverfahren und ihre Vorteile, Nachteile und erforderliche Vorsichtsmaßnahmen für deren Anwendung werden in der vorliegenden Norm beschrieben.

Die Prüfung des Typ A besteht nicht nur in der klassischen HALT-Prüfung, sondern auch in anderen stark beschleunigten Prüfungsarten, wie beispielsweise dem Autoclave-Prüfverfahren, Wärmeschock und anderen beschleunigten Prüfungen quantitativer Art.

Das in Bild 1 dargestellte Modell veranschaulicht die Beziehungen zwischen den Spezifikationen, den Entwurfsgrenzen und den Prüfstrategien einer HALT-Prüfung.

ANMERKUNG Die Abkürzung HALT wurde in der Vergangenheit versehentlich als „stark erhöhte Lebensdauerprüfung“ bezeichnet. Nach ihrem Charakter als beschleunigte Prüfung qualitativer Art misst eine HALT-Prüfung jedoch nicht die Lebensdauer einer Einheit, auch nicht, obwohl der Begriff „Lebensdauer“ einbezogen wird, dadurch dass sichergestellt wird, dass die Ausfälle während der HALT-Prüfung nicht während der Lebensdauer der geprüften Einheit auftreten würden. Die Prüfung prüft effektiv die Belastungsgrenzen eines/einer Produkts/Einheit, weshalb der Wortlaut „Grenze“ eine angemessene Verwendung für die Bezeichnung der Abkürzung darstellt.

Werden Prüfungen zum Nachweis der Zuverlässigkeit oder zur Bestimmung eines Zuverlässigkeitswachstums beschleunigt, so muss eine Marge zwischen der durch die während der Prüfung angelegten Belastungen verursachten kumulativen Schädigung einerseits und den durch die erwartete übliche Lebensdauerbelastung oder jegliche andere vorbestimmte Zeiten, für welche der Nachweis der Zuverlässigkeit zu erbringen ist, verursachten kumulativen Schädigungen andererseits nachgewiesen werden. Die günstigsten Prüfergebnisse für die angewendeten Margen ergeben Informationen zur Produktzuverlässigkeit in dieser vorbestimmten Zeit, ausgedrückt durch das Verhältnis von Belastung zu Beanspruchungskriterien. Die nachgewiesene Beanspruchbarkeit wird durch die Prüfergebnisse dargestellt, wogegen die Zuverlässigkeit die Ergänzung des Überlappungsbereich von beiden ist, Last- und Beanspruchbarkeitskurve, dargestellt in Bild 2 (der Überlappungsbereich beider Kurven stellt den Bereich dar, in welchem ein Ausfall auftritt).

In Bild 1 sind die Anforderungsspezifikationen in Entwurfsspezifikationen umgesetzt worden. Das Bild beschreibt weiterhin, wie die Entwurfsmarge durch eine HALT-Prüfung verifiziert wird.

Um die Marge zwischen Entwurfsspezifikationen und der in Prüfung befindlichen Einheit (UUT) abschätzen zu können, ist es erforderlich, die Beanspruchungsniveaus solange erhöhen, bis sich bei der Anwendung von Prüfungen des Typ A ein Ausfall ereignet. Die in diesen Prüfungen verifizierten Margen werden durch eine Betriebsbelastungsgrenze (OL) der HALT-Prüfung sowie als Zerstörungsgrenze (DL) dargestellt. Dies zeigt auch die Margen für die Variationen n der Werkstoffe und Fertigungsprozesse während der Herstellung an.

5.1.1.2 Grundprinzipien der HALT-Prüfung

Die Grundüberlegung einer HALT-Prüfung ist das schnelle Provozieren von Ausfällen in einem Produkt, um so Entwurfsschwachstellen aufzuzeigen und abschwächen zu können, um dadurch die Robustheit des Produktes im betrieblichen Einsatz zu erhöhen. Dieser Typ einer beschleunigten Prüfung ist nicht dafür vorgesehen, die Zuverlässigkeit zu messen, sondern die Produktzuverlässigkeit durch die Beseitigung von Ausfallarten mit der geringsten Marge zwischen betrieblicher Belastung (Last) und Beanspruchbarkeit des Produkts (Bild 2 und 3) zu erhöhen. Mit diesem Typ beschleunigter Prüfungen werden lediglich potenzielle Ausfallarten ermittelt und die nötigen Entwicklungen und Verbesserungsprozesse angesichts der gewählten Belastungen angestoßen. Die Erfahrung aus HALT-Prüfungen zeigt, dass die meisten Produkte bezüglich der angelegten Belastungen sehr robust sind, dass aber einige wenige Bauelemente oder Entwurfsdetails signifikant schwächer als der Rest sind. Die Absicht einer HALT-Prüfung ist es, diese wenigen Bauelemente oder Entwurfsdetails zu finden und sie so beanspruchbar wie die anderen Produktteile zu machen.

Bild 2 stellt die Überschneidung der Verteilungen der Beanspruchbarkeit und der Belastung dar. Es wird angenommen, dass die Belastungen im Betrieb durch unterschiedliche Anwendungen, klimatische Bedingungen usw. anhand einer Lastverteilung modelliert werden können. Sie ist hier als Normalverteilung dargestellt. Die Beanspruchbarkeit der Produkte wird aufgrund von Variationen in den Rohmaterialien und den Fertigungsprozessen variieren. Dies kann durch eine Beanspruchbarkeitsverteilung modelliert werden, welche in Bild 2 ebenfalls als eine Normalverteilung dargestellt ist.

Der Überlappungsbereich sowohl der Verteilung der Beanspruchbarkeit als auch der Verteilung der Belastung stellt die Maßgröße für die Wahrscheinlichkeit eines Produktausfalls dar. Der Graph in Bild 2 zeigt die klassische Entwurfsmarge, Belastungs- gegenüber Beanspruchungskriterien, berücksichtigt jedoch in dem in diesem Abschnitt dargestellten Kontext nicht das Modell der kumulativen Schädigung; deshalb ist es nicht auf die Anfangs-Kurzzeitprüfung anwendbar, welche die ultimative Beanspruchbarkeit des Produktentwurfs messen würde. Wenn die erweiterte Produktqualitätssicherung eine sehr enge Beanspruchbarkeitsverteilung aufrechterhalten würde (welches eine sehr teure und zeitaufwändige Maßnahme sein kann), würden außerdem die Verteilungen nicht überlappen, was bedeuten würde, dass die betrieblichen Ausfälle für die spezifische Ausfallart unwahrscheinlich würden.

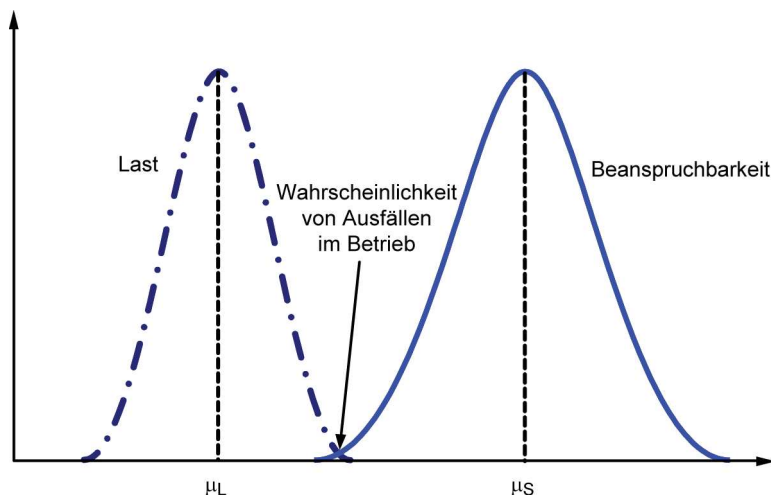


Bild 2 – Beziehung von PDFs der Beanspruchbarkeit gegenüber der Last eines Produkts im Betrieb

Der Fertigungsprozess untersteht während der Fertigung der ersten Prüfeinheiten üblicherweise einer strengen Kontrolle, was für die späteren kontinuierlichen Fertigungsläufe möglicherweise nicht zutrifft. In Bild 3 ist dargestellt, dass die Muster, welche für Prüfungen gefertigt wurden, häufig eine mittlere oder sogar

noch höhere Beanspruchbarkeit haben, da diese oft in einer speziellen Prototypenfertigungslinie mit maximaler Aufmerksamkeit durch das Management gefertigt werden. Wenn das Produkt dann später in Massen gefertigt wird, können Einheiten der laufenden Fertigung möglicherweise auch eine geringere Beanspruchbarkeit aufweisen als die aus der Anfangsfertigung entnommenen Muster. Die Vorgehensweise ist in Bild 3 dargestellt. Würde man die Verteilung der ersten sorgfältig ausgewählten Fertigungsmuster als Funktion der Belastung darstellen, so würde die niedrigere Seite dieser Verteilung in den Bereich fallen, in welchem sich der Mittelwert der neuen Verteilung, H1, befindet.

Die enge Streuung dieser Originalverteilung würde sie von der Verteilung der erwarteten Last entfernen, welche als die Verteilung auf der linken Seite dargestellt ist. Alle Einheiten in diesem Fertigungsprozess würden die Prüfung bestehen, d. h., es würden keine Ausfälle erkannt werden. In der späteren Massenfertigung wird der Mittelwert der Beanspruchbarkeit jedoch wesentlich geringer, so dass die Überlappung der Verteilung der Belastung und der Verteilung der Beanspruchbarkeit bevorsteht, was unter Betriebsbelastung zu einem Ausfall der Einheiten aus der schwächeren Fertigung führen würde. Dies bedeutet, dass die potenziellen Schwächen der in Masse gefertigten Einheiten nicht angemessen durch die Prüfung erkannt würden. Wenn das Prüfniveau höher ist (der Mittelwert ungefähr bei Niveau H3 in Bild 3), und die Beanspruchbarkeit des Produkts eine Verteilung hat, welche die reguläre Fertigung einschließt, würde eine solche Prüfung eine ausreichende Marge bereitstellen, um sicherzustellen, dass die potenziellen Ausfälle bei der Verwendung der schwächeren Einheiten erkannt und abgeschwächt werden. In Fällen mit nicht ausreichender Marge werden die später gefertigten Einheiten zu Ausfällen im Betrieb führen.

Diese Überlegungen stehen hinter der Anwendung von Prüfungen mit schrittweiser Laststeigerung und einer HALT-Prüfung, um eine angemessene Marge über die erwarteten Belastungen während der Lebensdauer sicherzustellen. Auf diese Weise dürfen Prüfungen mit maßgeblich kleineren Stichproben durchgeführt werden, als sie für konventionelle Prüfungen erforderlich sind.

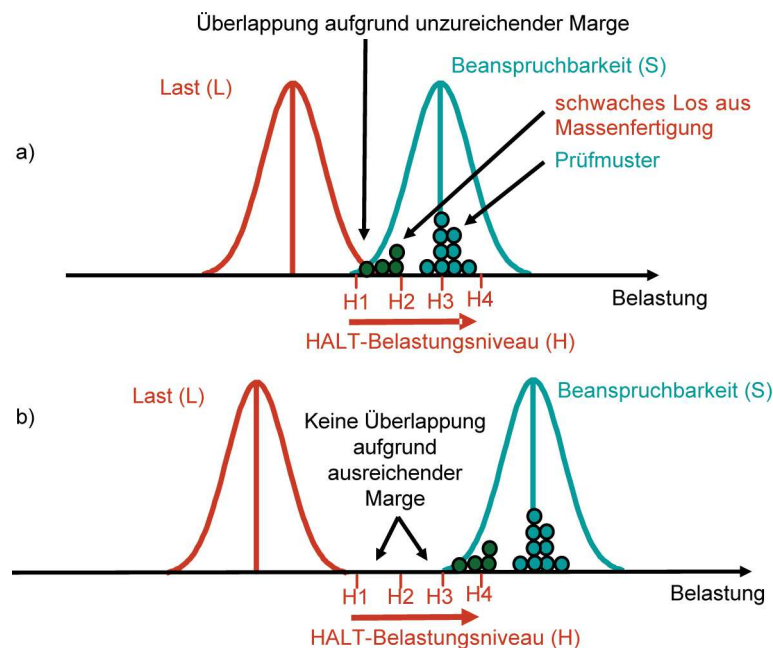


Bild 3 – Auswirkung der Unsicherheit von Last und Beanspruchbarkeit auf die Prüfstrategie

Die HALT-Prüfung ist ein Mittel einer erkundenden qualitativen Entwurfsverbesserungsprüfung und sollte als solche akzeptiert werden. Mit einer HALT-Prüfung kann man für die entsprechende(n) Belastungsart(en) im Entwurf die schwächste verbundene Ausfallart ermitteln. Steht diese Ausfallart im Zusammenhang mit einer Belastung in der Betriebsumgebung des Produkts, können die Beanspruchungsniveaus lediglich geschätzt werden, indem die Marge zwischen den Belastungskurven und den Beanspruchbarkeitskurven berücksichtigt wird und die zusätzlichen Margen für die erwarteten Variationen sowohl des Fertigungsverfahrens als auch der erwarteten Anwendungsumgebung einbezogen werden. Der Vergleich zwischen einer HALT-Prüfung und einer konventionellen beschleunigten Prüfung ist in Tabelle C.1 dargestellt.

Die schwächste verbundene Ausfallart tritt als erste auf, die HALT-Prüfung wird bis zur Aufdeckung der zweiten, der dritten und der nachfolgenden schwachen verbundenen Ausfallarten fortgesetzt. Dies geschieht solange, bis keine relevanten Ausfallarten mehr beobachtet werden oder bis die technischen Grenzen des geprüften Systems erreicht sind.

Eine HALT-Prüfung ist so angelegt, dass die Bedingungen der Betriebsumgebung des Produkts und die Entwurfsspezifikationen bei Weitem überschritten werden. Die Belastungen werden in kurzen Dauern angelegt mit dem Ziel, den Übergang von Fehlern zu Ausfällen hervorzurufen, und das Produkt so sehr zu stärken, wie dies technisch und wirtschaftlich machbar ist. Mit einer HALT-Prüfung kann man Ausfallarten ermitteln, aber nicht deren zeitliche Abhängigkeit.

Der UUT muss während der Prüfung auf seine Funktion hin überwacht werden, um den Verlust seiner Funktionen zu erkennen. Sollte eine kontinuierliche Überwachung nicht möglich sein, so müssen die Funktionen des Produkts bei konstant gehaltenem Beanspruchungsniveau geprüft werden. Ein typisches Verfahren für eine HALT-Prüfung ist in Anhang A beschrieben.

Die Höhe der Belastung steht nicht im Mittelpunkt einer HALT-Prüfung, sondern Maßnahmen zur Produktverbesserung und organisatorische Antworten auf die gefundenen Ausfälle sind das eigentliche Ziel eines wirksamen HALT-Prüfprogrammes. Die Produktverbesserung sollte bis zu einem Punkt fortgeführt werden, an dem ein kostengünstiges, robustes Produkt erreicht wird, in dem kein Teil der Konstruktion signifikant schwächer als der Rest des Produktes ist. Das Ziel ist es, das Produkt solange zu verbessern, bis ein durch das Geschäftsmodell und den Einsatz kostengünstiger Technik gerechtfertigtes Niveau erreicht ist.

Die Betriebsgrenzen und Zerstörungsgrenzen des Produktes können bildlich als eine Verteilung über einer Belastungsachse dargestellt werden, wie in Bild 4 dargestellt, für beide Belastungsextreme, hoch und niedrig (LOL, UOL, LDL und UDL).

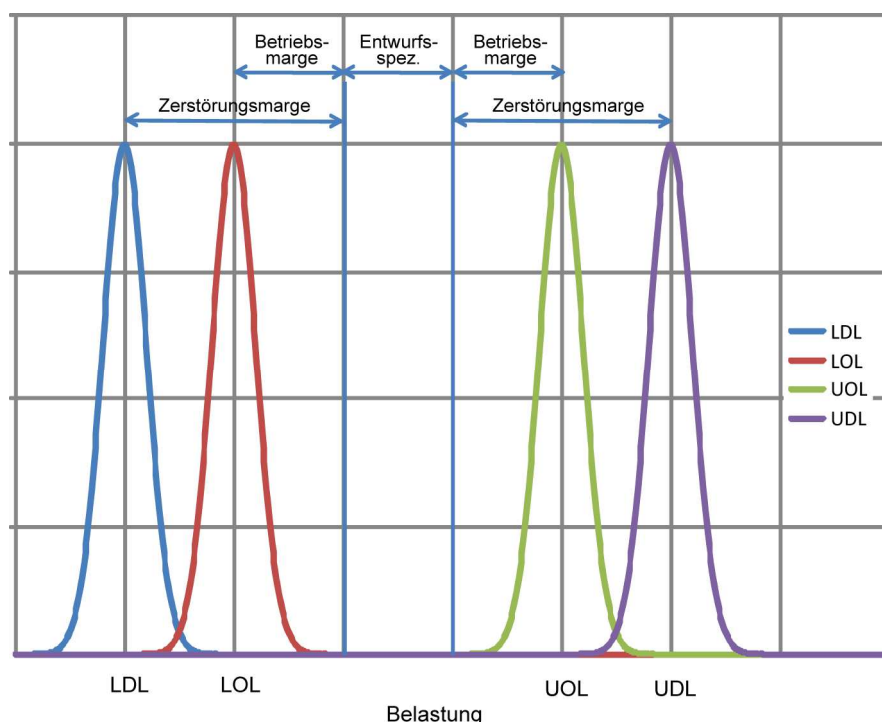


Bild 4 – PDFs der Betriebsgrenzen und Zerstörungsgrenzen als Funktion der angelegten Belastung

Bild 4 ist ein Beispiel für den Fall, dass beide Belastungsgrenzen die Einheit betreffen. Dieses Beispiel könnte die thermische Belastung einer Einheit sein, bei der sowohl die obere als auch die untere Temperatur das Betriebsverhalten des Produkts beeinflussen. Diese Einflüsse brauchen nicht symmetrischer Art zu sein, da die Grenzen für die obere als auch die untere Temperatur sich in unterschiedlichen Abständen von der nominalen Entwurfsbelastung befinden können. Selbst wenn diese Prüfungen an frühen Prototypen durchgeführt werden, so können sie dennoch Informationen über entwurfsbedingte Ausfallarten liefern. Wie in

Bild 4 dargestellt, können alle diese Grenzen entsprechend den gezeigten Verteilungen variieren. Diese Verteilungen können unterschiedliche Normalabweichungen haben, und durch eine HALT-Prüfung soll ein Hinweis zu den Margen gegeben werden, welche es ermöglichen, dass das endgültige Produkt diese Variationen im Einsatz ohne Ausfälle besteht.

Obwohl in Bild 4 die Temperaturbelastung dargestellt ist, können auch andere Belastungen durch eine HALT-Prüfung erfolgreich untersucht werden. Im Falle anderer Belastungsarten existieren untere Grenzen möglicherweise nicht, wie beispielsweise im Fall von mechanischen Belastungen, wobei sie jedoch bei anderen Belastungsarten wie elektrische Belastung und Luftfeuchte vorhanden sein können.

5.1.1.3 Belastungsarten und Anwendung

Die primären oder typischen angewendeten Belastungen in einer HALT-Prüfung sind die folgenden:

- Temperatur;
- Temperaturwechsel;
- Schwingen/Schocken;
- Spannung;
- Kombination von Schwingen/Schocken und Temperaturwechsel.

Andere produktspezifische Belastungen dürfen ebenfalls angewendet werden, wie Taktfrequenz für den Mikroprozessor, Spannungs- oder Leistungsvariationen, Verunreinigungen oder Lösungsmittel usw. oder eine Kombination dieser.

Die aus einer HALT-Prüfung resultierende Verifizierung von Margen und die Produktverbesserungen erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass das Produkt im Betrieb robust und zuverlässig sein wird.

Ein Beispiel typischer Belastungsniveaus ist im Anhang A gezeigt. Idealerweise werden die Belastungen einer HALT-Prüfung wie in 5.1.1.2 beschrieben angewendet, bis die vorbestimmten maximalen Belastungen erreicht sind. Diese maximalen Belastungen werden wie folgt bestimmt:

- durch die Werkstoffgrenzen und die technischen Grenzen der verwendeten Werkstoffe und Bauelemente;
- durch die mit den verfügbaren Methoden und Geräten maximal erzielbaren Belastungsniveaus.

Es sollte zur Kenntnis genommen werden, dass die angewendeten Belastungsniveaus die ultimativen Werkstoffgrenzen, bei denen sich die physikalischen oder chemischen Eigenschaften verändern können, nicht überschreiten sollten.

Üblicherweise ist zu erwarten, dass es im UUT einige zerbrechliche Elemente gibt, die nicht für die gewöhnlich bei einer HALT-Prüfung angewendeten Belastungsniveaus ausgelegt sind. Diese zerbrechlichen Elemente sollten nach Möglichkeit während der HALT-Prüfung geschützt oder bei der Auswertung der erfassten Prüfdaten außer Acht gelassen werden. Zerbrechliche Elemente können beispielsweise dadurch geschützt werden, dass man sie mit Luft kühlt, sie gegen kalte Luft isoliert, sie außerhalb des UUT abstützt, so dass sie gegen Schwingen und Schocken isoliert sind oder man sie sogar nach außerhalb der HALT-Prüfkammer verbringt und ihre Verbindungen zum restlichen UUT verlängert.

Jeder während der HALT-Prüfung beobachtete Ausfall sollte untersucht und auf die eigentliche Ausfallursache hin analysiert werden. Falls ein Auftreten der erkannte Ausfallursache auch im bestimmungsgemäßen Betrieb wahrscheinlich ist, bei dem die erwarteten Belastungsniveaus erheblich geringer als bei der HALT-Prüfung sind, sollte eine Korrekturmaßnahme in Abstimmung mit den technischen und den geschäftlichen Entscheidungsträgern vorgeschlagen und umgesetzt werden.

5.1.2 HAST-Prüfung (Prüfung bei stark erhöhter Belastung)

Diese Art der Prüfung kann man als eine Kreuzung aus den qualitativen Prüfungen des Typs A und den quantitativen Prüfungen des Typs B ansehen. Diese Prüfungsart ist in der elektronischen Bauelementeindustrie sehr verbreitet, wo sie in breitem Maße als eine effizientere (kürzere) Alternative zu der viel länger

dauernden Temperatur/Luftfeuchte-Beständigkeitsprüfung (THB) verwendet wird, d. h. einer Druckkochtopf-prüfung mit einer Dauer von 1 000 h. Die Belastungen diesen Prüfungen bestehen üblicherweise in Temperatur und Luftfeuchte, wobei Korrosion in metallischen Leitern in kunststoffverkappten Bauelementen (en: dies) und Dünnschichtwiderständen auftreten kann. Die Bauelemente werden üblicherweise während der Prüfung vorgespannt. Obwohl diese Prüfungen keine numerischen Schätzungen der Zuverlässigkeit liefern, werden sie dennoch als eine wirksame Prüfung zur Requalifikation eingesetzt, um durch sie die Gewissheit zu erhalten, dass die Zuverlässigkeit der Bauelemente nicht durch irgendwelche in die Bauelemente eingebrachten Änderungen in Frage gestellt wird, siehe JESD22-A110 [23]. Die Dauer einer HAST-Prüfung in der elektronischen Bauelementeindustrie beträgt üblicherweise ungefähr 100 h, und die Belastungsniveaus für Temperatur und Luftfeuchte sind üblicherweise 130 °C und 85 % relative Luftfeuchte.

5.1.3 Sortierprüfung bei stark erhöhter Belastung/Prozessüberwachung (HASS/HASA)

5.1.3.1 Prinzip und Umfang von HASS/HASA

HASS und HASA sind nicht als Prüfungen klassifiziert. Beide sind jedoch in diese Norm aufgenommen worden, weil sie beschleunigte Belastungen zur Fehlererkennung/Sortierung anwenden. HASS-Prüfungen werden als Sortierprüfungen (en: screening) von Fertigungseinheiten angewendet, wobei beträchtlich höhere Belastungen verwendet werden als die im normalen Einsatz oder beim Versand erwarteten Beanspruchungen, jedoch sind diese Belastungsniveaus niedriger als solche, die die Lebensdauer des Produkts im Betrieb erheblich verkürzen könnten. Diese Niveaus bestimmen sich aus den in einem HALT-Programm gemachten Erfahrungen. Die Sortierprüfung kann auf alle (100 %) Fertigungseinheiten oder auf ein Muster angewendet werden. Der Zweck der Sortierprüfung ist es, latente Fertigungsfehler zu entdecken, die später im bestimmungsgemäßen Betrieb des Produkts auftauchen würden. Die Erkennung latenter Fehler, gefolgt von einer Ausfallanalyse und notwendigen Korrekturmaßnahmen (verifiziert durch eine für die Entdeckung spezieller Ausfallarten ausgelegten Prüfung) verringert die Anzahl der Ausfälle. Die resultierende verbesserte Betriebszuverlässigkeit ergibt sich aus der verringerten Anzahl der in Betrieb befindlichen Bauelemente mit latenten Fertigungsschwachstellen und nicht aufgrund einer verbesserten inhärenten Entwurfszuverlässigkeit.

Die Belastungsniveaus bei HASS/HASA werden für die provozierende Sortierprüfung (en: precipitation screen) verwendet. Die provozierende Sortierprüfung besteht aus kombinierten Belastungen, deren Niveaus gerade noch innerhalb der Betriebsgrenzen liegen. Der Zweck dieser Sortierprüfung ist es, Fertigungsschwachstellen in intermittierende oder permanente Ausfälle zu überführen. Um Ausfälle zu erkennen, ist es empfehlenswert, die Funktionen der UUTs während der Sortierprüfung zu überwachen, da einige betriebliche Abnormalitäten bei der anschließenden Betriebsprüfung nicht erkannt werden könnten. Des Weiteren ist unbekannt, wann während der provozierenden Sortierprüfung der möglicherweise intermittierende funktionale Ausfall erkannt werden könnte. Bei der provozierenden Sortierprüfung können mehrere unterschiedliche Belastungsarten und Belastungsniveaus kombiniert werden. Wie bei einer HALT-Prüfung können intermittierende Ausfälle durch eine erkennende Sortierprüfung verifiziert werden (siehe A.1, Schritt 4). Die konstante Überwachung sollte so umfassend und vollständig wie möglich die Funktion verfolgen. Das Ausmaß und die Wirksamkeit der Überwachung sollten vor Beginn der Entwicklung des Verfahrens der Sortierprüfung optimiert werden. Der Überwachungsprozess sollte die Analyse der eigentlichen Ausfallursache erleichtern.

Eine typische provozierende Sortierprüfung selbst bedarf einer relativ kurzen Dauer der Belastungsanwendung von 3 min bis zu 1 h. Zusätzliche Zeit wird für den Aufbau der Prüfeinrichtungen und der Überwachungsgeräte benötigt.

Die HASS-Sortierprüfung ist in idealer Weise für die Pilotfertigung oder den Fertigungsanlauf geeignet, d. h., wenn die Fertigungsrate noch gering ist und eine 100-%-Sortierprüfung leicht verwirklicht werden könnte. Die HASS-Sortierprüfung darf während der normalen Fertigung für sehr kritische, in kleinen Stückzahlen gefertigte Produkte weitergeführt werden.

HASA ist ein Prozessüberwachungswerkzeug, bei welchem ein Muster eines Fertigungsloses der provozierenden Sortierprüfung unterzogen wird, um mögliche Schwachstellen zu erkennen. HASA-Prozessüberwachung wird häufig durchgeführt, bevor das Fertigungslos freigegeben wird. Die HASA-Prozessüberwachung ersetzt häufig die HASS-Sortierprüfungen bei ausgereifter Produktfertigung. Die HASA-Prozessüberwachung wird bei erreichter Wirksamkeit der Fertigungskontrollen weiter reduziert und sogar ganz eingestellt.

5.1.3.2 Wahl der Belastungen und ihre Größenordnung

Die Belastungen sollten so gewählt werden, dass sie nicht die Funktionalität, Werkstoffeigenschaften oder die Lebensdauer fehlerfreier Hardware beeinträchtigen. Die Anfangsniveaus werden anhand von in HALT-Prüfungen gewonnenen Informationen bestimmt.

Die provozierende Sortierprüfung wird mit Belastungsniveaus durchgeführt, die etwas unterhalb der Betriebsgrenzen liegen, da der UUT während der Sortierprüfung auf seine Funktion hin überwacht werden müssen. Üblicherweise wird die Temperaturbelastung um 5 °C und die Schwingbelastung um 2 g Effektivwert (19,62 m/s²) reduziert. Bevor die provozierende Sortierprüfung für HASS/HASA angewendet wird, sollte verifiziert werden, dass die provozierende Sortierprüfung die Produktlebensdauer im Betrieb nicht wesentlich verringert. Dieses kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass man ein Muster 10 Mal der Sortierprüfung aussetzt.

5.1.4 Technische Gesichtspunkte der HALT- und HASS-Prüfungen

5.1.4.1 Vorteile der HALT- und HASS-Prüfungen

Die Vorteile von HALT- und HASS-Prüfungen sind die folgenden:

- verifizierte und selektiv erhöhte Entwurfsmargen für die Verbesserung der Zuverlässigkeit;
- Stichprobenumfang zur Bestimmung einer speziellen Ausfallart ist klein;
- schnelle Bestimmung dominanter Ausfallarten für spezielle Stressfaktoren und leicht kombinierbare Belastungen (die Prüfdauer beträgt üblicherweise 3 Tage);
- wirksame abwägende Analyse und daraus folgende Informationen und Bestimmung der notwendigen Korrekturmaßnahmen;
- schnelle Verifizierung der Korrekturmaßnahmen;
- wirksame kurzfristig anberaumte Sortierprüfung in der Fertigung;
- Beseitigung schwacher oder fehlerhafter Bauelemente (HASS-Prüfung) aus der Grundgesamtheit (Qualitäts- und Zuverlässigkeitsverbesserung).

5.1.4.2 Nachteile der HALT- und HASS-Prüfungen

Die Nachteile der HALT- und HASS-Prüfungen sind die folgenden:

- a) Möglichkeit des Hervorrufens von Ausfallarten, die im üblichen Produkteinsatz nicht üblicherweise beobachtet würden;
- b) Potenzial für eine zu weit gehende Verbesserung der Entwurfsmargen (Überdimensionierung);
- c) die sich ergebende Zuverlässigkeit ist nicht bekannt;
- d) kein statistisches Vertrauen in die Prüfergebnisse (Über- oder Unterschätzung der Entwurfsmargen);
- e) bei der Prüfung werden nicht alle interaktiven Effekte multipler Ausfallarten adressiert;
- f) unpassend für großvolumige Produkte, kleine Produkte und für in unterschiedlicher Weise zerbrechliche Produkte;
- g) begrenzte Anzahl von Belastungsarten (hauptsächlich Temperatur, Schwingen, Schocken und Temperaturwechsel);
- h) Unfähigkeit, die Entwurfsgrenzen für eine Belastung zu bewerten, die durch Synergien mit anderen Belastungsarten beeinflusst sind, welche nicht von den HALT-Prüfungsarten verursacht werden.

5.2 Typen B und C – Verfahren beschleunigter Prüfungen quantitativer Art

5.2.1 Zweck quantitativer beschleunigter Prüfungen

Der Zweck quantitativer beschleunigter Prüfungen ist es, eine oder mehrere Zuverlässigkeitsgrößen zu schätzen, z. B. Ausfallrate, Ausfall- oder Überlebenswahrscheinlichkeit oder Dauer bis zum Ausfall (TTF).

Häufig ist der Zweck quantitativer beschleunigter Prüfungen die Bestimmung der Lebensdauer von Bauelementen mit begrenzter Lebensdauer (Verschleiß) oder die Bestimmung (Quantifizierung) der Zuverlässigkeit von Systemen und die Verbesserung der Zuverlässigkeit von Systemen und Bauelementen. Hierfür ist die Weibull-Analyse sehr zweckmäßig (siehe IEC 61649).

5.2.2 Physikalische Grundlagen für Verfahren quantitativer beschleunigter Prüfungen nach Typ B

5.2.2.1 Allgemeines

Das Ziel beschleunigter Prüfungen ist die Messung der Zuverlässigkeit und die Verifizierung eines annehmbaren Zuverlässigkeitsverhaltens des Produkts innerhalb einer kurzen Zeit. Somit ist es das Ziel beschleunigter Prüfungen, die Schadensanhäufungsrate für relevante sich wiederholende Belastungen und durch Verschleiß bedingte Ausfallmechanismen zu beschleunigen (als „relevanten Ausfallmechanismus“ bezeichnet man einen Ausfall, dessen Auftreten unter Lebenszyklus-Bedingungen erwartet wird).

Um Zuverlässigkeitsprüfungen zu beschleunigen, bedarf es eines eingehenden Verständnisses potenzieller Ausfallmechanismen und der betrieblichen und der umweltbedingten Beanspruchungen des Produkts oder Systems. Dieses Verständnis kann auch durch eine Ausfallartenanalyse des entwickelten Produkts unter Berücksichtigung des beabsichtigten Einsatzprofils mittels einer FMEA (siehe IEC 60812 [2]) erlangt werden. Wirksame Maßnahmen können nicht nur ergriffen werden, um das Auftreten dieser Ausfallmechanismen bei vorbestimmten Lebensdauerbelastungen oder Betriebsbelastungen zu verhindern, sondern auch, um diese Mechanismen wirksam während einer beschleunigten Prüfung zur Produktverbesserung zu provozieren. Beschleunigte Verschleiß- oder Zuverlässigkeits-Prüfungen sind erfahrungsgemäß nützliche Maßnahmen, um die Zuverlässigkeit hochzuverlässiger elektronischer, elektromechanischer und mechanischer Systeme zu beurteilen. Die Anwendung erhöhter Belastungen geschieht üblicherweise zu folgendem Zweck:

- a) Die Konstruktion robuster machen und den Fertigungsprozess verbessern durch systematische Prüfung mit schrittweiser Laststeigerung und Erhöhung der Belastungsmargen durch korrigierende Maßnahmen (Zuverlässigkeitswachstumsprüfung);
- b) Durchführung beschleunigter Lebensdauerprüfungen im Laboratorium, um die Zuverlässigkeit im Betrieb zu messen und zu verifizieren.

Der Grad der Beschleunigung, üblicherweise mit Beschleunigungsfaktor (AF oder A) bezeichnet, ist definiert als das Verhältnis der Lebensdauer unter Betriebsbedingungen zur Lebensdauer unter beschleunigten Prüfbedingungen. Dieser Beschleunigungsfaktor ist erforderlich, um die Zuverlässigkeitsmaßgrößen (wie etwa Dauer bis zum Ausfall und Ausfallrate) quantitativ von der beschleunigten Prüfumgebung zur Einsatzumgebung mit einem vernünftigen Maß an Vertrauen extrapolieren zu können. Der Beschleunigungsfaktor hängt von den Hardwareparametern des UUT (z. B. Werkstoffeigenschaften, Aufbau des Produktes), Bedingungen während Belastungen im Betrieb, von Bedingungen während der beschleunigten Prüfung und den maßgeblichen Ausfallmechanismen ab. Somit hat jede maßgebliche Ausfallart (unter der Annahme, dass es sich um ein Ergebnis eines Ausfallmechanismus handelt) des UUT ihren eigenen Beschleunigungsfaktor, und die Prüfbedingungen (z. B. Betriebszyklus, Belastungsniveau, Belastungshistorie, Prüfdauer) müssen auf diese Faktoren ausgerichtet und zugeschnitten werden.

Bei der ausfallorientierten Vorgehensweise wird jede Ausfallart getrennt betrachtet, und die Marge zur Lebensdauer oder zur geforderten Zuverlässigkeit wird für jede Art einzelnen verifiziert. In manchen Fällen verbleibt es bei einem qualitativen Ergebnis. Mit dieser Vorgehensweise erhält jede Ausfallart ihre eigene Ausfallverteilung und Ausfallrate. In anderen Fällen werden die Ergebnisse kombiniert zu einer geschätzten Zuverlässigkeit des ganzen Produkts.

Bei der Planung von Prüfungen sollten die möglichen Ausfallarten in der Einheit aufgelistet werden. Die Prüfung wird dann derart mit Belastungsniveaus und Dauern geplant, dass die Ausfallarten in der Prüfung überwacht werden sollten, wenn diese im Produkt vorhanden sind. Für diese Planung dürfen empirische Faktoren aus früheren Produkten, von den Lieferanten der Bauelemente oder aus der Literatur verwendet werden, um den Beschleunigungsfaktor der Prüfung zu schätzen. Nach Durchführung der Prüfung sind die tatsächlichen Ausfallarten bekannt, und die Prüfung kann für jede Ausfallart separat analysiert werden. Es wird die Anwendung einer Prüfanordnung empfohlen, bei welcher die empirischen Faktoren aus der Prüfung selbst geschätzt werden können. Siehe Anhänge F und G.

Typ B-Prüfungen können durch Erhöhung der Niveaus einer Vielzahl von Belastungsarten durchgeführt werden wie beispielsweise thermische Belastungen (z. B. Wärme, Temperaturwechsel und Geschwindigkeit von Temperaturwechseln), chemische Belastungen (z. B. Luftfeuchte, korrosive Chemikalien wie Säuren und Salz), elektrische Belastungen (z. B. Dauerspannung oder transiente Überspannung, Strom, Leistung) und mechanische Belastungen (z. B. quasi-statische, zyklische, mechanische Verformungen, Schwingen und Schock/Stoß/Schlag). Die Umgebung beschleunigter Prüfungen darf eine Kombination dieser Belastungen einschließen. Die Interpretation der Ergebnisse für kombinierte Belastungen und Extrapolierung der Ergebnisse auf die Bedingungen des Lebenszyklus erfordern ein quantitatives Verständnis der relativen Wechselwirkungen der verschiedenen Prüfbelastungen und des Beitrags jeder Belastungsart zur Gesamtschädigung.

5.2.2.2 Vorteile der Typ B-Prüfungen

Die beschleunigten Belastungsprüfungen liefern quantitative Informationen über die Zuverlässigkeit des geprüften Produkts:

- Diese Prüfungsart kann gestaltet werden für:
 - ausgewählte Ausfallarten (z. B. aus FMEA), um die Gesamtzuverlässigkeit mit vernünftigem Vertrauen zu beurteilen;
 - kombinierte Belastungen, auch, um die Wechselwirkungen solcher Belastungen und eine realistische Beurteilung der Produktzuverlässigkeit zu simulieren.
- Eine Prüfbeschleunigung kann so wirksam erfolgen, dass die Prüfung die kumulative Schädigung im Betrieb nachbildet.

5.2.2.3 Nachteile der Typ B-Prüfungen

- Ein Risiko besteht darin, dass die Belastungsbeschleunigung die physikalischen Eigenschaften der im Produkt verwendeten Werkstoffe überschreitet und einen nicht vorhergesagte Schädigung verursacht.
- Ein Risiko besteht darin, dass die Beschleunigung der kombinierten Belastungen zusätzliche, unvorhergesehene Schädigungen am Produkt anrichtet, die sich im tatsächlichen Betrieb nicht ergeben hätten.
- Die Grundlage für beschleunigte Prüfung ist nicht eine einzelne Belastung, sondern im Allgemeinen eine multiple Belastung, welche nach Anwender und Standort variiert. Dies muss bei der Quantifizierung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

5.2.3 Typ C-Prüfungen, Zeitkompression (C_1) und Ereigniskompression (C_2)

5.2.3.1 Typ C_1 -Prüfungen

5.2.3.1.1 Allgemeines

Zeitkompression wird durch das Weglassen der „Aus-Zeiten“ erzielt (z. B. Zeiten ohne Betrieb), wobei der Lastzyklus komprimiert wird, indem nur die Ein-Zeiten adressiert werden. Wenn Produkte einem breiten Spektrum von Belastungen ausgesetzt sind, verursachen üblicherweise außerdem die höchsten Belastungen (die Primärbelastungen) die größte Schädigung, und es gibt eine Reihe weiterer Einsatzbelastungen, von denen angenommen wird, dass sie verglichen mit der Primärbelastung im Produkt nur einen vernachlässigbaren Schaden anrichten. Von jeder Beanspruchung durch eine Belastung unterhalb einer gewählten Schädigungsgrenze darf angenommen werden, dass sie lediglich vernachlässigbare Schädigung verursacht und diese aus dem Prüfprogramm gestrichen werden kann. Dies gilt insbesondere für mechanische Ermüdung und wird häufig bei der beschleunigten Prüfung auf strukturelle Ermüdung eingesetzt (siehe IEC 60605-2).

Ein Beispiel einer Lastzykluskompression ist, wenn die Prüfdauer 24 h je Tag beträgt, wogegen das Produkt in der tatsächlichen Betriebsumgebung lediglich 8 h je Tag betrieben wird. Daraus ergibt sich ein Zeitbeschleunigungsfaktor von 3. Jeder Tag in der Prüfung entspricht 3 Tagen im tatsächlichen Einsatz.

5.2.3.1.2 Vorteile zeitlich komprimierter Prüfungen

Produkte mit einer im Vergleich zur Kalenderzeit minimalen oder nur kurzen Einsatzdauer können innerhalb sehr vernünftiger Prüfdauern im Verhältnis zu ihrer geforderten Lebensdauer (z. B. Büroeinrichtungen, Kraftfahrzeuge, Erntemaschinen usw.) geprüft werden. So wird beispielsweise ein Schneepflug nur in einer Saison im Jahr eingesetzt, und auch nur dann, wenn sich genügend Schnee angehäuft hat, welcher den Einsatz rechtfertigt. Selbst wenn er eingesetzt wird, darf davon ausgegangen werden, dass er sich durchschnittlich 2 h bis 3 h im eingeschalteten Zustand befindet. Es gibt mehrere schädigende Primärbelastungen wie etwa Schwingen, Belastung im Motor, Verschleiß der Schaufeln usw. Für den Rest des Jahres wird er in einem Schuppen aufbewahrt und ist so vor extremen Witterungseinflüssen geschützt. Somit reicht für einen Schneepflug, für den eine Lebensdauer von 10 Jahren gefordert ist, der aber effektiv viermal je Monat während dreier Monate und dann für die Dauer von 2 h eingesetzt wird, zum Nachweis der geforderten Einsatzdauer eine Prüfdauer von 240 h. Daher würde eine Prüfung mit 300 h eine gute Marge für den Nachweis der Zuverlässigkeit des Schneepflugs liefern.

Bei einer vergleichsweise kurzen Prüfdauer bei nominalen Belastungen gibt es keinen Grund, die Belastungen zu erhöhen; somit besteht auch keine Notwendigkeit, Beschleunigungsfaktoren zu bestimmen, andernfalls besteht das Risiko einer Überlastung des UUT.

5.2.3.1.3 Nachteile zeitlich komprimierter Prüfungen

Eine Konzentration ausschließlich auf die Betriebsdauer bedeutet, dass man lediglich die Betriebsumgebung mit ihren zugehörigen Ausfallarten berücksichtigt, während Ausfallarten aufgrund von Umgebungseinflüssen im „ausgeschalteten“ Zustand so übersehen werden könnten. Solche Ausfallarten könnten sogar für das Produkt noch schädigender sein, da sie das Ergebnis von Belastungen sind, die zwar in ihrer Stärke erheblich geringer sind als die im Einsatz des Produktes auftretenden Belastungen, die dafür aber über eine erheblich längere Dauer auftreten und so dieselben oder sogar noch größere kumulative Schädigungen hervorrufen als die im Einsatz anliegenden Belastungen.

Unter Berücksichtigung des gleichen Beispiels des Schneepflugs gibt es in seiner Lebensdauer von 10 Jahren 87 600 h, in denen der Schneepflug für ungefähr 20 000 h extremen kalten Temperaturen ausgesetzt ist, die zur Ausfallart Versprödung von Werkstoffen führen; sehr hohen Temperaturen für ungefähr 6 000 h, die zur Alterung von Kunststoffteilen, Farben und Klebemitteln führen; Temperaturwechsel für ungefähr 7 200, welche multiple strukturelle Schäden verursachen und die Aussetzung gegenüber Luftfeuchte für mindestens 30 000 h je Jahr, welche Korrosion erzeugt. Prüfung ausschließlich unter Einsatzbedingungen würde den Einfluss der Umgebung im ausgeschalteten Zustand gänzlich übersehen.

Bei Produkten, bei denen die aktive Zeit erheblich kürzer als die passive Zeit (Aus-Zeit) ist, ist es erforderlich, Prüfungen mit beschleunigter Zeit für die Betriebsperioden mit Prüfungen zu kombinieren, welche die passiven Perioden beschleunigen, z. B. Korrosionsprüfungen, Feuchteprüfungen usw. In manchen Fällen kann das Produkt vorkonditioniert werden, bevor die Zeitkompressionsprüfungen angefangen werden, indem einige Belastungen aus den passiven Perioden angewendet werden wie etwa Nässe, kalte Lagerung, Sonneneinstrahlung oder mechanische Belastungen wie Schwingen und Schocks, welche die Bedingungen im ausgeschalteten Zustand simulieren. Der Zweck solcher Vorkonditionierung ist es, die Wechselwirkung der Ausfallarten im aktiven Einsatz mit den während der Lagerung erwarteten Ausfallarten zu simulieren, welche sich wiederum stark auf die Ausfallarten im Einsatz auswirken. So würde sich beispielsweise Korrosion am Schneepflug sehr stark auf den Einfluss von Schwingungen auf die Struktur des Produkts auswirken.

5.2.3.2 Typ C₂-Prüfung

5.2.3.2.1 Allgemeines

Bei den Ereigniskompressionsprüfungen werden Wiederholungen von Ereignissen mit erheblich höheren Raten als den im aktuellen Betrieb des Produkts wirkenden Belastungen durchgeführt. Beispielsweise können die Ein-/Ausschaltzyklen bei der vorgenannten Einheit (Schneepflug) zu einer Prüfung von wenigen Stunden komprimiert werden, indem diese Ein-/Ausschaltzyklen laufend wiederholt werden. Die dadurch geforderten 120 Ein-/Ausschaltzyklen während der zehnjährigen Lebensdauer wären somit eine sehr kurze Prüfung zum Nachweis der Zuverlässigkeit.

Typ C₂-Prüfungen können mit den Zeitkompressionsprüfungen zur weiteren Prüfbeschleunigung kombiniert werden. Dies könnte zu einer sehr kurzen Prüfung zum Nachweis „hoher Zuverlässigkeit“ führen, wobei jedoch bei der Durchführung einer solchen kombinierten Beschleunigung einige wichtige Vorsichtsmaßnahmen beachtet werden müssen. Beispielsweise kann die schnelle Anwendung wiederholter Belastungen die Prüfergebnisse durch variierende, kumulative Schädigungen beeinflussen.

Die Ereigniskompressionsprüfungen können ebenfalls mit den Belastungsbeschleunigungsprüfungen zur Verkürzung der Prüfdauer kombiniert werden. Bei der Vorbereitung solcher Prüfungen muss vorsichtig gearbeitet werden, da die Zeitkompression sich auf die Belastungsbeschleunigung auswirken kann. Beispielsweise führen schnelle Ein-/Ausschaltzyklen zu sehr kurzen Verweildauern im Zustand „Aus“, wodurch es dem UUT nicht möglich ist, korrekt abzukühlen. Dies kann dann zu einer zusätzlichen thermischen Beschleunigung des UUT führen und Ausfälle provozieren. Ebenfalls kann solch eine Beschleunigungsart Ausfälle vernachlässigen, die durch Nichtverwendung wie Werkstoffverschlechterungen entstehen könnten.

5.2.3.2.2 Vorteile von Typ C₂-Prüfungen

Der Vorteil der Typ C₂-Prüfung ist, dass man durch Erhöhung der Belastungswiederholung in kurzer Zeit die kumulative Schädigung innerhalb einer viel kürzeren Zeit als im bestimmungsgemäßen Betrieb nachbilden kann.

5.2.3.2.3 Nachteile

Diese Art der Prüfung kann auch einige negative Auswirkungen haben, da kontinuierliche Belastungen in solch einer Weise angelegt werden, dass dadurch Ausfälle provoziert werden könnten, wie sie im normalen Einsatz nicht auftreten würden. Beispielsweise könnte in mechanischen Teilen mit Verschleißmechanismen, bei welchen während des Betriebs Reibung erzeugt wird, eine während der Prüfung andauernde Reibung Wärme erzeugen, durch die weitere Ausfälle provoziert werden, die im bestimmungsgemäßen Betrieb durch die Abkühlperioden verzögert würden. Ein weiteres Beispiel könnte durch Belastungswiederholung erzeugte Werkstoffermüdung sein, ohne dass dem Werkstoff die Möglichkeit der Entspannung gegeben würde.

5.3 Ausfallmechanismen und Gestaltung der Prüfung

Auf die Bedeutung einer korrekten Ausfallanalyse muss verstärkt hingewiesen werden. Das Verständnis der Ausfallmechanismen ist unerlässlich für die erfolgreiche Gestaltung und Durchführung beschleunigter Lebensdauerprüfungen oder anderer Prüfungen, wie dies in den an der Physik der Ausfälle orientierten Entwurfs- und Vorhersagemethodiken befürwortet wird (vorausgesetzt, die Vorhersagen bedienen sich dieser Vorgehensweise der Physik der Ausfälle). Um dies zu erreichen, muss eine rationale Methode ermittelt werden, wie man die Ergebnisse beschleunigter Prüfungen quantitativ auf die Zuverlässigkeit der Ausfallraten unter Betriebsbedingungen beziehen kann unter Verwendung einer wissenschaftlichen Beschleunigungs-transformation. Der Betrag der durch eine beschleunigte Prüfung erzielten Zeitkompression der Prüfdauer muss auf der Grundlage der Physik der maßgeblichen Ausfallarten quantitativ bestimmt werden. Beschleunigte Lebensdauerprüfungen versuchen, die Zeit zu reduzieren, die zum Beobachten von Ausfällen erforderlich sind. In manchen Fällen ist es möglich, dies ohne tatsächliche Änderung der Gleichung für die momentane Ausfallrate zu tun. Ändert sich jedoch die momentane Ausfallrate, wird dies ein „proportionales Ausfallmodell“ (en: proportional hazard model) genannt. Mathematisch ausgedrückt kann man die Unterschiede zwischen beiden in den folgenden beiden Gleichungen für eine Weibull-Verteilung erkennen, in denen $H_{AL}(t)$ die Verteilungsfunktion (en: cumulative hazard function) der beschleunigten Lebensdauer ist, $H_{PH}(t)$ die Verteilungsfunktion für das proportionale Ausfallmodell (en: hazard model) ist, AF ein Beschleunigungsfaktor aufgrund eines gewissen Stimulus ist und $(t/\eta)^\beta$ die nicht modifizierte Verteilungsfunktion für eine Weibull-Verteilung (t = Zeit, η = charakteristische Lebensdauer und β = Formparameter) ist.

$$H_{AL}(t) = \left(\frac{AF \cdot t}{\eta} \right)^\beta \quad (1)$$

$$H_{PH}(t) = AF \cdot \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \quad (2)$$

In $H_{AL}(t)$ ist die Zeit eine lineare Funktion des Beschleunigungsfaktors AF . In $H_{PH}(t)$ wird die momentane Ausfallrate selbst verändert. Durch Umstellung der Gleichung für $H_{PH}(t)$ ist zu erkennen, dass die Zeit eine nichtlineare Funktion des Beschleunigungsfaktors ist. Der Unterschied zwischen diesen beiden Arten beschleunigter Prüfungen ist, dass $H_{AL}(t)$ lediglich die Kenntnis des Verhältnisses der tatsächlichen Prüfdauer zur Kalenderzeit (nicht beschleunigte Zeit) erfordert, verursacht durch den angelegten Umweltstimulus, wohingegen $H_{PH}(t)$ Kenntnis über die Art und Weise erfordert, wie sich AF als eine Funktion des Formparameters β ändert. Für die Weibull-Verteilung, von welcher die Exponentialverteilung ein Sonderfall ist, ist die resultierende Verteilung für jede dieser beiden Bedingungen immer noch eine Weibull-Verteilung.

Gleichung (1) wird üblicherweise angewendet, wenn die Beschleunigung über die erhöhte Wiederholungsrate der angewendeten wiederholten Belastung wie etwa Betriebszyklen erfolgt. Gleichung (2) wird bevorzugt, wenn die Beschleunigung auf die physikalischen Zustände der in Prüfung befindlichen Einheit, wie etwa thermische Beschleunigung (Brownsche Bewegung), angewendet wird, wobei der Beschleunigungsfaktor selbst von der Verteilung abhängt.

Vorgenannte Ausführungen zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Belastungsbeschleunigung zu einer Verkürzung der Dauer bis zum Ausfall führt, indem die Belastungsniveaus über die im bestimmungsgemäßen Betrieb der Einheit hinaus erwarteten Belastungen erhöht werden.

5.4 Bestimmung von Belastungsniveaus, Profilen und Kombinationen für Betrieb und Prüfung – Belastungsmodellierung

5.4.1 Allgemeines

Gleichermaßen wichtig ist es, die betriebsbedingten und die umweltbedingten Belastungen zu verstehen, welche die Ausfallarten auf der Grundlage der Physik des Ausfalls verursachen. Die Belastungsmodellierung dient als Ausgangspunkt auf der Grundlinie, von der aus die Beschleunigung erfolgt. Wie diese Grundlinie behandelt wird, ist extrem wichtig, wenn die Belastungen je nach Produktverwendung variieren.

5.4.2 Schrittweises Verfahren

Das folgende Verfahren muss angewendet werden:

- Ermittlung der relevanten Belastungsfaktoren im Betrieb, einschließlich Lagerung und Transport (siehe Normenreihe IEC 60721);
- Bestimmung, welche Belastungen beschleunigt werden sollen, welche nominal sind und welche weggelassen werden können, z. B. weil sie durch andere Prüfungen abgedeckt sind;
- Bestimmung, ob die Belastungen gleichzeitig angelegt werden können, um so Wechselwirkungen der Belastungen zu berücksichtigen oder ob diese nacheinander angelegt werden müssen, z. B. in einem Prüfzyklus (siehe IEC 60605-2);
- Bestimmung, ob der Beschleunigungsfaktor (AF) aus der Prüfung heraus geschätzt werden kann oder Abschätzung der Beschleunigungsfaktoren aus der Prüfung anhand maßgeblicher Beschleunigungsgleichungen und maßgeblicher empirischer Faktoren;
- Ermittlung der Stichprobengröße (siehe IEC 61649, IEC 61123 und IEC 61124);
- Durchführung der Prüfung (siehe IEC 60300-3-5);
- Analyse der Ausfälle;
- Analyse der Prüfung – jede Ausfallart einzeln (siehe IEC 61649, IEC 61710 und IEC 61124);
- Berichten der Prüfungsergebnisse (siehe IEC 60300-3-5).