

**DIN EN 60216-3
(VDE 0304-23)**
DIN

Diese Norm ist zugleich eine **VDE-Bestimmung** im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.

VDE

ICS 29.035.01

Einsprüche bis 2019-01-09

Entwurf

Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 60216-3
 (VDE 0304-23):2007-03 und
 DIN EN 60216-3 Berichtigung 1
 (VDE 0304-23
 Berichtigung 1):2009-02

**Elektroisolierstoffe –
 Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens –
 Teil 3: Anweisungen zur Berechnung thermischer Langzeitkennwerte
 (IEC 112/428/CD:2018);
 Text Deutsch und Englisch**

Electrical insulating materials –
 Thermal endurance properties –
 Part 3: Instructions for calculating thermal endurance characteristics
 (IEC 112/428/CD:2018);
 Text in German and English

Matériaux isolants électriques –
 Propriétés d'endurance thermique –
 Partie 3: Instructions pour le calcul des caractéristiques d'endurance thermique
 (IEC 112/428/CD:2018);
 Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2018-11-09 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

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

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.
 Gesamtumfang 106 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Inhalt	Seite
Nationales Vorwort.....	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen	6
3.1 Begriffe	6
3.2 Formelzeichen und Abkürzungen.....	8
4 Grundsätze der Berechnungen	10
4.1 Allgemeine Grundregeln.....	10
4.2 Vorbereitende Berechnungen	10
4.2.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren	11
4.2.2 Schwellenwertprüfungen	11
4.2.3 Zerstörende Prüfverfahren	11
4.3 Berechnungen zur Varianz.....	11
4.4 Statistische Überprüfungen	12
4.5 Ergebnisse.....	13
5 Anforderungen und Empfehlungen im Hinblick auf aussagefähige Berechnungen.....	13
5.1 Anforderungen an die Versuchsergebnisse	13
5.1.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren	13
5.1.2 Schwellenwertprüfungen	13
5.1.3 Zerstörende Prüfverfahren	13
5.2 Genauigkeit der Berechnungen.....	14
6 Berechnungsverfahren	14
6.1 Vorbereitende Berechnungen	14
6.1.1 Temperaturen und x-Werte	14
6.1.2 Zerstörungsfreie Prüfverfahren	14
6.1.3 Schwellenwertprüfungen	14
6.1.4 Zerstörende Prüfverfahren	14
6.1.5 Unvollständige Messreihen	18
6.2 Hauptgang der Berechnungen	18
6.2.1 Berechnung der Mittelwerte und Varianzen von Gruppen	18
6.2.2 Allgemeine Mittelwerte und Varianzen	19
6.2.3 Berechnungen zur Regression.....	19
6.3 Statistische Überprüfungen	20
6.3.1 Prüfung auf Gleichheit der Varianzen	20
6.3.2 Prüfung auf Linearität (F -Test)	21

6.3.3	Vertrauensgrenzen für die Erwartungswerte von X und Y	21
6.4	Thermisches Belastungsdiagramm	22
7	Berechnung und Anforderungen an die Ergebnisse	22
7.1	Berechnung der thermischen Langzeitkennwerte	22
7.2	Zusammenfassung der statistischen Überprüfungen und Prüfbericht	23
7.3	Angabe der Ergebnisse	23
8	Prüfbericht	23
Anhang A (normativ)	Flussdiagramm des Entscheidungsablaufes	25
Anhang B (normativ)	Tabelle des Entscheidungsablaufes	26
Anhang C (informativ)	Statistische Tabellen	27
Anhang D (informativ)	Berechnungsbeispiele	37
Anhang E (informativ)	Computerprogramm	44
E.1	Allgemeines	44
E.1.1	Benutzerfreundliche Programmausführung	45
E.2	Aufbau der von dem Programm verwendeten Datendateien	46
E.2.1	Textdateiformate	46
E.2.2	Office Open XML-Formate	48
E.3	Datendateien für das Computerprogramm	49
E.4	Ausgabedateien und graphische Darstellung	54
Literaturhinweise		55

Bilder

Bild 1 – Ausgewählte Gruppen, die an einem annähernd linearen Abschnitt liegen und durch einen Kasten hervorgehoben sind – Eigenschafts-Zeit-Diagramm (Messwerte aus zerstörenden Prüfungen, willkürliche Einheiten)	15
Bild D.1 – Thermische Langzeitdiagramme	42
Bild D.2 – Berechnungsbeispiel 3: Eigenschafts-Zeit-Diagramm (Messwerte aus zerstörenden Prüfungen)	43
Bild E.1 – Dialog für die Eigenschaften der Verknüpfung für den Programmstart	46
Bild E.2 – Thermisches Langzeitdiagramm von Beispiel N3	54

Tabellen

Tabelle B.1 – Logische Entscheidungen und Operationen gemäß den Überprüfungen	26
Tabelle C.1 – Koeffizienten für die Berechnungen bei beschränkten Messreihen	27
Tabelle C.2 – Werte der F -Verteilung, $F(0,95, f_n, f_d)$	34
Tabelle C.3 – Werte der F -Verteilung, $F(0,995, f_n, f_d)$	35
Tabelle C.4 – Werte der t -Verteilung, $t_{0,95}$	36
Tabelle C.5 – Prüfwerte nach der χ^2 -Verteilung	36
Tabelle D.1 – Berechnungsbeispiel 1 – Beschränkte Messreihen (Schwellenwertprüfungen: Datei CENEX3.DTA)	37
Tabelle D.2 – Berechnungsbeispiel 2 – Vollständige Messreihen (Zerstörungsfreie Prüfungen: Datei TEST2.DTA)	39
Tabelle D.3 – Berechnungsbeispiel 3 – Messwerte aus zerstörenden Prüfungen: Datei N3.dst	42

Tabelle E.1 – Daten aus zerstörungsfreien Prüfungen.....	47
Tabelle E.2 – Daten aus zerstörenden Prüfungen	47
Tabelle E.3 – Daten aus zerstörungsfreien Prüfungen.....	48
Tabelle E.4 – Daten aus zerstörenden Prüfungen	49

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 112/428/CD:2018 „Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 3: Instructions for calculating thermal endurance characteristics“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 112 „Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf FprEN nur 6 Wochen beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 183 „Bewertung und Qualifizierung von elektrischen Isolierstoffen und Isoliersystemen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

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

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

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

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

Änderungen

Gegenüber **DIN EN 60216-3 (VDE 0304-23):2007-03** und **DIN EN 60216-3 Berichtigung 1 (VDE 0304-23 Berichtigung 1):2009-02** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Die größte technische Änderung gegenüber der zweiten Auflage betrifft eine neue Software-Ergänzung. **Anhang E** „Computerprogramm“ wurde vollständig überarbeitet.

**Elektroisolierstoffe –
Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens –
Teil 3: Anweisungen zur Berechnung thermischer Langzeitkennwerte**

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60216 legt die Berechnungsverfahren zur Herleitung thermischer Langzeitkennwerte aus Versuchsergebnissen fest, die gemäß den Anweisungen nach **IEC 60216-1** und **IEC 60216-2** ermittelt wurden, und benutzt feste Alterungstemperaturen und variable Alterungszeiten.

Die Versuchsergebnisse können aus zerstörungsfreien, zerstörenden oder Schwellenwertprüfungen erhalten werden. Die Messreihen aus zerstörungsfreien Prüfungen oder Schwellenwertprüfungen können unvollständig sein, da die Bestimmung der Ausfallzeiten zu einem beliebigen Punkt nach Erreichen des Medianes der Ausfallzeiten beendet werden kann, bevor alle Probekörper den Grenzwert erreicht haben.

Die Verfahren werden an durchgerechneten Beispielen erläutert und geeignete Computerprogramme zur Erleichterung der Berechnungen empfohlen.

2 Normative Verweisungen

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

IEC 60216-1:2013, *Electrical insulating materials – Properties of thermal endurance – Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results*

IEC 60216-2:2005, *Electrical insulating materials – Properties of thermal endurance – Part 2: Determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials – Choice of test criteria*

IEC 60493-1:2011, *Guide for the statistical analysis of ageing test data – Part 1: Methods based on mean values of normally distributed test results*

3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1.1

geordnete Werte

Gruppe von Werten, so zu einer Folge zusammengestellt, dass in der richtigen Reihenfolge jedes Element größer als oder gleich groß wie sein Vorgänger ist

ANMERKUNG 1 Ansteigende Folge bedeutet in dieser Norm, dass die Werte in der genannten Weise angeordnet sind, wobei der erste Wert der kleinste ist.

ANMERKUNG 2 Es ist üblich, den Begriff „Gruppe“ in der statistischen Literatur zu verwenden, um eine Untermenge der gesamten Datenmenge zu bezeichnen. Die Gruppe umfasst solche Daten, für die für einen der Parameter der Reihe gleiche Werte gelten (z. B. Alterungstemperatur). Eine Gruppe kann eine Anzahl von Untergruppen beinhalten, die durch einen anderen Parameter gekennzeichnet werden (z. B. die Zeit im Fall von zerstörenden Prüfungen).

3.1.2

Reihenwerte

jeder Einzelwert in einer Gruppe von geordneten Werten wird einem Reihenwert zugeordnet, der durch seine Stellung als Ordinalzahl innerhalb der Folge gekennzeichnet ist

3.1.3

unvollständige Messreihe

Reihe von geordneten Werten, bei der die Werte oberhalb und/oder unterhalb von festgelegten Punkten nicht bekannt sind

3.1.4

beschränkte Messreihe

unvollständige Messreihe, bei der die Anzahl der unbekannten Werte bekannt ist

ANMERKUNG 1 Wenn die Beschränkung oberhalb/unterhalb eines festgelegten Messwertes erfolgt, ist dies eine Beschränkung vom Typ I. Wenn dies oberhalb/unterhalb eines festgelegten Reihenwertes erfolgt, ist dies eine Beschränkung vom Typ II. Diese Norm befasst sich nur mit dem Typ II.

3.1.5

Freiheitsgrade

Anzahl der Einzelwerte, vermindert um die Anzahl der Parameter

3.1.6

Varianz einer Gruppe von Werten

Summe der Quadrate der Abweichungen der Werte von einem Bezugswert

ANMERKUNG 1 Der Bezugswert kann durch einen oder mehrere Parameter festgelegt sein, z. B. ein Mittelwert (ein Parameter) oder eine Gerade (zwei Parameter, Steigung und Ordinatenabschnitt), dividiert durch die Anzahl der Freiheitsgrade.

3.1.7

zweites zentrales Moment einer Gruppe von Werten

Summe der Quadrate der Differenzen zwischen den Einzelwerten und dem Mittelwert der Wertegruppe geteilt durch die Anzahl der Einzelwerte in dieser Gruppe

3.1.8

Kovarianz von Gruppen von Werten

für zwei Gruppen von Werten mit gleicher Anzahl von Elementen, wobei jedem Element in einer Gruppe ein Element in der anderen zugeordnet werden kann, ist die Kovarianz die Summe der Produkte der Abweichungen zweier einander zugeordneter Elemente von den jeweiligen Gruppenmittelwerten, geteilt durch die Anzahl der Freiheitsgrade

3.1.9

Regressionsanalyse

Prozess zur Herleitung der am besten angepassten Geraden, die die Beziehung zwischen jeweils einander zugeordneten Elementen zweier Gruppen von Werten ausdrückt, durch Minimierung der Summe der Quadrate der Abweichungen der Elemente einer Gruppe von der Geraden

ANMERKUNG Die Parameter werden als „Regressionskoeffizienten“ bezeichnet.

3.1.10

Korrelationskoeffizient

Zahl, die ausdrückt, wie vollständig die Beziehung zwischen den Elementen zweier Wertegruppen ist. Der Zahlenwert ist gleich der Kovarianz geteilt durch die Quadratwurzel des Produktes der Varianzen innerhalb der Gruppen

ANMERKUNG Der Wert ihres Quadrates liegt zwischen 0 (keine Korrelation) und 1 (vollständige Korrelation).

3.1.11

Grenzwertlinie

Gerade parallel zur Zeitachse, die die Achse für die Eigenschaftswerte bei dem Grenzwert schneidet

3.2 Formelzeichen und Abkürzungen

		Unterabschnitt
a	Regressionskoeffizient (Abschnitt auf y -Achse)	4.3, 6.2
a_p	Regressionskoeffizient bei Berechnungen für zerstörende Prüfungen	6.1
b	Regressionskoeffizient (Steigung)	4.3, 6.2
b_p	Regressionskoeffizient bei Berechnungen für zerstörende Prüfungen	6.1
b_r	Zwischenkonstante (Berechnung von $\hat{X}_c$)	6.3
c	Zwischenkonstante (Berechnung von χ^2)	6.3
f	Anzahl der Freiheitsgrade	Tabellen C.2 bis C5
F	Stochastischer Prüfwert nach der Fisher-Verteilung	4.2, 6.1, 6.3
F_0	Tabellenwert von F (Linearität des thermischen Langzeitdiagramms)	4.4, 6.3
F_1	Tabellenwert von F (Linearität des Eigenschaftsdiagramms – Signifikanz 0,05)	6.1
F_2	Tabellenwert von F (Linearität des Eigenschaftsdiagramms – Signifikanz 0,005)	6.1
g	Ordnungszahl für die Lagerungszeit bei zerstörenden Prüfungen	6.1
h	Ordnungszahl des Eigenschaftswertes bei zerstörenden Prüfungen	6.1
HIC	Halbzeitintervall bei der zu TI gehörenden Temperatur	4.3, 7
HIC _g	Halbzeitintervall zugehörig zu TI _g	7.3
i	Ordnungszahl der Lagerungstemperatur	4.1, 6.2
j	Ordnungszahl der Ausfallzeit	4.1, 6.2
k	Anzahl der Lagerungstemperaturen	4.1, 6.2
m_i	Anzahl der bei Temperatur ϑ_i gelagerten Probekörper	4.1, 6.1
N	Gesamtzahl der Ausfallzeiten	6.2
n_g	Anzahl der Eigenschaftswerte in der für die Zeit τ_g gelagerten Gruppe	6.1
n_i	Anzahl der Werte für y bei der Temperatur ϑ_i	4.1, 6.1
$\bar{p}$	Mittelwert der Eigenschaftswerte der ausgewählten Gruppen	6.1
p	Eigenschaftswert einer Prüfeigenschaft	6.1
P	Signifikanzniveau der χ^2 -Verteilung	4.4, 6.3.1
p_e	Eigenschaftswert der Prüfeigenschaft bei der Ausfallzeit für zerstörende Prüfungen (Grenzwert)	6.1
$\bar{p}_g$	Mittelwert der Eigenschaftswerte der für die Zeit τ_g gelagerten Gruppe	6.1
p_{gh}	Einzelwert der Eigenschaft	6.1
q	Basis von Logarithmen	6.3
r	Anzahl der Lagerungszeiten, die für eine Einbeziehung in die Berechnung ausgewählt wurden (zerstörende Prüfungen)	6.1
r^2	Quadrat des Korrelationskoeffizienten	6.2.3
s^2	Gewichteter Mittelwert von s_1^2 und s_2^2	6.3
s_1^2	Gewichteter Mittelwert der Werte s_{1i}^2 , zusammengefasste Varianz innerhalb ausgewählter Gruppen	4.3, 6.1 - 6.3
$(s_1^2)_a$	Angepasster Wert von s_1^2	4.4, 6.3

s_{1g}^2	Varianz der Eigenschaftswerte der für die Zeit τ_g gelagerten Gruppe	6.1
s_{1i}^2	Varianz der Werte y_{ij} für die Temperatur ϑ_i	4.3, 6.2
s_2^2	Varianz in Bezug auf die Regressionsgerade	6.1 - 6.3
s_a^2	Angepasster Wert von s_2	6.3
s_r^2	Zwischenkonstante	6.3
s_Y^2	Varianz der Werte Y	6.3
t	Stochastische Variable nach der Student-Verteilung	6.3
t_c	Angepasster Wert von t (bei unvollständigen Messreihen)	6.3
TC	Untere 95 %-Vertrauensgrenze für TI	4.4, 7
TCa	Angepasster Wert von TC	7.1
TI	Temperaturindex	4.3, 7
TI10	Temperaturindex bei 10 kh	7.1
Tla	Angepasster Wert von TI	7.3
TI _g	Temperaturindex, der auf graphischem Wege oder ohne definierte Vertrauensgrenzen ermittelt wurde	7.3
x	Unabhängige Variable: Kehrwert der thermodynamischen Temperatur	
$\bar{x}$	Gewichteter Mittelwert der Werte x	6.2
X	Festgelegter Wert von x zur Ermittlung von y	6.3
$\hat{X}$	Erwartungswert von x bei festgelegtem Wert von y	6.3
$\hat{X}_c$	Obere 95 %-Vertrauensgrenze für $\hat{X}$	6.3
x_i	Kehrwert der i entsprechenden thermodynamischen Temperatur ϑ	4.1, 6.1
$\bar{y}$	Gewichteter Mittelwert der Werte y	6.2
y	Abhängige Variable: Logarithmus der Ausfallzeit	
$\hat{Y}$	Erwartungswert von y bei einem festgelegten Wert von x	6.3
Y	Festgelegter Wert von y zur Ermittlung von x	6.3
$\hat{Y}_c$	Untere 95 %-Vertrauensgrenze für $\hat{Y}$	6.3
$\bar{y}_i$	Mittelwert der Werte y_{ij} bei der Temperatur ϑ_i	4.3, 6.2
y_{ij}	Wert von y , zugehörig zu τ_{ij}	4.1, 6.1
$\bar{z}$	Mittelwert der Werte z_g	6.1
z_g	Logarithmus der Lagerungszeit bei zerstörenden Prüfungen, Gruppe g	6.1
α	Koeffizient für die Varianz bei beschränkten Messreihen	4.3, 6.2
β	Koeffizient für die Varianz bei beschränkten Messreihen	4.3, 6.2
ε	Koeffizient für die Varianz des Mittelwertes bei beschränkten Messreihen	4.3, 6.2
ϑ_0	Temperatur entsprechend 0 °C auf der thermodynamischen Skala (273,15 K)	4.1, 6.1
$\hat{\vartheta}$	Erwartungswert für die Temperatur zum Temperaturindex	6.3.3
$\hat{\vartheta}_c$	Vertrauensgrenze für die Temperatur $\hat{\vartheta}$	6.3.3

ϑ_i	Lagerungstemperatur für die Gruppe i	4.1, 6.1
μ	Koeffizient für den Mittelwert bei beschränkten Messreihen	4.3, 6.2
$\mu_2(x)$	Zweites zentrales Moment der x -Werte	6.2, 6.3
v	Gesamtzahl der bei einer Lagerungstemperatur ausgewählten Eigenschaftswerte	6.1
τ	Gewählte Ausfallzeit zur Ermittlung einer Temperatur	6.3
τ_g	Lagerungszeit für die ausgewählte Gruppe g	6.1
τ_{ij}	Ausfallzeiten	6.4
χ^2	Stochastische Variable nach der χ^2 -Verteilung	6.3

4 Grundsätze der Berechnungen

4.1 Allgemeine Grundregeln

Die allgemeinen Berechnungsverfahren und Anweisungen nach [Abschnitt 6](#) beruhen auf den in IEC 60493-1 aufgestellten Grundregeln. Diese können in vereinfachter Form wie folgt ausgedrückt werden (siehe 3.7.1 von IEC 60493-1:1974):

- Die Beziehung zwischen den Logarithmen der Zeiten zum Erreichen eines festgelegten Grenzwertes (Ausfallzeit) und dem Kehrwert der thermodynamischen (absoluten) Temperatur ist linear.
- Die Werte der Abweichungen der Logarithmen der Ausfallzeiten von der linearen Beziehung sind normalverteilt mit einer Varianz, die unabhängig ist von der Warmlagerungstemperatur.

Die in den allgemeinen Berechnungsverfahren verwendeten Ausgangswerte werden aus den Versuchsergebnissen durch eine vorbereitende Rechnung erhalten. Die Einzelheiten dieser Berechnung hängen ab von der Art des Prüfverfahrens: zerstörungsfreie Prüfung, Schwellenwertprüfung oder zerstörende Prüfung (siehe 4.2). In allen Fällen bestehen die Ausgangsgrößen aus Werten für x , y , m , n und k ,

dabei ist

$x_i = 1/(\vartheta_i + \vartheta_0)$ der Kehrwert des thermodynamischen Wertes der Warmlagerungstemperatur ϑ_i in °C;

$y_{ij} = \log \tau_{ij}$ der Logarithmus des Wertes der Ausfallzeit j bei der Temperatur ϑ_i ;

n_i ist die Anzahl der y -Werte in der Gruppe i , gelagert bei Temperatur ϑ_i ;

m_i ist die Anzahl der Probekörper in Gruppe i , gelagert bei Temperatur ϑ_i (abweichend von n_i bei beschränkten Messreihen);

k ist die Anzahl der Lagerungstemperaturen oder Gruppen von y -Werten.

ANMERKUNG Es kann jede Zahl als Basis der Logarithmen verwendet werden, solange diese bei den Berechnungen durchgehend beibehalten wird. Die Anwendung der natürlichen Logarithmen (Basis e) wird empfohlen, da die meisten Computerprogramme und wissenschaftlichen Rechner diese Möglichkeit bieten.

4.2 Vorbereitende Berechnungen

In allen Fällen werden die Kehrwerte der thermodynamischen Werte der Lagerungstemperaturen als Werte x_i errechnet.

Die Werte y_{ij} werden, wie unten angegeben, als die Logarithmen der Einzelwerte für die Ausfallzeit τ_{ij} errechnet.

In vielen Fällen von zerstörungsfreien und Schwellenwertprüfungen ist es aus wirtschaftlichen Gründen empfehlenswert (z. B. wenn die Streuung der Einzelwerte groß ist), die Warmlagerung zu beenden, bevor alle Probekörper den Grenzwert erreicht haben, zumindest bei einigen Temperaturgruppen. In solchen Fällen muss mit den verfügbaren Werten (x , y) das Verfahren zur Berechnung mit beschränkten Messreihen (siehe [6.2.1.2](#)) durchgeführt werden.

Gruppen mit vollständigen oder unvollständigen Messreihen und Gruppen mit unterschiedlicher Beschränkung bei den verschiedenen Warmlagerungstemperaturen können zusammen innerhalb eines Rechnungsganges nach 6.2.1.2 bearbeitet werden.

4.2.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Zerstörungsfreie Prüfverfahren (z. B. Massenverlust infolge Alterung) liefern für jeden Probekörper direkt den Wert der Prüfeigenschaft jedes Mal, wenn diese nach Beendigung einer Warmlagerungsperiode gemessen wird. Die Ausfallzeit π_j ist daher stets verfügbar, entweder direkt oder durch lineare Interpolation zwischen aufeinander folgenden Messungen.

4.2.2 Schwellenwertprüfungen

Die Ausfallzeit π_j wird für einen einzelnen Probekörper als Zeit bis zur Mitte der Warmlagerungsperiode unmittelbar vor Erreichen des Grenzwertes angesetzt.

4.2.3 Zerstörende Prüfverfahren

Werden zerstörende Prüfverfahren angewandt, wird jeder Probekörper bei Ermittlung eines Eigenschaftswertes zerstört und seine Ausfallzeit kann daher nicht direkt gemessen werden.

Um Erwartungswerte für die Ausfallzeit zu erhalten, werden folgende Annahmen getroffen, die in der Umgebung des Grenzwertes gelten sollen:

- Die Beziehung zwischen dem Mittelwert der Eigenschaft und dem Logarithmus der Warmlagerungszeit ist angenähert linear.
- Die Abweichungen der Einzelwerte für die Eigenschaft von dieser linearen Beziehung sind normalverteilt mit einer Varianz, die unabhängig ist von der Warmlagerungszeit.
- Die Kurven der Eigenschaftswerte über dem Logarithmus der Zeit sind für die einzelnen Probekörper Geraden parallel zu derjenigen, die die Beziehung nach a) wiedergibt.

Für die Anwendung dieser Annahmen wird eine Alterungskurve gezeichnet nach den Messwerten, die für jede einzelne Warmlagerungszeit erhalten wurden. Die Kurve wird erhalten, indem die Mittelwerte der Eigenschaft für jede Prüfgruppe über dem Logarithmus der Warmlagerungszeit aufgetragen werden. Sofern dies möglich ist, wird die Warmlagerung bei den einzelnen Temperaturen so lange fortgeführt, bis der Mittelwert für mindestens eine Prüfgruppe jenseits des Grenzwertes liegt. Ein angenähert linearer Abschnitt dieser Kurve wird in der Umgebung des Grenzwertes eingezeichnet (siehe Bild D.2).

Eine statistische Überprüfung (F-Test) wird durchgeführt, um festzustellen, ob in dem ausgewählten Bereich die Abweichungen von der Linearität noch zulässig sind (siehe 6.1.4.4). Falls dies zutrifft, werden in dem gleichen Diagramm die Punkte eingezeichnet, die den Eigenschaftswerten der einzelnen Probekörper entsprechen. Durch den Messpunkt für jeden einzelnen Probekörper wird eine Gerade parallel zu der Alterungsgeraden gezeichnet. Der Erwartungswert für den Logarithmus der Ausfallzeit (y_{ij}) dieses Probekörpers ist dann gleich dem Wert des Logarithmus der Zeit bis zum Schnittpunkt dieser Geraden mit dem Grenzwert (siehe Bild D.2).

Mit gewissen Einschränkungen ist auch eine Extrapolation der linearen Mittelwertkurve bis zum Niveau des Grenzwertes erlaubt.

Die oben genannten Operationen werden auf numerischem Wege in den Berechnungen nach 6.1.4 durchgeführt.

4.3 Berechnungen zur Varianz

Ausgehend von den Werten für x und y , nachdem diese wie oben angegeben ermittelt wurden, werden folgende Berechnungen durchgeführt:

Für jede Gruppe der Werte y_{ij} werden der Mittelwert $\bar{y}_i$ und die Varianz s_{ii}^2 berechnet und aus den letzteren die zusammengefasste Varianz innerhalb der Prüfgruppen s_1^2 unter Wichtung der einzelnen Gruppen entsprechend ihrer Größe.

Für unvollständige Ausgangswerte wurden die Berechnungen aus denjenigen entwickelt, die von Saw [1]¹ erstellt wurden; sie sind in 6.2.1.2 aufgeführt. Die hierbei benötigten Koeffizienten (μ für den Mittelwert, α und β für die Varianz und ε zur Ermittlung der zusammengefassten Varianz der Mittelwerte aus den Varianzen der Prüfgruppen) sind in Anhang C, Tabelle C.1 aufgeführt. Bei unterschiedlich großen Gruppen werden die Varianzen zusammengefasst, wobei sie entsprechend der Gruppengröße gewichtet werden. Der Mittelwert für die Gruppenwerte von ε wird ohne Wichtung bestimmt und mit der zusammengefassten Varianz multipliziert.

ANMERKUNG Die Wichtung entsprechend der Gruppengröße ist implizit in der Definition von ε enthalten, die hier derjenigen entspricht, die ursprünglich von Saw vorgeschlagen und mit der Gruppengröße multipliziert wurde. Dies dient einer vereinfachten Darstellung in Gleichungen.

Aus den Mittelwerten $\bar{y}_i$ und den Werten für x_i werden die Koeffizienten a und b (die Koeffizienten für die am besten angepasste lineare Darstellung der Beziehung zwischen x - und y -Werten) durch lineare Regressionsanalyse ermittelt.

Mit den Regressionskoeffizienten werden die Werte für TI und HIC berechnet. Die Varianz der Abweichungen von der Regressionsgeraden wird aus den Regressionskoeffizienten und den Gruppenmittelwerten berechnet.

4.4 Statistische Überprüfungen

Folgende statistische Überprüfungen werden vorgenommen:

- a) Fisher-Test auf Linearität (Fischer-Test, F -Test) bei Ergebnissen aus zerstörenden Prüfungen vor der Berechnung der zu erwartenden Ausfallzeiten (siehe 4.2.3).
- b) Gleichheit der Varianzen (Bartlett's χ^2 -Test) zur Überprüfung, ob sich die Varianzen innerhalb der Gruppen von y -Werten in signifikantem Maße unterscheiden.
- c) F -Test: Um festzustellen, ob das Verhältnis der Abweichungen von der Regressionsgeraden zu der zusammengefassten Varianz innerhalb der Gruppen von Werten größer ist als der Bezugswert F_0 , d. h. um die Gültigkeit der Arrhenius-Beziehung bei Anwendung auf die Versuchsergebnisse nachzuprüfen.

Im Falle von Messergebnissen mit sehr geringer Streuung kann möglicherweise eine Nichtlinearität festgestellt werden, die zwar statistisch gesehen signifikant ist, jedoch keine praktische Bedeutung hat.

Um dennoch ein Gesamtergebnis zu erreichen, auch wenn der F -Test in dem zuvor genannten Sinne ein unzureichendes Resultat erbrachte, ist folgendes Verfahren vorgesehen:

- 1) Der Wert der zusammengefassten Varianz innerhalb der Lagerungsgruppen s_1^2 wird um den Faktor F/F_0 angehoben, so dass der F -Test ein gerade noch annehmbares Resultat erbringt (siehe 6.3.2).
- 2) Dieser angepasste Wert $s_1^2 a$ wird verwendet, um die untere Vertrauensgrenze des Ergebnisses zu berechnen: TCa .
- 3) Wenn der untere Vertrauensbereich $(TI - TCa)$ als zulässig befunden wird, ist die Nicht-Linearität als ohne praktische Bedeutung zu beurteilen (siehe 6.3.2).
- 4) Aus den Komponenten für die Streuung der Messwerte (s_1^2) und (s_2^2) wird der Vertrauensbereich für einen Erwartungswert unter Verwendung der Regressionsgleichung berechnet.

¹ Angaben in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturhinweise.

Wenn der Temperaturindex (TI), seine untere Vertrauensgrenze (TC) und das Halbzeitintervall (HIC) errechnet wurden (siehe 7.1), wird das Ergebnis als zulässig betrachtet, wenn

$$TI - TC \leq 0,6 \text{ HIC} \quad (1)$$

ist.

Wenn der untere Vertrauensbereich (TI – TC) den Wert von 0,6 HIC um einen geringen Betrag überschreitet, kann ein brauchbares Ergebnis dennoch erreicht werden, vorausgesetzt $F \leq F_0$, indem der Wert von TI durch (TC + 0,6 HIC) ersetzt wird (siehe Abschnitt 7).

4.5 Ergebnisse

Der Temperaturindex (TI), sein Halbzeitintervall (HIC) und die zugehörige untere 95 %-Vertrauensgrenze (TC) werden aus der Regressionsgleichung berechnet, wobei – wie oben beschrieben – Zugeständnisse hinsichtlich kleinerer Abweichungen von den vorgeschriebenen Ergebnissen der statistischen Überprüfungen gemacht werden können.

Die Form, in der Temperaturindex und Halbzeitintervall angegeben werden, hängt von den Ergebnissen der statistischen Überprüfungen ab (siehe 7.2).

Es wird nachdrücklich auf die Notwendigkeit hingewiesen, das thermische Langzeitdiagramm als Teil des Prüfberichtes aufzuführen, da ein numerisches Ergebnis TI (HIC) allein keinen qualitativen Gesamtüberblick über die Versuchswerte bieten kann und ohne diesen eine Beurteilung der Ergebnisse nicht vollständig ist.

5 Anforderungen und Empfehlungen im Hinblick auf aussagefähige Berechnungen

5.1 Anforderungen an die Versuchsergebnisse

Die für die Berechnungsverfahren nach dieser Norm einzusetzenden Ausgangswerte müssen den Anforderungen nach IEC 60216-1:2013 genügen.

5.1.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Für die meisten Prüfeigenschaften dieser Art sind Gruppen mit je fünf Probekörpern ausreichend. Wenn jedoch die Streuung der Ergebnisse (Vertrauensbereich, siehe 6.3.3) als zu groß befunden wird, lassen sich befriedigendere Ergebnisse wahrscheinlich durch Verwendung einer größeren Anzahl von Probekörpern erreichen. Dies gilt besonders, wenn es sich als nötig erweist, die Warmlagerung zu beenden, bevor alle Probekörper den Grenzwert erreicht haben.

5.1.2 Schwellenwertprüfungen

Während der ersten Lagerungsperiode darf nicht mehr als ein Probekörper aus einer Gruppe den Grenzwert erreichen. Falls mehr als eine Gruppe solch einen Probekörper enthält, sollte das Prüfverfahren gründlich überprüft (siehe 6.1.3) und das Vorkommnis im Prüfbericht erwähnt werden.

Die Anzahl der Probekörper in jeder Gruppe muss mindestens fünf betragen; aus praktischen Gründen ist die größte bearbeitbare Anzahl auf 31 beschränkt (siehe Tabelle C.1). Für die meisten Anwendungsfälle wird eine Anzahl von 21 empfohlen.

5.1.3 Zerstörende Prüfverfahren

Bei allen Lagerungstemperaturen sollte die Warmlagerung so lange fortgesetzt werden, bis der Mittelwert der Eigenschaft von mindestens einer Gruppe über dem Grenzwert und von mindestens einer darunter liegt. Unter besonderen Umständen und mit den gebotenen Einschränkungen kann eine kleine Extrapolation auf einen Eigenschaftsmittelwert jenseits des Grenzwertniveaus erlaubt sein (siehe 6.1.4.4). Dies ist jedoch nicht für mehr als eine Temperaturgruppe zulässig.

5.2 Genauigkeit der Berechnungen

Viele der Berechnungsschritte beinhalten eine Aufsummierung der Differenzen von Zahlen oder der Quadrate dieser Differenzen, wobei die Differenzen klein im Vergleich zu den Zahlen sein können. Unter diesen Umständen ist es erforderlich, die Berechnungen mit einer internen Genauigkeit von mindestens 6 wertanzeigenden Zifferstellen, vorzugsweise aber mehr, durchzuführen, damit eine Genauigkeit des Ergebnisses von drei Zifferstellen erreicht wird. Im Hinblick auf die sich wiederholende und umfangreiche Art der Berechnungen wird nachdrücklich empfohlen, diese unter Verwendung eines programmierbaren Rechners oder eines Kleincomputers auszuführen, wobei eine interne Genauigkeit von 10 oder mehr wertanzeigenden Zifferstellen leicht erreichbar ist.

6 Berechnungsverfahren

6.1 Vorbereitende Berechnungen

6.1.1 Temperaturen und x-Werte

Bei allen Arten der Prüfung wird die Warmlagerungstemperatur in K auf der thermodynamischen Temperaturskala ausgedrückt und ihr Kehrwert für die Verwendung als Wert x_i berechnet:

$$x_i = 1/(T_i + \Theta_0) \quad (2)$$

Dabei ist $\Theta_0 = 273,15$ K.

6.1.2 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Für die Probe mit Kennziffer j in der Gruppe mit Kennziffer i wird nach jeder Lagerungsperiode ein Eigenschaftswert erhalten. Von diesen Werten ausgehend wird, falls nötig durch lineare Interpolation, die Ausfallzeit ermittelt und deren Logarithmus als y_{ij} errechnet.

6.1.3 Schwellenwertprüfungen

Für die Probe mit Kennziffer j in der Gruppe mit der Kennziffer i wird die Mitte der Lagerungsperiode unmittelbar vor Erreichen des Grenzwertes bestimmt und der Logarithmus der entsprechenden Lagerungszeit als Wert y_{ij} entnommen.

Ein Erreichen des Grenzwertes während der ersten Lagerungsperiode muss als ungültig angesehen werden. Entweder

- wird die Warmlagerung mit einer neuen Gruppe nochmals begonnen oder
- der betreffende Probekörper wird nicht berücksichtigt und die dieser Gruppe zugeschriebene Anzahl an Probekörpern (m_i) bei der Berechnung für Mittelwerte und Varianzen von Gruppen um eins verringert (siehe 6.2.1.2).

Wenn der Grenzwert für mehr als einen Probekörper während der ersten Lagerungsperiode erreicht wird, wird die betreffende Gruppe verworfen und die Prüfung mit einer neuen Gruppe begonnen, wobei möglichen kritischen Punkten im Versuchsablauf besondere Aufmerksamkeit zukommen muss.

6.1.4 Zerstörende Prüfverfahren

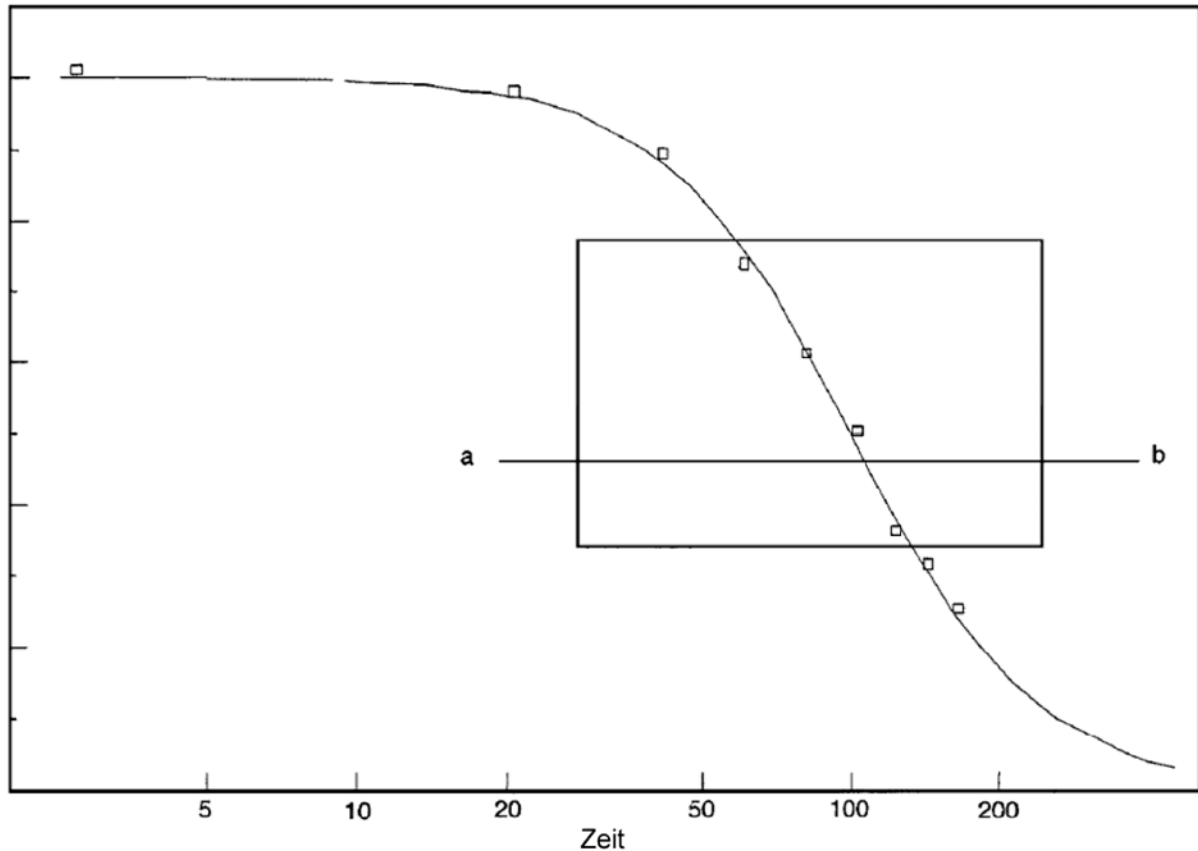
An den Gruppen von Probekörpern, die bei der Temperatur T_i gelagert worden waren, werden die in 6.1.4.1 bis 6.1.4.5 angegebenen Verfahren durchgeführt.

ANMERKUNG In den in 6.1.4.2 bis 6.1.4.4 auftretenden Ausdrücken wird der Index i nicht verwendet, um missverständliche mehrfache Index-Kombinationen zu vermeiden. Die Berechnungen in diesen Abschnitten müssen mit den Messwerten für jede Warmlagerungstemperatur getrennt vorgenommen werden.

6.1.4.5 Es werden der Mittelwert für die nach jeder Lagerungszeit erhaltene Gruppe von Eigenschaftswerten und der Logarithmus der Lagerungszeit berechnet. Diese Werte werden in ein Diagramm mit den

Eigenschaftswerten p als Ordinate und dem Logarithmus der Lagerungsdauer z als Abszisse eingetragen (siehe Bild D.2). Durch die Eigenschaftsmittelwerte wird eine nach Augenmaß gut angepasste Kurve gelegt.

6.1.4.2 Es wird ein Zeitbereich ausgewählt, in welchem die so angepasste Kurve angenähert linear ist (siehe 6.1.4.4). Dabei ist sicherzustellen, dass dieser Zeitbereich zumindest drei Eigenschaftsmittelwerte einschließt mit mindestens einem von diesen auf jeder Seite der Grenzwertlinie $p = p_e$. Ist dies nicht der Fall und kann dies auch nicht durch zusätzliche Messungen nach längeren Lagerungszeiten erreicht werden (z. B. weil keine Probekörper mehr verfügbar sind), ist eine kleine Extrapolation gemäß den Bedingungen nach 6.1.4.4 zulässig.



a _____ b Eigenschaftswert der Prüfeigenschaft beim Grenzwert p_e

Bild 1 – Ausgewählte Gruppen, die an einem annähernd linearen Abschnitt liegen und durch einen Kasten hervorgehoben sind – Eigenschafts-Zeit-Diagramm (Messwerte aus zerstörenden Prüfungen, willkürliche Einheiten)

Die Anzahl der ausgewählten Mittelwerte (und entsprechend die der Gruppen von Eigenschaftswerten) sei r , der Logarithmus der einzelnen Lagerungszeiten sei z_g und der Eigenschaftseinzelwert sei p_{gh} . Dabei ist

$g = 1 \dots r$ die fortlaufende Kennziffer der ausgewählten Gruppe, geprüft nach Lagerungszeit τ_g ;

$h = 1 \dots n_g$ die fortlaufende Kennziffer des Eigenschaftswertes innerhalb der Gruppe mit der Kennziffer g ;

n_g die Anzahl der Eigenschaftswerte in der Gruppe mit Kennziffer g .

In den meisten Fällen ist die Anzahl n_g der nach verschiedenen Zeiten geprüften Probekörper gleich; dies ist jedoch keine notwendige Bedingung, denn die Berechnung kann mit unterschiedlichen Werten für n_g bei den verschiedenen Gruppen durchgeführt werden.

Der Mittelwert $\bar{p}_g$ und die Varianz s_{1g}^2 werden für jede ausgewählte Gruppe von Eigenschaftswerten berechnet:

$$\bar{p}_g = \sum_{h=1}^{n_g} p_{gh} / n_g \quad (3)$$

$$s_{1g}^2 = \left(\sum_{h=1}^{n_g} p_{gh}^2 - n_g \bar{p}_g^2 \right) / (n_g - 1) \quad (4)$$

Die Logarithmen der Lagerungszeiten τ_g werden berechnet:

$$z_g = \log \tau_g \quad (5)$$

6.1.4.3 Es werden folgende Werte berechnet:

$$v = \sum_{g=1}^r n_g \quad (6)$$

$$\bar{z} = \sum_{g=1}^r z_g n_g / v \quad (7)$$

$$\bar{p} = \sum_{g=1}^r \bar{p}_g n_g / v \quad (8)$$

Die Koeffizienten der Regressionsgleichung werden berechnet nach: $p = a_p + b_p z$

$$b_p = \frac{\left(\sum_{g=1}^r n_g z_g \bar{p}_g - v \bar{z} \bar{p} \right)}{\left(\sum_{g=1}^r n_g z_g^2 - v \bar{z}^2 \right)} \quad (9)$$

$$a_p = \bar{p} - b_p \bar{z} \quad (10)$$

Die zusammengefasste Varianz innerhalb der Gruppen von Eigenschaftswerten wird berechnet:

$$s_1^2 = \sum_{g=1}^r (n_g - 1) s_{1g}^2 / (v - r) \quad (11)$$

Die gewichtete Varianz der Abweichungen der Eigenschaftsmittelwerte von der Regressionsgeraden wird berechnet:

$$s_2^2 = \sum_{g=1}^r n_g (\bar{p}_g - \hat{p}_g)^2 / (r - 2) \quad (12)$$

dabei ist

$$\hat{p}_g = a_p + b_p z_g \quad (13)$$

Dies kann auch ausgedrückt werden als

$$s_2^2 = \left[\left(\sum_{g=1}^r n_g \bar{p}_g^2 - v \bar{p}^2 \right) - b_p \left(\sum_{g=1}^r n_g z_g p_g - v \bar{z} \bar{p} \right) \right] / (r-2) \quad (14)$$

6.1.4.4 Der F -Test auf Linearität bei einem Signifikanzniveau von 0,05 wird ausgeführt durch Berechnung von

$$F = s_2^2 / s_1^2 \quad (15)$$

Übersteigt der errechnete Wert von F den Tabellenwert F_1 mit den Freiheitsgraden $f_n = r - 2$ und $f_d = v - r$ (siehe [Tabelle C.2](#)).

$$F_1 = F(0,95, r - 2, v - r)$$

wird die Auswahl nach [6.1.4.2](#) geändert und die Berechnung wiederholt.

Ist es nicht möglich, eine Erfüllung des F -Testes bei einem Signifikanzniveau 0,05 mit $r \geq 3$ zu erreichen, wird der F -Test bei einem Signifikanzniveau 0,005 durch Vergleich des berechneten Wertes von F mit dem Tabellenwert F_2 mit den Freiheitsgraden $f_n = r - 2$ und $f_d = v - r$ (siehe [Tabelle C.3](#)) vorgenommen.

$$F_2 = F(0,995, r - 2, v - r)$$

Ist die Forderung des Testes bei diesem Niveau erfüllt, können die Berechnungen fortgeführt werden, jedoch ist eine Anpassung des Temperaturindex TI nach [7.3.2](#) nicht zulässig.

Wenn dem F -Test bei einem Signifikanzniveau 0,005 (d. h. $F \leq F_2$) nicht entsprochen werden kann oder wenn die nach 6.1.4.1 eingetragenen Eigenschaftswerte alle auf der gleichen Seite der Grenzwertlinie liegen, kann eine Extrapolation unter folgenden Bedingungen zulässig sein.

Wenn der F -Test bei einem Signifikanzniveau 0,05 für einen Bereich von Werten (mit $r \geq 3$) erfüllt wird, wobei alle Mittelwerte $\bar{p}_g$ auf der gleichen Seite des Grenzwertes p_e liegen, kann eine Extrapolation vorgenommen werden, vorausgesetzt, der Absolutbetrag der Differenz zwischen Grenzwert p_e und dem diesem am nächsten liegenden Mittelwert $\bar{p}_g$ (üblicherweise $\bar{p}_r$) ist kleiner als das 0,25-Fache des Absolutbetrages der Differenz ($\bar{p}_1 - \bar{p}_r$).

In diesem Falle können die Berechnungen weitergeführt werden, jedoch ist danach ebenfalls eine Anpassung des Temperaturindex TI nach [7.3.2](#) nicht zulässig.

6.1.4.5 Für jeden Eigenschaftswert in jeder der ausgewählten Gruppen wird der Logarithmus der erwarteten Ausfallzeit berechnet:

$$y_{ij} = z_g - (p_{gh} - p_e) / b_p \quad (16)$$

$$n_i = v \quad (17)$$

Dabei ist

$j = 1 \dots n_i$ die fortlaufende Kennziffer des y -Wertes in der Gruppe der erwarteten y -Werte bei der Temperatur ϑ_i und z_g der Logarithmus der Warmlagerungszeit.

Die n_i -Werte für y_{ij} sind die Logarithmen der Zeitwerte, die bei den Berechnungen nach [6.2.1](#) verwendet werden.

6.1.5 Unvollständige Messreihen

Im Falle von unvollständigen Messreihen wird jede Gruppe von y -Werten in ansteigender Folge angeordnet (siehe 3.1.1).

6.2 Hauptgang der Berechnungen

6.2.1 Berechnung der Mittelwerte und Varianzen von Gruppen

Der Mittelwert und die Varianz der Gruppe von y -Werten y_{ij} , die für jede Temperatur θ_i erhalten wurden, werden berechnet.

6.2.1.1 Vollständige Messreihen

Für Prüfungen, bei denen die Messreihen vollständig (d. h. nicht beschränkt) vorliegen, können die üblichen Gleichungen verwendet werden:

$$\bar{y}_i = \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} / n_i \quad (18)$$

$$s_{li}^2 = \left(\sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}^2 - n_i \bar{y}_i^2 \right) / (n_i - 1) \quad (19)$$

Wahlweise können auch die Gleichungen für unvollständige Messreihen (6.2.1.2) benutzt werden, wenngleich sie für diesen Zweck weit weniger geeignet sind. Die Koeffizienten erhalten dann die folgenden Werte:

$$\alpha_i = 1 / (n_i - 1) \quad (20)$$

$$\beta_i = \frac{-1}{n_i (n_i - 1)} \quad (21)$$

$$\mu_i = 1 - 1 / n_i \quad (22)$$

ANMERKUNG Diese Ausdrücke werden durch einfache algebraische Operationen hergeleitet. Wenn die Ausdrücke für Mittelwert oder Varianz (siehe Gleichungen (18) und (19)) mit dem aus den Gleichungen (23) und (24) erhaltenen gleichgesetzt werden, kann nach der einzelnen Unbekannten aus jeder resultierenden Gleichung aufgelöst werden, was zu den Ergebnissen der Gleichungen (20) bis (22) führt. Der Wert von ε ist offensichtlich 1.

6.2.1.2 Beschränkte Messreihen

Anstelle der Gleichungen (18) und (19) müssen die folgenden Gleichungen verwendet werden:

$$\bar{y}_i = (1 - \mu_i) y_{in_i} + \mu_i \sum_{j=1}^{n_i-1} \frac{y_{ij}}{(n_i - 1)} \quad (23)$$

$$s_{li}^2 = \alpha_i \sum_{j=1}^{n_i-1} (y_{in_i} - y_{ij})^2 + \beta_i \left[\sum_{j=1}^{n_i-1} (y_{in_i} - y_{ij}) \right]^2 \quad (24)$$

Die Werte für μ_i , α_i und β_i sind den jeweils infrage kommenden Zeilen in [Tabelle C.1](#) zu entnehmen. Wenn die Messreihen nur teilweise beschränkt sind (d. h. wenn eine oder mehrere Temperaturgruppen vollständig

und eine oder mehrere beschränkt sind), müssen die Werte aus den Gleichungen (20) bis (22) hergeleitet werden.

6.2.2 Allgemeine Mittelwerte und Varianzen

Die Gesamtzahl N der y_{ij} -Werte, der gewichtete Mittelwert ($\bar{x}$) der x -Werte und der gewichtete Mittelwert ($\bar{y}$) der y -Werte werden berechnet:

$$N = \sum_{i=1}^k n_i \quad (25)$$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^k n_i x_i / N \quad (26)$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^k n_i \bar{y}_i / N \quad (27)$$

Bei beschränkten Messreihen wird die Gesamtzahl der Probekörper berechnet:

$$M = \sum_{i=1}^k m_i \quad (28)$$

Bei vollständigen Messreihen ist $M = N$.

Bei beschränkten Messreihen werden die Werte für ε_i aus [Tabelle C.1](#) entnommen. Bei vollständigen Messreihen, oder falls $n_i = m_i$ bei nur teilweise beschränkten Messreihen, ist ε_i 1 gesetzt.

Der Faktor für die gemeinsame mittlere Varianz wird berechnet:

$$\varepsilon \sum_{i=1}^k \varepsilon_i / k \quad (29)$$

Die zusammengefasste Varianz innerhalb der Gruppen von Werten wird berechnet:

$$s_1^2 = \varepsilon \sum_{i=1}^k (n_i - 1) s_{li}^2 / (N - k) \quad (30)$$

Das zweite zentrale Moment der x -Werte wird berechnet:

$$\mu_2(x) = \frac{\left(\sum_{i=1}^k n_i x_i^2 - N \bar{x}^2 \right)}{N} \quad (31)$$

6.2.3 Berechnungen zur Regression

In der Gleichung für die Regressionsgerade:

$$y = a + bx \quad (32)$$

wird die Steigung berechnet:

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^k n_i x_i \bar{y}_i - N \bar{x} \bar{y} \right)}{\left(\sum_{i=1}^k n_i x_i^2 - N \bar{x}^2 \right)} \quad (33)$$

sowie der Abschnitt auf der y-Achse:

$$a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (34)$$

und das Quadrat des Korrelationskoeffizienten nach:

$$r^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^k n_i x_i \bar{y}_i - N \bar{x} \bar{y} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^k n_i x_i^2 - N \bar{x}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^k n_i y_i^2 - N \bar{y}^2 \right)} \quad (35)$$

Die Varianz der Abweichungen der y-Mittelwerte von der Regressionsgeraden wird berechnet nach:

$$s_2^2 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i (\bar{y}_i - \hat{Y}_i)^2}{(k-2)}, \quad \hat{Y}_i = a + b x_i \quad (36)$$

oder

$$s_2^2 = \frac{(1-r^2)}{k-2} \left(\sum_{i=1}^k n_i \bar{y}_i^2 - N \bar{y}^2 \right) \quad (37)$$

6.3 Statistische Überprüfungen

6.3.1 Prüfung auf Gleichheit der Varianzen

Der Wert von Bartlett's χ^2 -Funktion wird berechnet nach:

$$\chi^2 = \frac{\ln q}{c} \left[(N-k) \log_q \frac{s_1^2}{\varepsilon} - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \log_q s_{1i}^2 \right] \quad (38)$$

dabei ist

$$c = 1 + \frac{\left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{N - k} \right)}{3(k-1)} \quad (39)$$

und q die Basis der in dieser Gleichung verwendeten Logarithmen. Sie muss nicht die gleiche sein wie die, die bei anderweitigen Berechnungen in diesem Abschnitt verwendet wird.

Wenn $q = 10$, dann ist $\ln q = 2,303$, wenn $q = e$, dann ist $\ln q = 1$.

Der Wert von χ^2 wird mit dem Tabellenwert für $f = (k - 1)$ Freiheitsgrade verglichen (Tabelle C.5). Falls der Wert von χ^2 größer ist als der Tabellenwert für ein Signifikanzniveau von 0,05, wird der Wert von χ^2 angegeben sowie das Signifikanzniveau für den größten Tabellenwert, der kleiner ist als χ^2 . Wahlweise werden beide Werte, χ^2 und das zugehörige Signifikanzniveau, angegeben, wenn sie durch ein Computerprogramm berechnet werden.

6.3.2 Prüfung auf Linearität (F-Test)

Die Varianz der Abweichungen von der Regressionsgeraden s_2^2 wird mit der zusammengefassten Varianz s_1^2 innerhalb der k -Prüfgruppen durch den F -Test bei einem Signifikanzniveau von 0,05 verglichen.

Das Verhältnis

$$F = s_2^2 / s_1^2 \quad (40)$$

wird berechnet und sein Wert mit dem Tabellenwert F_0 mit den Freiheitsgraden $f_n = k - 2$ und $f_d = N - k$ verglichen (Tabellen C.2 und C.3):

$$F_0 = F(0,95, k - 2, N - k)$$

a) Ist $F \leq F_0$, wird der Erwartungswert für die zusammengefasste Varianz berechnet nach:

$$s^2 = \frac{(N - k)s_1^2 + (k - 2)s_2^2}{(N - 2)} \quad (41)$$

b) Ist $F > F_0$, wird s_1^2 zu $(s_1^2)_a = s_1^2(F/F_0)$ und hiermit der angepasste Wert von s_2 berechnet:

$$s_a^2 = \frac{(N - k)(s_1^2)_a + (k - 2)s_2^2}{(N - 2)} \quad (42)$$

6.3.3 Vertrauensgrenzen für die Erwartungswerte von X und Y

Der Tabellenwert für Student's t -Verteilung bei $N - 2$ Freiheitsgraden und einem Vertrauensniveau von 0,95 wird als $t_{0,95, N-2}$ entnommen (Tabelle C.4).

Der Wert von t wird entsprechend der Beschränkung der Messreihen zu dem korrigierten Wert t_c umgerechnet nach:

$$t_c = \left(\frac{1}{t_{0,95, N-2}} - \frac{(1 - N/M)}{N/8 + 4,5} \right)^{-1} \quad (43)$$

a) Erwartungswerte für Y

Es werden der Erwartungswert von Y zu einem vorgegebenen Wert X und die zugehörige untere 95 %-Vertrauensgrenze wie folgt berechnet:

$$\hat{Y}_c = \hat{Y} - t_c s_Y, \quad \hat{Y} = a + bx \quad (44)$$

$$s_Y^2 = \frac{s^2}{N} \left[1 + \frac{(X - \bar{x})^2}{\mu_2(x)} \right] \quad (45)$$

Für die Kurve der Vertrauensgrenzen im thermischen Langzeitdiagramm (siehe 6.4) wird Y_c für verschiedene Wertepaare (X, Y) über den interessierenden Bereich berechnet und die Kurve durch die eingetragenen Punkte (X, Y_c) in das Diagramm eingezeichnet.

Falls $F > F_0$ ist, muss der Wert von s_2 durch den für s_a^2 ersetzt werden (Gleichung (42)).

b) Erwartungswerte für X

Der Wert von $\hat{X}$ und die zugehörige obere 95 %-Vertrauensgrenze werden für eine Ausfallzeit τ berechnet nach:

$$\hat{X}_c = \bar{x} + \frac{(Y - \bar{y})}{b_r} + \frac{t_c s_r}{b_r} \quad (46)$$

$$Y = \log \tau_f : \hat{X} = (Y - a) / b \quad (47)$$

$$b_r = b - \frac{t_c^2 s^2}{N b \mu_2(x)} \quad (48)$$

$$s_r^2 = \frac{s^2}{N} \left(\frac{b_r}{b} + \frac{(\hat{X} - \bar{x})^2}{\mu_2(x)} \right) \quad (49)$$

Der Erwartungswert für die Temperatur und die zugehörige untere 95 %-Vertrauensgrenze müssen aus dem zugehörigen Erwartungswert für X und dessen oberer Vertrauensgrenze wie folgt berechnet werden:

$$\hat{\vartheta} = \frac{1}{\hat{X}} - \Theta_0, \quad \hat{\vartheta}_c = \frac{1}{\hat{X}_c} - \Theta_0 \quad (50)$$

6.4 Thermisches Belastungsdiagramm

Die Regressionsgerade wird, nachdem sie festgelegt wurde, in das thermische Langzeitdiagramm eingezeichnet, d. h. in ein Diagramm mit $y = \log(\tau)$ als Ordinate und mit $x = 1/(\vartheta - \Theta_0)$ als Abszisse. Üblicherweise wird x von rechts nach links ansteigend eingetragen und die zugehörigen Werte von ϑ in °C auf dieser Achse gekennzeichnet (siehe Bild D.1a und Bild D.1b). Besonderes Diagrammpapier für diesen Zweck ist verfügbar.

Wahlweise kann ein Computerprogramm, das die Berechnungen ausführt, ein Unterprogramm zur Aufzeichnung des Diagramms mit den geeigneten nichtlinearen Skalen enthalten.

Die Einzelwerte $y_{ij} = (\tau_{ij})$ und die nach 6.2.1 ermittelten Mittelwerte $\bar{y}_i$ werden in das Diagramm bei den zugehörigen Werten von x_i :

$$x_i = 1/(\vartheta_i + \Theta_0) \quad (51)$$

eingezeichnet.

Das thermische Langzeitdiagramm kann durch das Einzeichnen der Kurve der unteren 95 %-Vertrauensgrenzen vervollständigt werden (siehe 6.3.3).

7 Berechnung und Anforderungen an die Ergebnisse

7.1 Berechnung der thermischen Langzeitkennwerte

Unter Verwendung der Regressionsgleichung

$$y = a + bx \quad (52)$$

(die Koeffizienten a und b wurden nach 6.2.3 berechnet) wird die Temperatur in °C zu einer Ausfallzeit von 20 kh berechnet. Der Zahlenwert dieser Temperatur ist der Temperaturindex TI.

Auf die gleiche Weise wird der Zahlenwert der Temperatur zu einer Ausfallzeit von 10 kh berechnet: TI₁₀. Das Halbzeitintervall HIC ist dann:

$$\text{HIC} = \text{TI}_{10} - \text{TI} \quad (53)$$

Nach dem in 6.3.3 b) angegebenen Verfahren wird für $Y = \log 20\,000$ die untere 95 %-Vertrauensgrenze für TI berechnet: TC oder TC_a, Letztere, wenn der angepasste Wert s_a^2 eingesetzt wurde.

Der Wert von $(\text{TI} - \text{TC})/\text{HIC}$ oder $(\text{TI} - \text{TC}_a)/\text{HIC}$ wird ermittelt.

Das thermische Langzeitdiagramm wird gezeichnet (siehe 6.4).

7.2 Zusammenfassung der statistischen Überprüfungen und Prüfbericht

In Tabelle B.1 ist, wenn eine Bedingung in der Spalte „Logische Entscheidung“ nicht erfüllt ist, so vorzugehen, wie es in der letzten Spalte angegeben ist^{N1}. Ist die Bedingung erfüllt, wird so weitergegangen, wie dies im nächsten Schritt aufgezeigt ist. Die gleiche Abfolge ist in dem Flussdiagramm für thermische Langzeitberechnungen aufgezeigt, siehe Anhang A.

7.3 Angabe der Ergebnisse

7.3.1 Wenn der Wert von $(\text{TI} - \text{TC})/\text{HIC} \leq 0,6$ ist, muss das Ergebnis in der Form

$$\text{TI (HIC): xxx (xx,x)} \quad (54)$$

angegeben werden, in Übereinstimmung mit IEC 60216-1:2013.

7.3.2 Wenn $0,6 < (\text{TI} - \text{TC})/\text{HIC} \leq 1,6$ und gleichzeitig $F \leq F_0$ ist (siehe 6.3.2), muss der Wert

$$\text{TI}_a = \text{TC} + 0,6 \text{ HIC} \quad (55)$$

zusammen mit HIC als TI (HIC): xxx (xx,x) angegeben werden.

7.3.3 In allen anderen Fällen muss das Ergebnis in der Form

$$\text{TI}_g = \dots, \quad \text{HIC}_g = \dots \quad (56)$$

angegeben werden.

7.3.4 Wenn eine andere Zeit als 20 000 h für die Ableitung des TI verwendet wurde, muss die entsprechende Zeit in kh angegeben und von „kh“ gefolgt werden. Das Format des TI ist dann:

$$\text{TI xx kh (HIC): xxx (xx,x)} \quad (57)$$

und entsprechend für TI_a und TI_g.

8 Prüfbericht

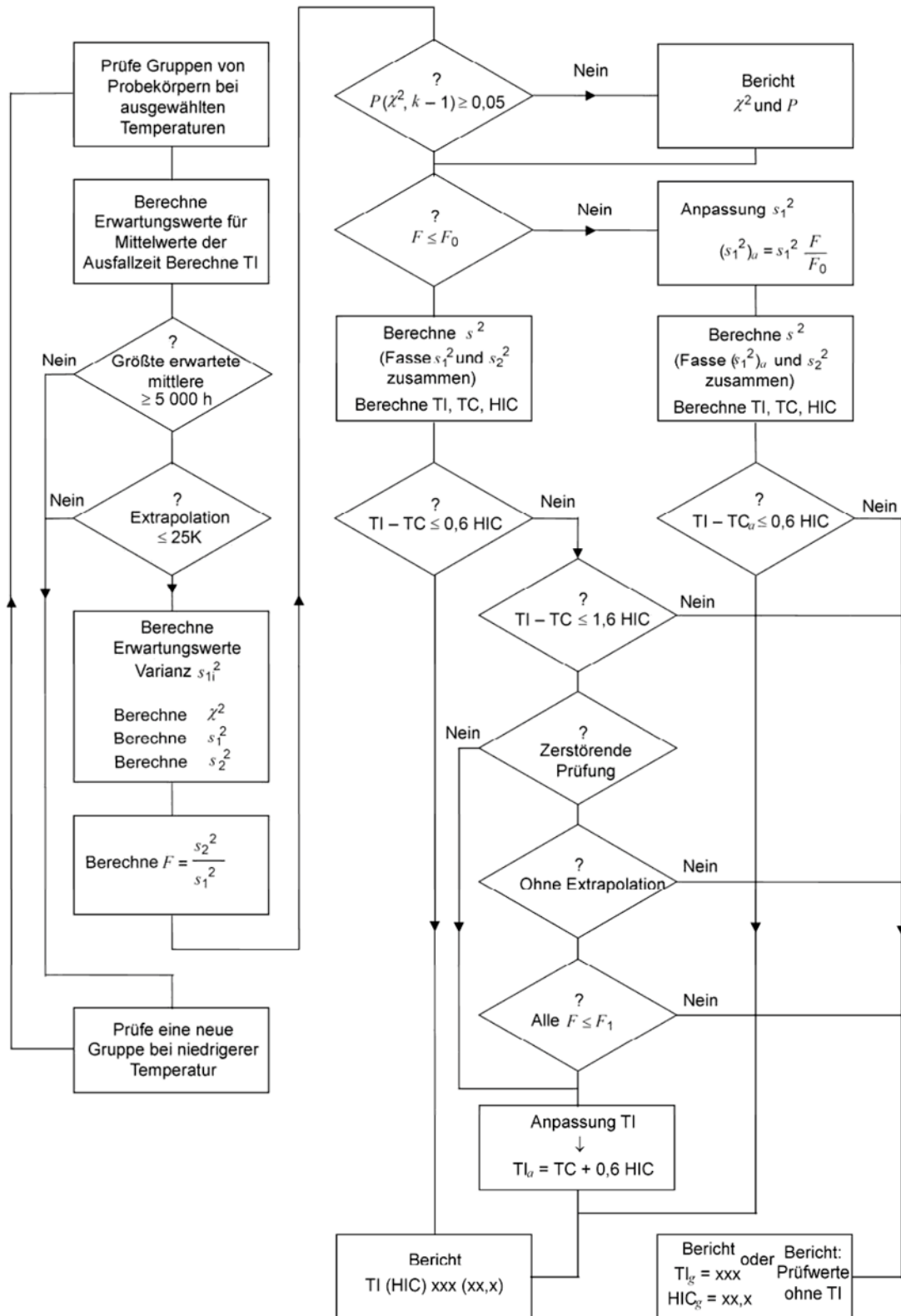
Der Prüfbericht muss enthalten:

^{N1} An dieser Stelle wurde die Übersetzung des Vorgängers übernommen, auch wenn in der Tabelle B.1 keine Spalte mit der Überschrift „Test“ vorhanden ist; möglicherweise ist die Spalte „Test or action“ gemeint, die bereits im Vorgänger mit „Überprüfung oder Operation“ und nicht mit „Logische Entscheidung“ übersetzt worden ist.

- a) eine Beschreibung des geprüften Materials einschließlich der Abmessungen und einer etwaigen Vorbehandlung der Probekörper;
- b) die geprüfte Eigenschaft, den gewählten Grenzwert und, falls dieser zu bestimmen war, den Anfangswert der Eigenschaft;
- c) das zur Bestimmung der Eigenschaftswerte verwendete Prüfverfahren (z. B. durch Bezug auf eine IEC-Publikation);
- d) weitere wesentliche Angaben zu dem Prüfverfahren, z. B. die Umgebungsbedingungen bei der Warmlagerung;
- e) die einzelnen Lagerungstemperaturen mit infrage kommenden Kennwerten für das Prüfverfahren,
 - 1) für zerstörungsfreie Prüfungen: die Einzelwerte der Ausfallzeiten;
 - 2) für Schwellenwertprüfungen: die Anzahl und Dauer der Lagerungszyklen mit der Anzahl der Probekörper, die während der einzelnen Lagerungszyklen den Grenzwert erreichten;
 - 3) für zerstörende Prüfungen: die Lagerungszeiten und die einzelnen Eigenschaftswerte, dazu die Diagramme mit der Änderung der Eigenschaft über der Zeit;
- f) das thermische Langzeitdiagramm;
- g) den Temperaturindex und das Halbzeitintervall, angegeben in der Form, wie sie in 7.3 festgelegt ist;
- h) die Werte von χ^2 und P , sofern dies nach 6.3.1 verlangt wird;
- i) Ausfälle während des ersten Prüfzyklus, gemäß 5.1.2.

Anhang A (normativ)

Flussdiagramm des Entscheidungsablaufes



Anhang B (normativ)

Tabelle des Entscheidungsablaufes

Tabelle B.1 – Logische Entscheidungen und Operationen gemäß den Überprüfungen

Schritt	Überprüfung oder Operation ^a	Bezug	Operation bei „Nein“ nach Überprüfung
1	Größter Mittelwert der Ausfallzeit $\geq 5\,000\text{ h}$	5.5 von IEC 60216-1	Gehe nach Schritt 15
2	Extrapolation $\leq 25\text{ K}$	5.5 von IEC 60216-1	Gehe nach Schritt 15
3	$P(\chi^2, f) \geq 0,05$	6.3.1	Bericht: χ^2 und P Gehe nach Schritt 4
4	$F \leq F_0$	6.3.2	Gehe nach Schritt 12
5	$TI - TC \leq 0,6\text{ HIC}$	7.3	Gehe nach Schritt 7
6	Bericht: TI (HIC): xxx (xx,x)	7.3	
7	$TI - TC \leq 1,6\text{ HIC}$	7.3	Gehe nach Schritt 14
8	Werden zerstörende Prüfverfahren verwendet	6.1.4.4	Gehe nach Schritt 11
9	Wurden die Messwerte ohne Extrapolation erhalten	6.1.4.4	Gehe nach Schritt 14
10	Waren alle Werte von $F \leq F_1$	6.1.4.4	Gehe nach Schritt 14
11	Bericht: TI_a = TC + 0,6 HIC als TI (HIC): ... (%)	7.3	
12	$TI - TC_a \leq 0,6\text{ HIC}$	6.3.2	Gehe nach Schritt 14
13	Bericht: TI (HIC): xxx (xx,x)	7.3	
14	Bericht: TI_g = xxx, HIC_g = xx,x	7.3	
15	Prüfung einer neuen Gruppe bei niedrigerer Temperatur		
^a Eine Operation wird durch Fettdruck angezeigt.			

Anhang C (informativ)

Statistische Tabellen

Tabelle C.1 – Koeffizienten für die Berechnungen bei beschränkten Messreihen (1 von 7)

m	n	α	β	μ	ε
5	3	614,470 506 172 8	-100,380 198 559 7	0,000 000 000 0	860,448 288 888 9
5	4	369,315 310 001 2	-70,671 293 489 9	472,493 715 084 2	874,074 589 444 7
6	4	395,414 213 960 5	-58,270 118 352 3	222,691 521 846 8	835,765 030 646 5
6	5	272,528 723 805 2	-44,098 885 093 6	573,512 612 381 5	887,106 668 142 6
7	4	415,588 035 156 3	-46,540 155 273 4	0,000 000 000 0	841,774 673 437 5
7	5	289,191 447 008 9	-38,006 043 810 7	364,264 215 381 5	837,368 126 781 9
7	6	215,514 679 687 5	-30,136 366 210 9	642,234 560 615 2	898,799 440 429 7
8	5	302,255 954 330 4	-32,045 551 009 5	173,745 192 558 9	823,132 502 297 0
8	6	227,132 033 490 0	-26,714 924 272 0	462,394 689 655 8	845,589 167 341 7
8	7	178,019 204 785 1	-21,890 905 564 9	692,008 291 149 8	908,717 523 176 5
9	5	312,981 200 000 0	-26,384 270 000 0	0,000 000 000 0	830,502 200 000 0
9	6	236,385 800 000 0	-23,298 610 000 0	296,052 630 000 0	821,317 260 000 0
9	7	186,640 100 000 0	-19,789 890 000 0	534,460 180 000 0	855,209 670 000 0
9	8	151,512 000 000 0	-16,614 080 000 0	729,711 990 000 0	917,058 320 000 0
10	6	244,119 156 089 0	-20,004 774 072 9	142,373 900 284 7	815,821 088 682 6
10	7	193,620 588 004 7	-17,666 360 481 4	386,952 601 761 8	825,759 043 775 3
10	8	158,230 060 832 0	-15,243 793 158 2	589,634 132 230 7	864,621 929 488 4
10	9	131,803 038 236 3	-13,034 762 797 6	759,253 366 384 2	924,098 919 253 1
11	6	250,685 932 098 8	-16,853 035 429 5	0,000 000 000 0	822,972 912 731 5
11	7	199,469 546 848 7	-15,583 654 537 4	249,259 995 307 9	812,630 898 625 4
11	8	163,699 612 133 7	-13,837 118 255 7	457,209 096 574 3	832,548 816 179 9
11	9	137,229 924 382 7	-12,100 190 779 3	633,229 292 467 8	873,335 541 088 0
11	10	116,591 321 046 4	-10,496 956 971 8	783,017 794 944 4	930,088 037 299 4
12	7	204,534 992 422 9	-13,576 711 024 4	120,574 855 492 1	810,980 305 184 0
12	8	168,329 219 660 0	-12,443 988 079 5	332,551 955 767 4	814,726 902 133 0
12	9	141,642 522 967 4	-11,121 946 667 6	513,149 341 538 3	840,062 504 581 7

Tabelle C.1 (2 von 7)

m	n	α	β	μ	ε
12	10	121,088 479 244 8	-9,835 950 775 4	668,539 265 126 9	881,240 032 296 2
12	11	104,506 080 037 5	-8,633 379 584 8	802,544 129 235 6	935,228 223 004 9
13	7	208,940 611 828 4	-11,645 614 282 7	0,000 000 000 0	817,592 186 339 0
13	8	172,346 425 140 0	-11,086 526 420 1	215,202 335 515 1	807,269 942 297 3
13	9	145,417 868 782 7	-10,147 234 899 2	399,323 652 033 8	819,318 009 509 0
13	10	124,737 192 422 5	-9,130 008 532 8	558,746 158 905 5	847,590 859 692 6
13	11	108,301 805 863 3	-8,151 081 966 3	697,715 856 087 3	888,359 118 118 9
13	12	94,679 614 970 6	-7,225 211 787 4	818,869 702 877 8	939,679 419 663 9
14	8	175,901 842 209 0	-9,774 682 609 8	104,554 351 698 0	807,510 679 332 7
14	9	148,706 654 321 0	-9,189 143 374 5	291,514 076 584 4	807,927 394 074 1
14	10	127,881 689 678 0	-8,422 450 692 9	454,060 900 206 5	825,039 882 806 3
14	11	111,381 769 972 9	-7,626 697 130 2	596,623 583 260 4	854,823 830 446 3
14	12	97,927 824 691 4	-6,863 605 925 9	722,224 918 847 7	894,761 415 308 6
14	13	86,536 307 523 1	-6,135 526 882 2	832,719 252 448 7	943,566 894 197 6
15	8	179,051 340 576 2	-8,507 153 076 2	0,000 000 000 0	813,556 818 212 9
15	9	151,627 445 154 0	-8,256 692 317 2	189,315 731 952 4	803,657 234 619 6
15	10	130,638 736 267 4	-7,722 878 628 9	354,390 697 378 5	810,944 133 571 3
15	11	114,045 779 796 6	-7,097 395 186 3	499,752 662 880 0	831,192 011 019 8
15	12	100,571 888 183 6	-6,464 822 448 7	628,585 928 820 5	861,635 264 831 5
15	13	89,346 612 386 1	-5,857 855 430 9	743,099 738 270 9	900,526 205 166 5
15	14	79,679 695 687 0	-5,275 139 366 7	844,614 393 863 7	946,988 901 484 6
16	9	154,251 868 908 5	-7,352 734 812 9	92,286 597 662 4	804,890 154 565 0
16	10	133,092 655 230 3	-7,037 490 348 3	259,470 300 502 6	803,417 948 946 8
16	11	116,397 190 014 4	-6,571 880 798 3	407,107 444 694 2	815,225 911 951 0
16	12	102,862 022 796 0	-6,059 026 278 1	538,470 351 887 8	837,405 616 491 7
16	13	91,647 511 041 4	-5,548 523 480 8	655,915 300 372 3	867,986 413 358 9
16	14	82,133 483 929 8	-5,057 399 050 1	761,089 730 468 5	905,730 213 237 4
16	15	73,828 121 853 0	-4,583 976 609 5	854,940 091 579 0	950,022 975 937 6
17	9	156,610 475 842 1	-6,476 460 274 5	0,000 000 000 0	810,419 011 339 7
17	10	135,306 977 099 1	-6,369 862 523 4	168,979 564 112 2	801,066 074 880 2
17	11	118,497 493 348 7	-6,054 318 734 9	318,520 886 724 6	805,318 062 739 4
17	12	104,894 493 937 6	-5,654 673 321 1	451,948 602 041 3	820,151 369 194 9
17	13	93,641 407 943 0	-5,231 044 716 6	571,696 183 063 2	843,486 177 866 0
17	14	84,157 807 920 1	-4,813 301 797 2	679,548 045 681 0	873,880 335 131 3

Tabelle C.1 (3 von 7)

m	n	α	β	μ	ε
17	15	75,987 691 268 4	-4,410 061 254 4	776,751 703 284 6	910,442 891 855 0
17	16	68,776 185 039 1	-4,020 399 239 0	863,986 627 489 9	952,730 802 137 3
18	10	137,319 690 100 1	-5,720 840 122 8	82,592 591 372 5	802,835 654 113 7
18	11	120,396 550 341 6	-5,547 705 212 4	233,762 521 677 5	800,258 419 848 3
18	12	106,717 957 142 0	-5,254 869 270 6	368,923 773 992 3	808,487 834 862 6
18	13	95,417 915 235 3	-4,913 521 939 3	490,558 207 272 5	825,357 995 890 6
18	14	85,912 982 279 7	-4,560 657 091 3	600,519 390 056 5	849,333 989 100 0
18	15	77,784 669 734 1	-4,214 502 545 1	700,184 082 553 0	879,339 504 407 5
18	16	70,690 282 324 6	-3,879 229 298 2	790,508 013 638 6	914,725 238 932 5
18	17	64,370 690 391 9	-3,554 819 683 0	871,976 998 724 4	955,161 899 362 0
19	10	139,149 625 000 0	-5,090 018 125 0	0,000 000 000 0	807,909 618 750 0
19	11	122,130 237 500 0	-5,053 480 937 5	152,583 847 187 5	799,119 842 812 5
19	12	108,370 456 250 0	-4,861 845 937 5	289,231 816 562 5	801,360 262 500 0
19	13	97,018 825 000 0	-4,598 604 062 5	412,455 355 937 5	812,396 743 437 5
19	14	87,480 900 000 0	-4,306 963 437 5	524,150 835 000 0	830,631 200 000 0
19	15	79,344 375 000 0	-4,010 505 625 0	625,758 673 437 5	854,902 153 125 0
19	16	72,297 331 250 0	-3,720 423 750 0	718,357 160 937 5	884,394 535 000 0
19	17	66,078 087 307 1	-3,438 596 529 0	802,684 840 281 0	918,630 065 987 3
19	18	60,495 123 456 8	-3,165 752 232 4	879,085 324 747 8	957,356 388 289 5
20	11	123,720 724 690 7	-4,571 903 849 4	74,739 952 689 8	801,179 011 626 4
20	12	109,882 247 113 5	-4,477 035 548 8	212,683 662 366 2	797,948 281 173 8
20	13	98,473 823 238 1	-4,287 939 233 2	337,273 238 927 2	803,677 721 219 6
20	14	88,899 384 983 5	-4,054 686 452 3	450,433 824 821 7	816,713 086 237 3
20	15	80,740 119 043 3	-3,804 781 413 9	553,643 825 389 0	835,843 732 032 9
20	16	73,694 598 203 3	-3,553 609 281 2	648,041 435 461 8	860,173 538 768 6
20	17	67,524 357 313 6	-3,308 057 336 8	734,481 449 050 2	889,078 451 004 8
20	18	62,027 051 120 2	-3,068 869 206 8	813,538 080 764 9	922,202 807 269 0
20	19	57,059 331 163 4	-2,837 292 341 8	885,449 527 637 9	959,347 069 438 1
21	11	125,180 504 268 8	-4,102 787 081 4	0,000 000 000 0	805,857 221 187 1
21	12	111,274 858 447 6	-4,101 040 726 7	139,085 614 417 5	797,605 437 620 2
21	13	99,807 327 895 4	-3,982 732 403 3	264,868 574 231 4	798,472 591 530 8
21	14	90,192 703 419 5	-3,805 109 379 9	379,291 522 952 8	806,763 785 482 7
21	15	82,006 895 840 0	-3,599 696 102 2	483,858 887 792 2	821,225 961 821 7
21	16	74,946 575 450 5	-3,384 632 353 4	579,743 276 288 7	840,921 205 171 3
21	17	68,784 814 683 3	-3,170 115 019 5	667,856 652 288 5	865,147 773 729 6

Tabelle C.1 (4 von 7)

m	n	α	β	μ	ε
21	18	63,335 741 064 5	-2,960 377 331 2	748,883 265 049 3	893,423 810 538 9
21	19	58,441 207 543 7	-2,755 639 453 1	823,271 305 249 0	925,482 471 420 9
21	20	53,992 487 284 4	-2,557 464 289 7	891,180 261 676 2	961,160 991 780 3
22	12	112,562 249 376 3	-3,733 942 654 3	68,249 899 230 9	799,813 456 437 8
22	13	101,038 358 565 9	-3,683 676 456 5	195,088 306 477 2	796,200 753 033 8
22	14	91,380 460 456 0	-3,559 186 854 7	310,616 120 426 8	800,134 506 430 3
22	15	83,165 536 713 6	-3,396 328 281 6	416,355 757 299 6	810,324 221 550 3
22	16	76,085 740 665 3	-3,215 758 572 9	513,502 991 079 9	825,800 027 083 5
22	17	69,915 447 090 2	-3,029 759 742 9	603,001 704 223 8	845,821 800 161 5
22	18	64,479 595 568 7	-2,845 164 997 2	685,591 100 846 1	869,833 743 632 6
22	19	59,631 110 650 6	-2,664 566 007 3	761,823 205 764 4	897,461 327 883 1
22	20	55,245 182 109 6	-2,487 974 468 3	832,048 472 778 3	928,502 565 642 9
22	21	51,238 188 548 3	-2,317 111 964 4	896,367 325 561 6	962,820 644 707 6
23	12	113,753 114 824 5	-3,375 661 462 4	0,000 000 000 0	804,147 498 958 3
23	13	102,180 592 915 5	-3,391 035 253 9	127,779 779 922 2	796,393 802 656 5
23	14	92,478 714 378 2	-3,317 568 453 9	244,286 853 730 7	796,302 286 039 9
23	15	84,232 065 039 4	-3,195 430 410 7	351,054 316 620 9	802,558 394 510 6
23	16	77,130 671 601 8	-3,047 956 733 6	449,294 709 215 6	814,162 196 954 9
23	17	70,946 228 319 6	-2,889 128 739 5	539,972 715 916 5	830,348 307 946 7
23	18	65,506 773 051 7	-2,727 427 071 3	623,857 738 790 5	850,523 990 198 2
23	19	60,674 543 903 7	-2,567 467 256 7	701,554 759 605 1	874,245 203 107 7
23	20	56,331 747 664 1	-2,410 824 975 7	773,511 902 625 0	901,219 290 370 3
23	21	52,378 971 244 4	-2,257 458 807 1	840,003 110 782 9	931,291 926 725 9
23	22	48,750 967 330 6	-2,109 138 220 4	901,084 347 837 2	964,344 871 037 5
24	13	103,243 347 881 9	-3,104 836 192 9	62,796 296 393 4	798,667 677 335 2
24	14	93,499 899 161 3	-3,080 597 976 9	180,179 665 703 1	794,841 653 545 8
24	15	85,219 822 400 0	-2,997 560 243 2	287,859 544 598 4	797,456 360 640 0
24	16	78,094 848 041 1	-2,881 836 788 2	387,060 117 227 4	805,486 809 924 8
24	17	71,894 122 886 0	-2,749 128 344 1	478,761 192 082 8	818,144 554 412 7
24	18	66,444 704 304 8	-2,609 144 801 8	563,751 195 249 6	834,815 363 694 5
24	19	61,612 691 563 3	-2,467 829 940 8	642,664 080 518 4	855,018 951 419 5
24	20	57,287 908 800 0	-2,328 319 155 2	715,998 983 808 0	878,398 189 184 0
24	21	53,375 054 194 3	-2,191 560 665 7	784,121 449 345 2	904,723 395 218 0
24	22	49,794 229 859 7	-2,057 530 704 7	847,245 055 046 6	933,875 440 847 1
24	23	46,493 767 000 5	-1,927 973 165 6	905,392 264 548 8	965,749 572 297 4

Tabelle C.1 (5 von 7)

m	n	α	β	μ	ε
25	13	104,232 885 613 2	-2,825 050 151 1	0,000 000 000 0	802,701 301 544 1
25	14	94,453 143 892 0	-2,848 396 832 3	118,172 687 883 0	795,402 438 793 7
25	15	86,139 657 001 5	-2,803 071 458 2	226,670 678 353 7	794,630 540 737 9
25	16	78,989 382 024 2	-2,717 860 940 0	326,724 816 668 1	799,346 648 224 3
25	17	72,770 823 174 3	-2,610 275 202 5	419,326 141 499 8	808,740 684 495 8
25	18	67,309 061 167 5	-2,491 180 827 8	505,276 666 008 1	822,180 644 398 6
25	19	62,470 447 683 2	-2,367 461 361 3	585,228 093 541 2	839,166 598 102 9
25	20	58,148 780 157 1	-2,243 330 943 3	659,707 591 544 9	859,305 787 476 1
25	21	54,254 772 141 2	-2,120 927 932 5	729,129 747 248 1	882,309 499 023 6
25	22	50,710 634 469 5	-2,000 815 184 9	793,793 828 693 6	907,996 803 098 9
25	23	47,451 582 466 4	-1,883 013 652 0	853,865 474 685 9	936,274 654 862 4
25	24	44,436 084 435 5	-1,769 195 964 9	909,341 937 225 5	967,048 258 250 8
26	14	95,344 951 652 9	-2,620 976 346 5	58,149 346 185 6	797,692 105 701 4
26	15	87,000 011 060 1	-2,612 140 016 6	167,386 495 331 3	793,760 045 585 9
26	16	79,823 556 347 0	-2,556 356 239 1	268,207 052 434 6	795,387 979 746 5
26	17	73,585 712 493 3	-2,472 950 569 9	361,609 787 669 1	801,749 088 924 2
26	18	68,110 255 082 3	-2,373 992 685 8	448,407 042 544 8	812,194 055 876 7
26	19	63,262 342 617 2	-2,267 184 422 5	529,262 848 347 4	826,208 688 490 2
26	20	58,936 792 778 9	-2,157 486 675 1	604,721 224 122 4	843,381 329 569 6
26	21	55,048 042 936 4	-2,047 914 524 5	675,223 991 890 1	863,388 484 003 6
26	22	51,522 935 221 6	-1,939 929 951 9	741,117 446 777 6	885,995 805 567 7
26	23	48,297 466 480 8	-1,833 861 504 0	802,647 219 753 4	911,060 297 192 9
26	24	45,318 643 413 4	-1,729 780 273 4	859,940 670 651 4	938,508 290 093 4
26	25	42,552 583 209 7	-1,629 261 554 1	912,976 149 171 2	968,252 478 710 8
27	14	96,179 952 415 7	-2,398 330 795 0	0,000 000 000 0	801,462 097 378 7
27	15	87,807 233 951 0	-2,424 824 879 2	109,908 447 002 3	794,576 240 291 9
27	16	80,604 908 585 4	-2,397 518 691 3	211,422 762 924 1	793,315 879 921 6
27	17	74,346 695 559 0	-2,337 441 207 8	305,545 934 609 8	796,846 398 872 9
27	18	68,856 363 573 0	-2,257 899 609 6	393,098 036 470 7	804,502 877 056 5
27	19	63,997 827 886 1	-2,167 418 784 4	474,752 453 008 4	815,757 617 370 5
27	20	59,665 408 004 9	-2,071 567 175 3	551,064 568 013 3	830,186 793 990 7
27	21	55,774 966 628 5	-1,973 967 843 6	622,492 414 801 3	847,448 219 212 0
27	22	52,256 650 509 1	-1,876 793 609 6	689,408 781 849 6	867,273 947 639 7
27	23	49,049 953 893 3	-1,781 045 141 6	752,104 268 197 1	889,473 159 384 9
27	24	46,101 825 203 4	-1,686 910 857 4	810,780 782 969 1	913,932 486 779 3
27	25	43,368 537 622 7	-1,594 507 505 2	865,534 983 389 9	940,592 671 976 3
27	26	40,822 044 246 6	-1,505 300 292 0	916,331 145 646 2	969,372 165 667 9

Tabelle C.1 (6 von 7)

m	n	α	β	μ	ε
28	15	88,566 025 912 5	-2,241 132 818 2	54,142 478 801 1	796,851 152 756 7
28	16	81,339 370 105 7	-2,241 441 397 0	156,288 646 095 9	792,882 432 527 5
28	17	75,060 373 981 7	-2,203 940 607 0	251,064 797 130 7	793,761 059 837 3
28	18	69,554 150 197 3	-2,143 147 145 2	339,296 241 903 9	798,810 986 602 2
28	19	64,683 999 121 8	-2,068 438 756 0	421,663 641 341 7	807,491 370 564 5
28	20	60,343 313 763 4	-1,985 966 124 9	498,730 858 604 3	819,367 766 769 3
28	21	56,447 978 854 4	-1,899 822 629 5	570,966 583 043 2	834,086 917 498 6
28	22	52,929 720 988 9	-1,812 683 033 9	638,759 337 098 7	851,362 210 800 1
28	23	49,730 866 708 1	-1,726 122 211 5	702,425 476 425 6	870,970 736 294 0
28	24	46,800 965 426 3	-1,640 824 982 1	762,209 793 536 6	892,756 725 488 4
28	25	44,095 734 093 7	-1,556 898 149 9	818,278 335 252 4	916,630 022 383 7
28	26	41,578 780 488 7	-1,474 495 826 6	870,703 044 247 0	942,542 088 687 8
28	27	39,226 562 034 9	-1,394 969 127 3	919,437 834 977 3	970,415 906 516 9
29	15	89,279 883 950 6	-2,061 068 353 9	0,000 000 000 0	800,388 437 037 0
29	16	82,031 509 834 9	-2,088 154 781 9	102,724 036 530 3	793,877 036 548 2
29	17	75,732 129 652 0	-2,072 559 754 0	198,095 960 802 7	792,263 582 227 8
29	18	70,209 350 617 3	-2,029 914 279 8	286,943 773 786 0	794,868 014 074 1
29	19	65,326 705 651 2	-1,970 453 580 3	369,953 573 812 1	801,138 249 032 6
29	20	60,976 857 817 2	-1,900 926 199 3	447,695 899 552 2	810,629 267 057 7
29	21	57,075 122 222 2	-1,825 852 469 1	520,647 203 374 5	822,979 169 012 3
29	22	53,553 594 979 1	-1,748 283 440 2	589,206 152 039 4	837,890 741 721 5
29	23	50,356 178 834 6	-1,670 211 381 3	653,704 451 693 1	855,122 458 451 0
29	24	47,434 795 061 7	-1,592 782 963 0	714,411 894 115 2	874,488 236 049 4
29	25	44,747 071 219 0	-1,516 466 229 5	771,535 321 180 3	895,860 662 948 3
29	26	42,255 794 376 7	-1,441 322 471 7	825,211 204 490 1	919,167 805 180 3
29	27	39,930 419 412 0	-1,367 534 108 1	875,491 537 135 3	944,369 090 532 7
29	28	37,750 921 973 1	-1,296 339 683 3	922,322 734 544 5	971,391 163 917 5
30	16	82,684 820 885 4	-1,937 664 400 8	50,652 014 573 0	796,118 572 279 5
30	17	76,366 256 465 8	-1,943 349 624 5	146,570 247 501 8	792,158 476 319 7
30	18	70,826 762 953 8	-1,918 317 017 4	235,981 114 359 5	792,461 131 587 5
30	19	65,930 930 098 6	-1,873 623 032 8	319,574 313 579 2	796,467 129 928 9
30	20	61,571 167 864 8	-1,816 627 096 1	397,925 628 146 2	803,721 454 578 9
30	21	57,662 159 653 0	-1,752 277 838 5	471,517 592 025 1	813,853 822 773 7
30	22	54,135 742 160 1	-1,683 950 682 5	540,756 077 379 4	826,559 615 528 3
30	23	50,936 394 609 4	-1,613 946 311 8	605,982 564 971 8	841,586 818 964 2
30	24	48,017 520 085 7	-1,543 759 560 3	667,481 860 128 2	858,730 910 242 0
30	25	45,338 701 707 0	-1,474 228 249 3	725,485 016 653 2	877,836 129 828 8