

DIN EN 61164

ICS 03.120.01; 29.020

**Zuverlässigkeitswachstum –
Statistische Prüf- und Schätzverfahren (IEC 61164:2004);
Deutsche Fassung EN 61164:2004**

Reliability growth –
Statistical test and estimation methods (IEC 61164:2004);
German version EN 61164:2004

Croissance de la fiabilité –
Tests et méthodes d'estimation statistiques (CEI 61164:2004);
Version allemande EN 61164:2004

Gesamtumfang 56 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Beginn der Gültigkeit

Die von CENELEC am 2004-04-01 angenommene EN 61164 gilt als DIN-Norm ab 2004-11-01.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN IEC 61164:2002-02.

Für die vorliegende Norm ist das nationale Arbeitsgremium K 132 „Zuverlässigkeit“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE zuständig.

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

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zum Jahr 2011 unverändert bleiben soll. 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.

Zuverlässigkeitswachstum
Statistische Prüf- und Schätzverfahren
(IEC 61164:2004)

Reliability growth
Statistical test and estimation methods
(IEC 61164:2004)

Croissance de la fiabilité
Tests et méthodes d'estimation statistiques
(CEI 61164:2004)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2004-04-01 angenommen. Die 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 Zentralsekretariat 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 Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

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

CENELEC

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

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 56/920/FDIS, zukünftige 2. Ausgabe von IEC 61164, ausgearbeitet von dem IEC TC 56 „Dependability“, wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2004-04-01 als EN 61164 angenommen.

Diese Europäische Norm sollte in Verbindung mit EN 61014:2003 benutzt werden.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2005-01-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2007-04-01

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 61164:2004 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
Einführung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Formelzeichen	7
5 Zuverlässigkeitswachstumsmodelle in Entwicklung und Prüfung	11
6 Zuverlässigkeitswachstumsmodelle in der Produkt- bzw. Systementwicklung	12
6.1 Modifiziertes Potenzgesetzmodell für die Planung des Zuverlässigkeitswachstums in der Produktentwicklung	12
6.2 Modifiziertes Bayes'sche IBM-Rosner-Modell für die Planung des Zuverlässigkeitswachstums in der Entwicklung	15
7 Planung und Verfolgung des Zuverlässigkeitswachstums in der Produktprüfung	17
7.1 Kontinuierliche Zuverlässigkeitswachstumsmodelle	17
7.2 Diskretes Zuverlässigkeitswachstumsmodell	19
8 Verwendung des Potenzgesetzmodells bei der Planung von Prüfprogrammen zur Zuverlässigkeitsverbesserung	21
9 Statistische Prüf- und Schätzverfahren für das kontinuierliche Potenzgesetzmodell	22
9.1 Übersicht	22
9.2 Wachstumsprüfungen und Schätzung der Parameter	22
9.3 Anpassungsprüfung	26
9.4 Vertrauensbereiche des Formparameters	28
9.5 Vertrauensbereiche der aktuellen MTBF	30
9.6 Projektionstechnik	31
Anhang A (informativ) Beispiele für Planung und analytische Modelle in der Entwicklung und Prüfung eines Produkts	36
A.1 Planung des Zuverlässigkeitswachstums in der Produktentwicklung	36
A.1.1 Beispiele für die Planung mit einem Potenzgesetzmodell	36
A.1.2 Modellerstellung und Beobachtung des Zuverlässigkeitswachstums	36
A.2 Beispiel eines Bayes'schen Zuverlässigkeitswachstumsmodells in der Produktentwicklung	39
A.3 Ausfalldaten von diskreten Versuchen	40
A.4 Beispiele von Zuverlässigkeitswachstum durch Prüfung	40
A.4.1 Einführung	40
A.4.2 Aktuelle Zuverlässigkeitsbewertung	41
A.4.3 Projizierte Zuverlässigkeitsschätzungen	42
Anhang B (informativ) Potenzgesetzmodell für das Zuverlässigkeitswachstum – Hintergrundinformation	48
B.1 Das Duane-Postulat	48
B.2 Das Potenzgesetzmodell	48

	Seite
B.3 Modifiziertes Potenzgesetzmodell für die Planung des Zuverlässigkeitswachstums in der Produktentwicklung	49
B.4 Modifiziertes Bayes'sches IBM-Rosner-Modell für die Planung des Zuverlässigkeitswachstums in der Produktentwicklung	50
Literaturhinweise	53
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	54

Bilder

Bild 1 – Geplante Verbesserung der durchschnittlichen Ausfallrate oder Überlebenswahrscheinlichkeit.....	11
Bild A.1 – Geplantes und erzieltes Zuverlässigkeitswachstum – Beispiel.....	38
Bild A.2 – Geplantes Zuverlässigkeitswachstum bei Verwendung eines Bayes'schen Zuverlässigkeitswachstumsmodells	39
Bild A.3 – Streudiagramm der erwarteten und beobachteten Prüfdauern bei Ausfall, nach den Daten der Tabelle A.2, mit dem Potenzgesetzmodell.....	46
Bild A.4 – Beobachtete und geschätzte akkumulierte Ausfälle bzw. Prüfdauer, nach den Daten der Tabelle A.2, mit dem Potenzgesetzmodell.....	47

Tabellen

Tabelle 1 – Kategorien von Zuverlässigkeitswachstumsmodellen mit Angabe des Abschnitts.....	12
Tabelle 2 – Kritische Werte für eine Anpassungsprüfung nach Cramér-von-Mises bei 10 % Signifikanzniveau	33
Tabelle 3 – Zweiseitiger 90-%-Vertrauensbereich für MTBF bei Type I-Prüfungen	34
Tabelle 4 – Zweiseitiger 90-%-Vertrauensbereich für MTBF nach Type II-Tests.....	35
Tabelle A.1 – Berechnung des Planungsmodells für das Zuverlässigkeitswachstum in der Produktentwicklung	37
Tabelle A.2 – Vollständige Daten – Alle zu wertenden Ausfälle und akkumulierte Prüfdauern für die Typ I-Prüfung.....	44
Tabelle A.3 – Gruppierte Daten für Beispiel 3, abgeleitet aus Tabelle A.2	44
Tabelle A.4 – Vollständige Daten für projizierte Schätzungen in Beispiel 4 – Alle zu wertenden Ausfälle und akkumulierte Prüfdauern	45
Tabelle A.5 – Einzelne Ausfallarten in Kategorie B, aus Tabelle A.4, mit Ausfallzeitpunkt, Zeitpunkt des ersten Auftretens, beobachteter Anzahl und Wirksamkeitsfaktoren.....	45

Einführung

In dieser Internationalen Norm werden das Potenzgesetzmodell für das Zuverlässigkeitswachstum und zugehörige Vorhersagemodelle beschrieben, und es wird schrittweise zu deren Anwendung angeleitet. Es gibt verschiedene das Zuverlässigkeitswachstum beschreibende Modelle, davon wird das Potenzialgesetzmodell mit am häufigsten verwendet. Diese Norm enthält Verfahren, an Hand derer man die in den Abschnitten 4, 6 und 7 von IEC 61014 genannten Größen schätzen kann.

Es sind zwei Arten von Eingaben erforderlich. Die Erste ist für das Planen des Zuverlässigkeitswachstums durch Analyse und Entwurfsverbesserungen in der Entwicklungsphase notwendig. Hierzu verwendet man die Dauer der Entwicklungsphase, die Anfangszuverlässigkeit, das Zuverlässigkeitsziel und die geplanten Entwurfsverbesserungen in der erwarteten Größenordnung. Die zweite Eingabeart ist für das Zuverlässigkeitswachstum in der Projektvalidierungsphase notwendig. Hierzu benötigt man einen Datensatz mit akkumulierten Prüfdauern, in denen sich zu wertende Ausfälle ereigneten oder beobachtet wurden, für ein einzelnes System und den Zeitpunkt des Prüfungsendes, soweit vom Zeitpunkt des letzten Ausfalls verschieden. Es wird davon ausgegangen, dass die Erfassung der Eingabedaten in das Modell nach Beendigung vorgelagerter Prüfungen beginnt, wie zum Beispiel Vorbehandlungen, mit denen die Anfangsausfallintensität des Produkts stabilisiert werden soll.

In früheren Prüfungen geschätzte Modellparameter dürfen zum Planen und Vorhersagen des Ablaufs zukünftiger Zuverlässigkeitswachstumsprogramme verwendet werden, vorausgesetzt die Bedingungen sind ähnlich.

Für einige der Verfahren können Rechnerprogramme von Nöten sein, aber diese sind nicht übermäßig komplex. In dieser Norm werden Algorithmen vorgestellt, für die Rechnerprogramme leicht zu erstellen sein sollten.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm enthält Modelle und numerische Verfahren zur Bewertung des Zuverlässigkeitswachstums auf Grundlage der Ausfalldaten, die in einem Programm für das Zuverlässigkeitswachstum erhalten wurden. Diese Verfahren behandeln Wachstum, Schätzung und Vertrauensbereiche für die Produktzuverlässigkeit und Anpassungsprüfung.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die zitierte Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60050-191:1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 191: Dependability and quality of service*.

IEC 60300-3-5:2001, *Dependability management – Part 3-5: Application guide – Reliability test conditions and statistical test principles*.

IEC 60605-4, *Equipment reliability testing – Part 4: Statistical procedures for exponential distribution – Point estimates, confidence intervals, prediction intervals and tolerance intervals*.

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

IEC 61014, *Programmes for reliability growth*.

3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Internationalen Norm gelten die Begriffe in IEC 60050(191) und IEC 61014 zusammen mit den folgenden.

3.1

Zuverlässigkeitsziel

gewünschtes Maß der Zuverlässigkeit, das das Produkt am Ende des Zuverlässigkeitswachstumsprogramms haben sollte

3.2

Anfangszuverlässigkeit

Zuverlässigkeit des Produkts, die in frühen Entwicklungsstufen geschätzt wurde, ehe potenzielle Ausfallarten oder deren Ursachen durch Entwicklungsverbesserungen abgeschwächt werden konnten

3.3

Zuverlässigkeitswachstumsmodell für die Entwicklungsphase

mathematisches Modell, das potenzielle Entwicklungsverbesserungen mit ihrer Größenordnung berücksichtigt, um mathematisch ein Zuverlässigkeitswachstum von Anfang bis Ende der Entwicklungsphase auszudrücken

3.4

durchschnittliche Produktausfallrate

durchschnittliche Produktausfallrate, die aus der für eine vorbestimmte Zeitperiode geschätzten Zuverlässigkeit berechnet wird

ANMERKUNG Zeitliche Änderungen der Ausfallrate sind Ergebnis der geänderten Konstruktion.

3.5**verzögerte Änderung**

Korrekturmaßnahme, die am Ende der Prüfung im Produkt vollzogen wird

ANMERKUNG Während der Prüfung wird keine verzögerte Änderung eingebracht.

3.6**Faktor für die Wirksamkeit der Verbesserung**

Anteil, um den die Intensität eines systematischen Ausfalls durch korrektive Änderung verringert wird

3.7**Typ I-Prüfung beziehungsweise Typ I-Test**

durch Zeitablauf beendete Prüfung

Zuverlässigkeitswachstumsprüfung, die zu einer vorbestimmten Zeit beendet wird, beziehungsweise statistischer Test und Bewertung mit verfügbaren Daten zu einer Zeit, die keinem Ausfall entspricht.

3.8**Typ II-Prüfung beziehungsweise Typ II-Test**

durch Ausfallzahl beendete Prüfung

Zuverlässigkeitswachstumsprüfung, die bei Erreichen einer vorgegebenen akkumulierten Ausfallanzahl beendet wird, beziehungsweise statistischer Test und Bewertung mit verfügbaren Daten zu einer Zeit, die einem Ausfall entspricht.

4 Formelzeichen

Für die Anwendung dieser Internationalen Norm gelten die folgenden Formelzeichen.

a) Für 6.1, A.1 und B.3:

T	Produktlebensdauer wie Mission, Garantiezeit oder Betriebszeit
$R_0(T)$	Anfangszuverlässigkeit (Anfangsüberlebenswahrscheinlichkeit) des Produkts
λ_{a0}	anfängliche durchschnittliche Ausfallrate des Produkts in der Entwicklungsperiode
$d(t)$	Anzahl der Entwurfsänderungen zu beliebigen Zeiten der Entwicklungsperiode
α_D	Zuverlässigkeitswachstumsrate, die aus der Abschwächung von Fehlern herrührt
D	Gesamtzahl der verwirklichten Entwurfsverbesserungen
t_D	Gesamtdauer der für Entwurfsverbesserungen zur Verfügung stehenden Entwicklungsperiode
t	variable Zeit von 0 bis t_D in der Entwicklungsperiode
$\lambda_a(t)$	durchschnittliche Ausfallrate des Produkts als eine Funktion der Zeit in der Entwicklungsperiode
$\lambda_{aG}(t_D)$	angestrebte durchschnittliche Ausfallrate am Ende der Entwicklungsperiode t_D
$R_G(T)$	Zuverlässigkeitsziel, welches das Produkt während der Entwicklungsperiode erreichen soll
$R(t, T)$	Überlebenswahrscheinlichkeit (Zuverlässigkeit) des Produkts als Funktion der Zeit und der Entwurfsverbesserungen

b) Für 6.2, A.2 und B.4:

$R_G(T)$	Zuverlässigkeitsziel, das das Produkt während der Entwicklungsperiode erreichen soll
t_D	Gesamtdauer der Entwicklungsperiode
α_D	Zuverlässigkeitswachstumsrate in der Entwicklungsperiode
λ_{NS}	Rate nicht systematischer Ausfälle
D	Gesamtzahl der vorhergesagten oder verwirklichten Entwurfsverbesserungen innerhalb der Entwicklungsperiode für die Behandlung von Schwachstellen
K	Gesamtzahl einzelner Fehlerklassen
j, k, i	allgemeine Laufindizes
p_{kj}	Wahrscheinlichkeit, dass die j-te Entwurfsschwachstelle in der Fehlerklasse k zu einem Ausfall während der spezifizierten Lebensdauer des Produkts führt
η_k	erwartete Anzahl der Entwurfsschwachstellen in der Fehlerklasse k, die zu einem Ausfall während der spezifizierten Lebensdauer des Produkts führen
D_k	Gesamtzahl der vorhergesagten oder verwirklichten Entwurfsverbesserungen innerhalb der Entwicklungsperiode, um Fehler in der Fehlerklasse k zu behandeln
λ_k	Ausfallrate von Entwurfsschwachstellen, die der Fehlerklasse k zugerechnet werden
$R_I(T)$	Anfangszuverlässigkeit (Anfangsüberlebenswahrscheinlichkeit) zur Zeit T
$R(T)$	Überlebenswahrscheinlichkeit (Zuverlässigkeit) des Produkts als Funktion von T
t_G	erwartete Zeit, um das Zuverlässigkeitsziel zu erreichen

c) Für 7.1.1, 7.1.2, 9, A.4, B.1 und B.2:

D	Gesamtzahl der Entwurfsverbesserungen, die während der Produktentwicklungsperiode verwirklicht wurden, um erkannte Fehler abzuschwächen
t_D	Gesamtdauer des für potentielle Entwurfsänderungen zur Verfügung stehenden Teils der Entwicklungsperiode
t	variable Zeit (in der Entwicklungsperiode, $0 \leq t \leq t_D$)
$d(t)$	Anzahl der Entwurfsänderungen zu beliebigen Zeiten t von 0 bis t_D der Entwicklungsperiode
α_D	Zuverlässigkeitswachstumsrate in der Entwicklungsperiode
λ_{a0}	anfängliche durchschnittliche Ausfallrate eines sich in der Entwicklung befindlichen Produkts
$\lambda_a(t)$	durchschnittliche variable Ausfallrate eines Produkts als Funktion der Zeit (0 bis t_D) während der Entwicklungsperiode
$R_0(T)$	Anfangszuverlässigkeit (Anfangsüberlebenswahrscheinlichkeit) des Produkts, berechnet für die Zeit T (Missionsdauer oder andere vorherbestimmte Zeit)
$R_G(T)$	Produktzuverlässigkeitsziel, das durch Entwurfsverbesserungen erreicht werden soll, berechnet für eine vorherbestimmte Zeit

$R(t)$	Produktzuverlässigkeit als Funktion der Zeit und der Entwurfsverbesserungen
λ_{aG}	Ziel für die durchschnittliche Ausfallrate
T	vorherbestimmte Zeit während des Produktlebens (Mission, Garantie, Leben)
λ	Skalenparameter für das Potenzgesetz
β	Formparameter für das Potenzgesetz
CV	kritischer Wert für den Hypothesentest (en: critical value, CV)
d	Anzahl der Intervalle bei Analyse gruppierter Daten
$\bar{E}, E_i, E_j$	Mittel- und Individualwert der Faktoren für die Wirksamkeit der Verbesserung
I	Anzahl der einzelnen Arten von beobachteten Ausfällen in Kategorie B
i, j	allgemeine Laufindizes
K_A	Anzahl der Ausfälle in Kategorie A
K_B	Anzahl der Ausfälle in Kategorie B
K_i	Anzahl der beobachteten Ausfälle vom Typ i in der Kategorie B: $K_B = \sum_{i=1}^k K_i$
M	Parameter des (statistischen) Cramér-von-Mises-Tests
N	Anzahl zu wertender Ausfälle
N_i	Anzahl zu wertender Ausfälle im Intervall i
$N(T)$	bis zur Prüfdauer T akkumulierte Anzahl der Ausfälle
$E[N(T)]$	bis zur Prüfdauer T erwartete akkumulierte Anzahl der Ausfälle
$t(i-1); t(i)$	Endpunkte des i -ten Intervalls der Prüfzeit bei Analyse gruppierter Daten
T	aktuelle akkumulierte zu wertende Prüfdauer
T_i	akkumulierte zu wertende Prüfdauer beim i -ten Ausfall
T_N	gesamte akkumulierte zu wertende Prüfdauern für Typ II-Prüfung
T^*	gesamte akkumulierte zu wertende Prüfdauern für Typ I-Prüfung
$\chi^2_\gamma(\nu)$	γ -Quantil der χ^2 -Verteilung mit ν Freiheitsgraden
z	allgemeines Zeichen für Ausfallintensität
u_γ	γ -Quantil der standardisierten Normalverteilung
z_p	projizierte Ausfallintensität
$z(T)$	aktuelle Ausfallintensität zur Zeit T (zu wertende Prüfdauer)
$\theta(T)$	aktueller momentaner mittlerer Ausfallabstand
θ_p	projizierter mittlerer Ausfallabstand
p_j	Erfolgswahrscheinlichkeit in der Stufe j der Produktänderung in der Entwicklungsphase, wie im diskreten Zuverlässigkeitswachstumsmodell von Barlow, Proschan und Scheuer beschrieben
$N(t)$	Anzahl nicht zufälliger Fehlerarten, die zur Zeit $t > 0$ im kontinuierlichen Zuverlässigkeitswachstumsmodell von IBM/Rosner übrig bleiben
g	Anteil, zu dem in einem Produkt/Gerät nach dem IBM-Rosner-Zuverlässigkeitswachstumsmodell Fehler beseitigt wurden

E	Beanspruchungsdauer einer Einheit
λ_{NS}	Ausfallrate nicht systematischer Ausfälle
λ_S	Ausfallrate systematischer Ausfälle
μ_k	Ausfallrate der k-ten Ausfallklasse
D_k	Anzahl potenzieller Entwurfsschwachstellen in der Ausfallklasse k
$p_{j,k}$	Wahrscheinlichkeit, dass die der Fehlerklasse k zugeordnete j-te Entwurfsschwachstelle zum Ausfall führt
t_E	erwartete Zeit in der Entwicklungsphase, um das Zuverlässigkeitsziel $R_G(T)$ zu erreichen
t_D	Dauer der Entwicklungsphase
$R_I(T)$	Anfangszuverlässigkeit (Anfangsüberlebenswahrscheinlichkeit) zur Zeit T
α	Parameter zur Beschreibung der erwarteten Wachstumsrate
λ_k	erwartete Anzahl von der Ausfallklasse k zugeordneten Entwurfsschwachstellen, die zum Ausfall führen
K_2	Anteil der im Produktentwurf zu Prüfbeginn enthaltenen systematischen Fehler
K_1	Anzahl der im Produktentwurf zu Prüfbeginn enthaltenen Fehler
q	Anteil der Fehler, die durch die Zuverlässigkeitswachstumsprüfung beseitigt wurden
$q(T)$	Anteil der ursprünglichen Fehler, die bis zur Zeit t beseitigt wurden
t_q	erwartete Zeit, bis der Anteil q systematischer Fehler durch die Prüfung beseitigt wurde
$\theta(T)$	kumulativer Ausfallabstand

d) In dem diskreten Zuverlässigkeitswachstumsmodell in 7.2 verwendete Formelzeichen

R_i	Zuverlässigkeit oder Erfolgswahrscheinlichkeit der i-ten Konfiguration
$f_i = 1 - R_i$	Ausfallwahrscheinlichkeit der i-ten Konfiguration
k	Anzahl der Stufen und Konfigurationen
n_i	Anzahl der Versuche in der Stufe i
m_i	Anzahl der Ausfälle in der Stufe i
$t_i = \sum_{j=1}^i n_j$	kumulative Anzahl der Versuche in der Stufe i
$N(t_i)$	akkumulierte Anzahl von Ausfällen bis zum Versuch t_i
$E[N(t_i)]$	erwartete akkumulierte Anzahl von Ausfällen bis zum Versuch t_i
λ, β	Skalen- und Formparameter für das Potenzgesetz und diskrete Modelle

5 Zuverlässigkeitswachstumsmodelle in Entwicklung und Prüfung

Die Grundlagen für das Zuverlässigkeitswachstum eines Produkts sind während Entwicklung und Prüfung gleich. Dies liegt daran, dass in beiden Fällen Schwachstellen erkannt und beseitigt werden, um das Produkt zu verbessern und in beiden Fällen diese Verbesserung durch Vergleich der geschätzten mit der erzielten Zuverlässigkeit gemessen wird. Die Unterschiede liegen in den für die Analyse der Entwicklung und Prüfung verwendeten Werkzeugen sowie in den Modellen zum Messen des Zuverlässigkeitswachstums. IEC 61014 leitet an zum Aufbau eines Zuverlässigkeitswachstumsprogramms und zu den in Entwicklung und Prüfung verwendeten Analysewerkzeugen. Diese Norm enthält Einzelheiten zu den Modellen, die verwendet werden können, das Zuverlässigkeitswachstum in verschiedenen Stufen des Produktlebenszyklus zu messen, und berücksichtigt dabei auch verschiedene Arten von Einheiten, wie beispielsweise instandsetzbare Einheiten oder Einheiten zum einmaligen Gebrauch.

Zur Schätzung von Wachstum und Voraussage der Zuverlässigkeit werden mathematische Modelle für das Zuverlässigkeitswachstum aufgestellt. Zuverlässigkeitswachstumsmodelle können die Planung von Zuverlässigkeitsverbesserungsprogrammen unterstützen. Mit Hilfe solcher Modelle können Anzahl und Größenordnung der während der Entwicklung notwendigen Änderungen geschätzt werden oder es kann die Prüfdauer geschätzt werden, die notwendig sein wird, ein vorgegebenes Zuverlässigkeitsziel zu erreichen.

Die Zuverlässigkeitswachstumsmodelle können anhand der Ausfallrate (bzw. Ausfallintensität) oder der Überlebenswahrscheinlichkeit zu einem vorgegebenen Zeitpunkt formuliert werden, siehe Bild 1.

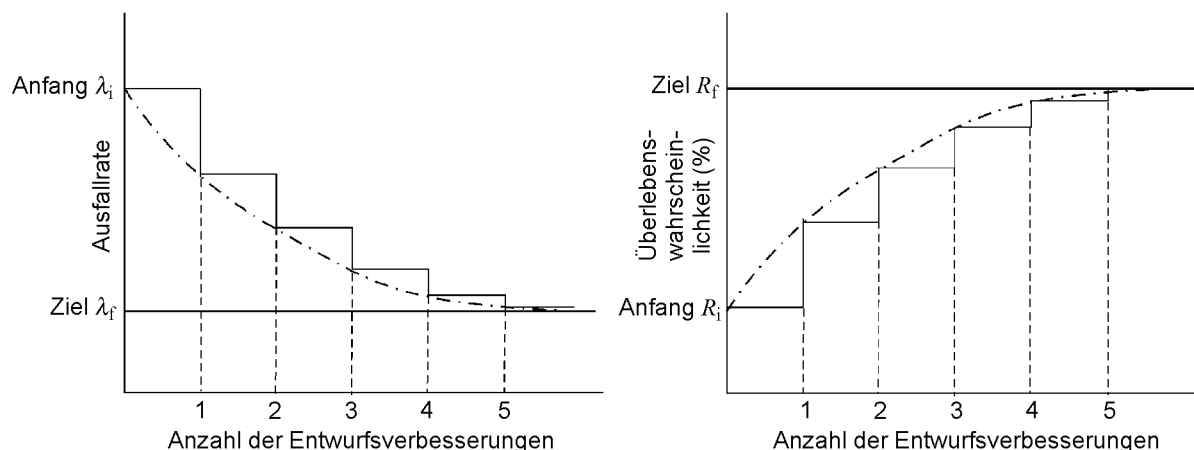


Bild 1 – Geplante Verbesserung der durchschnittlichen Ausfallrate oder Überlebenswahrscheinlichkeit

Innerhalb dieses allgemeinen Rahmens gibt es viele Modelle für das Zuverlässigkeitswachstum. Tabelle 1 enthält eine Übersicht der Hauptkategorien. Wie schon die Unterscheidung zwischen Entwicklung und Prüfung, wird auch die Art der vorliegenden Daten die Wahl des Modells beeinflussen. Die kontinuierliche Kategorie bezieht sich auf Einheiten im Dauerbetrieb, zum Beispiel instandsetzbare Einheiten. Die diskrete Kategorie bezieht sich auf Daten, die so erfasst wurden, als ob es sich um einen Versuch mit Erfolg oder Ausfall handele, zum Beispiel Einheiten zur einmaligen Verwendung. Die zur Schätzung des Zuverlässigkeitswachstums verwendeten Verfahren werden mit „klassisch“ oder „nach Bayes“ bezeichnet. Im klassischen Verfahren werden nur beobachtete Daten verwendet, wogegen im Verfahren nach Bayes sowohl empirische Daten aus Entwicklung und Prüfung als auch Ingenieurwissen, zum Beispiel hinsichtlich der erwarteten Anzahl von wichtigen Ausfallarten, herangezogen werden.

Tabelle 1 – Kategorien von Zuverlässigkeitswachstumsmodellen mit Angabe des Abschnitts

Modellart			Zeit	
			kontinuierlich (Zeit)	diskret (Anzahl Versuche)
	Entwicklung	klassisch	6.1	–
		nach Bayes	6.2	–
	Prüfung	klassisch	7.1	7.2
		nach Bayes	–	–

Viele Zuverlässigkeitsmodelle sind für die Analyse von Prüfdaten entwickelt worden. In dieser Norm wird eines der gebräuchlichsten Wachstumsmodelle beschrieben, das Potenzgesetz (auch bekannt als AMSAA oder Crow-Modell), sowohl in seiner kontinuierlichen als auch diskreten Form. Dieses Modell ist eine von Crow [1]¹ vorgenommene Verallgemeinerung des Zuverlässigkeitswachstumsmodells von Duane. Obwohl von diesen Modellen Bayes'sche Varianten existieren, werden diese hier nicht vorgestellt. Eine Übersicht und Bewertung der verschiedenen Zuverlässigkeitswachstumsmodelle zur Analyse von Prüfdaten findet man in Jewell [2, 3] und Xie [4].

Es gibt wenige veröffentlichte Berichte über in der Produktentwicklung verwendete Zuverlässigkeitswachstumsmodelle. Daher wird in dieser Norm ein Modell zur Planung des Zuverlässigkeitswachstums eingeführt. Dieses ist eine Modifizierung des Potenzgesetzes zur Anwendung in der Entwicklung und eine Bayes'sche Variante des für Entwicklungszwecke angepassten IBM-Rosner-Modells. Diese treffen jedoch nur für Produkte im Dauerbetrieb zu.

Im Allgemeinen bedarf die Wahl eines Zuverlässigkeitswachstumsmodells eines Kompromisses zwischen Einfachheit und Realismus. Die Wahl sollte sich an vorstehenden Kriterien ausrichten, wie Stufe im Lebenszyklus und Art der Daten, als auch an der Beurteilung der Gültigkeit der Annahmen, die ein bestimmtes Modell im Zusammenhang mit seiner Anwendung untermauern. Weitere Einzelheiten zu den Annahmen über die in dieser Norm beschriebenen Modelle sind in den Abschnitten 6 und 7 enthalten. Es wird darauf hingewiesen, dass Zuverlässigkeitswachstumsmodelle nicht als unfehlbar angesehen und diese nicht ohne Bedacht verwendet werden sollten, sondern als statistische Werkzeuge zur Unterstützung der ingenieurmäßigen Beurteilung.

6 Zuverlässigkeitswachstumsmodelle in der Produkt- bzw. Systementwicklung

6.1 Modifiziertes Potenzgesetzmodell für die Planung des Zuverlässigkeitswachstums in der Produktentwicklung

6.1.1 Allgemeines

Das modifizierte Potenzgesetzmodell für die Planung von Zuverlässigkeitswachstum während der Produktentwicklung betrifft die aus Zuverlässigkeitsgründen notwendigen Entwurfsverbesserungen. Dabei fließen die Abschwächung einer Ausfallart oder die Verringerung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit sowie die Zeit von Entwicklungsbeginn bis zur Verwirklichung dieser Verbesserung in das statistische Modell ein.

Dieses Modell wird für Planungszwecke (und nicht zur Datenanalyse) verwendet. Mit ihm kann man die Anzahl oder die Größenordnung der Verbesserungen schätzen, durch die die Zuverlässigkeit des ersten Entwurfs sich bis zum Zielwert verbessern soll. Die Annahme eines Potenzgesetzes für dieses Modell ist deswegen gerechtfertigt, weil die frühzeitig verwirklichten Verbesserungen diejenigen sein werden, die am meisten zur Zuverlässigkeitsverbesserung beitragen werden. Die Ausfallarten mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit wird man als Erste angehen, gefolgt von Verbesserungen, die progressiv immer weniger zur Zuverlässigkeit beitragen. Die aktuell im Entwicklungsfortschritt erzielten Zuverlässigkeitswerte werden über der Entwicklungszeitachse zum Zeitpunkt ihrer Verwirklichung aufgetragen und mit dem Modell verglichen. Dieses Modell wird somit dazu verwendet, die notwendigen Strategien zu planen, die zur Zuver-

¹ Zahlen in rechteckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis

lässigkeitsverbesserung eines Entwurfs während der verfügbaren Zeit vom Zeitpunkt der Revision des ersten Entwurfs bis zum Entwicklungsabschluss und Freigabe des Produkts in die Fertigung vonnöten sind.

6.1.2 Planungsmodell für das Zuverlässigkeitswachstum während der Produktentwicklung

Das Planungsmodell für das Zuverlässigkeitswachstum nach Krasich [5] wird wie nachstehend beschrieben abgeleitet. Ein Beispiel dieses Modells, zusammen mit einem Tabellenkalkulationsblatt zur leichten Bestimmung und graphischen Darstellung bei gegebener Anfangs- und Zielzuverlässigkeit eines Produkts, ist im Anhang A enthalten.

Falls die Anfangszuverlässigkeit des Produkts für die vorbestimmte Betriebsdauer des Produkts T durch Analyse oder Prüfung zu $R_0(T)$ geschätzt wurde, beträgt unter der Annahme einer konstanten durchschnittlichen Ausfallrate die durchschnittliche Anfangsausfallrate dieses Produkts bei gegebener Betriebsdauer T :

$$\lambda_{a0} = -\frac{\ln[R_0(T)]}{T} \quad (1)$$

Die Annahme der Anwendbarkeit des Potenzgesetzes ist gerechtfertigt, weil die zuerst gefundenen Fehler am meisten zur Ausfallwahrscheinlichkeit beitragen und man diese Fehler daher als Erste angeht. Mit den verwirklichten Entwurfsänderungen (Fehlerabschwächungen) verbessert sich die Produktausfallrate stetig mit einer Funktion $d(t)$. Die Ausfallrate des Produkts zu beliebigen Zeiten während der Entwicklungsperiode ist:

$$\lambda_a(t) = \lambda_{a0} \cdot [1 + d(t)]^{-\alpha_D} \quad (2)$$

wobei

$d(t)$ die Anzahl der Entwurfsänderungen zu beliebigen Zeiten während der Entwicklungsperiode,

α_D die Zuverlässigkeitswachstumsrate, die aus der Abschwächung von Fehlern herrührt,

D die Gesamtzahl der verwirklichten Entwurfsverbesserungen und

t_D die Gesamtdauer der für Entwurfsverbesserungen zur Verfügung stehenden Entwicklungsperiode ist.

Mit linearer Näherung kann die Anzahl der Entwurfsänderungen als eine Funktion der Zeit linear über die Entwicklungsperiode verteilt werden:

$$d(t) = D \cdot \frac{t}{t_D} \quad (3)$$

Die durchschnittliche Ausfallrate als eine Funktion der Zeit wird dann:

$$\lambda_a(t) = \lambda_{a0} \cdot \left(1 + D \cdot \frac{t}{t_D}\right)^{-\alpha_D} \quad (4)$$

Wenn man den Zielwert der durchschnittlichen Produktausfallrate bei gegebenem Ziel für die Überlebenswahrscheinlichkeit (Zuverlässigkeitsziel) des Produkts als $R_G(T)$ ausdrückt, dann ist der Zielwert der durchschnittlichen Ausfallrate am Ende der Entwicklungsperiode t_D näherungsweise:

$$\lambda_{aG}(t_D) = \frac{-\ln[R_G(T)]}{T} \quad (5)$$

Gleichzeitig:

$$\lambda_{aG}(t_D) = \lambda_{a0} \cdot \left(1 + D \cdot \frac{t_D}{t_D}\right)^{-\alpha_D} = \lambda_{a0} \cdot (1 + D)^{-\alpha_D} \quad (6)$$

$$\lambda_{aG}(t_D) = -\frac{\ln[R_0(T)]}{T} \cdot (1 + D)^{-\alpha_D}$$

Ersetzt man $\lambda_{aG}(t_D)$ durch den Ausdruck, der das Zuverlässigkeitsziel enthält, und löst nach D auf, erhält man:

$$D = e^{\frac{-\ln\left(\frac{\ln[R_G(T)]}{\ln[R_0(T)]}\right)}{\alpha_D}} - 1 \quad (7)$$

Löst man dieselbe Gleichung nach der Wachstumsrate auf, die als Funktion der Entwurfsänderungen und des anfänglichen Zuverlässigkeitsziels ausgedrückt ist, erhält man:

$$\alpha_D = \frac{\ln\left(\frac{\ln[R_0(T)]}{\ln[R_G(T)]}\right)}{\ln(1 + D)} \quad (8)$$

Die Überlebenswahrscheinlichkeit des Produkts als Funktion der Zeit t und kontinuierlicher Entwurfsverbesserungen beträgt zum Zeitpunkt T (das Zuverlässigkeitswachstumsmodell in der Zeitperiode von 0 bis t_D):

$$R(t, T) = \exp(-\lambda_a(t) \cdot T) \quad (9)$$

Ersetzt man den Ausdruck für die durchschnittliche Ausfallrate, so erhält man das Zuverlässigkeitswachstumsmodell nach Krasich für die Entwicklungsphase $0 < t < t_D$, wie folgt:

$$R(t, T) = \exp\left(-\lambda_{a0} \cdot \left(1 + D \cdot \frac{t}{t_D}\right)^{-\alpha_D} \cdot T\right) \quad (10)$$

$$R(t, T) = \exp\left(\frac{\ln[R_0(T)]}{T} \cdot \left(1 + D \cdot \frac{t}{t_D}\right)^{-\alpha_D} \cdot T\right) \quad (11)$$

Drückt man in vorstehender Gleichung D durch die Anfangs- und Zielzuverlässigkeit aus, so erhält man das Zuverlässigkeitswachstum als eine Funktion der Zeit in der Entwicklungsperiode, die für Entwurfsverbesserungen zur Verfügung steht, zu:

$$R(t, T) = R_0(T) \left[\frac{t_D + t \cdot \left(\frac{\ln[R_G(T)]}{\ln[R_0(T)]}\right)^{\frac{1}{\alpha_D}} - t}{t_D} \right]^{-\alpha_D} \quad (12)$$

6.1.3 Verfolgung des erzielten Zuverlässigkeitswachstums

Verfolgung des erzielten Zuverlässigkeitswachstums bedeutet eine einfache Nachrechnung der bewerteten Produktzuverlässigkeit zum Zeitpunkt der Entwurfsverbesserungen und Änderungen. Der für dieselbe vorbestimmte Lebensdauer oder Missionsperiode berechnete Wert der Überlebenswahrscheinlichkeit wird einfach in dasselbe Blatt mit dem Zuverlässigkeitswachstumsmodell für die entsprechende Entwicklungsdauer eingezeichnet.

Die so im Diagramm eingetragenen Punkte können dann durch eine bestmöglich passende Linie (Potenz) repräsentiert werden, oder die Punkte im Diagramm können einfach durch gerade Linien miteinander verbunden werden. Die sich so ergebende Zuverlässigkeit wird mit dem Zuverlässigkeitswachstumsmodell verglichen.

Mit Hilfe einer Fehlerbaumanalyse und der dafür im Handel erhältlichen Software kann die Zuverlässigkeitsverbesserung leicht und schnell bewertet und verfolgt werden, da die Produktzuverlässigkeit automatisch entsprechend den Änderungen berechnet wird.

Nach Abschluss der Produktentwicklung und mit Beginn der Produktvalidierungsphase kann eine geplante Zuverlässigkeitswachstumsprüfung die Produktzuverlässigkeit weiter verbessern und Ausfallarten aufdecken, die während der analytischen Beurteilungen nicht bemerkt worden waren. Die abschließende Zuverlässigkeitsbewertung der beendeten Entwicklung und vorliegenden Konstruktion kann als Zuverlässigkeitsziel für die Zuverlässigkeitswachstumsprüfung dienen.

Ein Beispiel einer praktischen Ableitung und Anwendung des Planungsmodells für Wachstum und Zuverlässigkeitsverbesserung in der Entwicklungsphase ist in Abschnitt A.1.1 enthalten. Dieses aus der Realität stammende Beispiel zeigt Schritt für Schritt, wie das Modell aufgebaut und benutzt wird.

6.2 Modifiziertes Bayes'sche IBM-Rosner-Modell für die Planung des Zuverlässigkeitswachstums in der Entwicklung

6.2.1 Allgemeines

Nachfolgend wird ein Modell vorgestellt, durch das das Wachstum der Zuverlässigkeit während der Entwicklung einer instandsetzbaren Einheit beschrieben wird. Dieses Modell wurde von Quigley und Walls [6] bis [8] erarbeitet und basiert auf einer Bayes'schen Adaptation des IBM-Rosner-Modells [9], das zur Analyse von Prüfdaten entwickelt worden war und in Abschnitt 7.1.2 beschrieben ist.

Es wird angenommen, dass ein Konstruktionsentwurf soweit entwickelt worden ist, dass man eine erste Schätzung seiner Zuverlässigkeit vornehmen kann. Es wird des Weiteren angenommen, dass das Zuverlässigkeitsziel spezifiziert ist. Am Entwurf werden ggf. Änderungen vorgenommen, um die Zuverlässigkeit soweit zu verbessern, bis das vorgegebene Ziel erreicht wird. Das Modell zielt darauf ab, die möglichen Zeitpunkte für die Konstruktionsänderungen zu erfassen.

Das Modell geht davon aus, dass Entwicklungsbewertung und Nachbewertung zu Änderungen führen, durch die die Zuverlässigkeit verbessert und das Ziel erreicht werden soll. Die Wachstumsrate, die gemessen wird durch das Anwachsen der Anfangszuverlässigkeit bis zum Zuverlässigkeitsziel, ist eine Funktion der Beseitigung solcher Eigenschaften des Entwurfs, die zu systematischen Ausfällen beitragen. Durch die Anwendung dieses Modells wird implizit angenommen, dass die Zuverlässigkeit durch frühe Korrekturen des Entwurfs mehr verbessert wird als im Vergleich zu späteren Korrekturen.

Das Modell kann auf zwei Arten verwendet werden:

- a) zur Vorhersage der zum Erreichen des Zuverlässigkeitsziels benötigten Zeit durch Vorhersage der Zuverlässigkeit des Entwurfs – dieses unterstellt, dass die erwartete Wachstumsrate quantifiziert werden kann; oder
- b) zur Schätzung der Wachstumsrate, die erforderlich ist, um das Zuverlässigkeitsziel ausgehend von der anfänglichen Schätzung während einer spezifizierten Entwicklungsdauer zu erreichen – dieses unterstellt, dass die Dauer der Entwicklung festgelegt ist.

Einzelheiten zur mathematischen Formulierung des Modells sind in Anhang B enthalten.

6.2.2 Erforderliche Daten

Es werden Daten benötigt zum Zuverlässigkeitsziel ($R_G(T)$) und entweder zur Dauer der Entwicklungsphase (t_D) oder zur während der Entwicklung erwarteten Wachstumsrate (a_D), je nach Zweck der Modellanwendung.