

DIN EN IEC 60216-6
(VDE 0304-26)
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 2020-09-17

Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 60216-6
(VDE 0304-26):2007-06

Entwurf

Elektroisolierstoffe –
Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens –
Teil 6: Bestimmung der thermischen Langzeitkennwerte (TI und RTI) eines Isolierstoffes unter
Anwendung des Festzeitrahmenverfahrens
(IEC 112/476/CD:2019);
Text Deutsch und Englisch

Electrical insulating materials –
 Thermal endurance properties –
 Part 6: Determination of thermal endurance indices (TI and RTI) of an insulating material using the fixed time frame method
 (IEC 112/476/CD:2019);
 Text in German and English

Matériaux isolants électriques –
 Propriétés d'endurance thermique –
 Partie 6: Détermination des indices d'endurance thermique (TI et RTI) d'un matériau isolant en utilisant la méthode de „trame de durées fixes (fixed time frame)“
 (IEC 112/476/CD:2019);
 Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-07-17 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 94 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist ...

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 112/476/CD:2019 „Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 6: Determination of thermal endurance indices (TI and RTI) of an insulating material using the fixed time frame method“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

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

Das internationale Dokument wurde vom TC 112 „Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und unterliegt dem Copyright der IEC .

Das Dokument wurde 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.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Änderungen

Gegenüber **DIN EN 60216-6 (VDE 0304-26):2007-06** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Klärung der Definition der Indexeigenschaften vs. Langzeitverhalten;
- b) Vollständige Überarbeitung des Anhangs G und der entsprechenden Software.

	Inhalt	Seite
1	Anwendungsbereich	6
2	Normative Verweisungen	6
3	Begriffe	7
3.1	Begriffe, Abkürzungen und Bezeichnungen	7
3.2	Symbole und Abkürzungen	10
4	FTFM-Protokoll	12
4.1	Grundgedanken und Zielsetzung	12
5	Bestimmung des TI	12
5.1	Alterungsverfahren	12
5.2	Alterungszeiten und -temperaturen	12
5.3	Probekörper	13
5.4	Bewertungsprüfungen	14
5.5	Auswahl der Grenzwerte	14
5.6	Festlegung des Ausgangswertes einer Eigenschaft	14
5.7	Alterungsbedingungen	15
5.8	Verfahren für die Alterung	15
6	Berechnungsverfahren	16
6.1	Allgemeine Grundregeln	16
6.2	Genauigkeit der Berechnungen	17
6.3	Ableitung von Temperaturen äquivalent zu Eigenschaftswerten	17
6.4	Bestimmung der Regression (Temperatur über der Zeit)	20
6.5	Statistische Überprüfungen	21
6.6	Thermisches Langzeitdiagramm	23
7	Berechnung und Anforderungen an die Ergebnisse	24
7.1	Berechnung der thermischen Langzeitkennwerte	24
7.2	Angabe der Ergebnisse	24
8	Prüfbericht	25
9	Bestimmung des RTI	25
9.1	Ziele der Bestimmung des RTI	25
10	Zusätzliche Formelzeichen	26
11	Untersuchungsverfahren	26
11.1	Auswahl des Vergleichsmaterials	26
11.2	Auswahl der Bewertungsprüfung für den Umfang der Alterung	26
11.3	Alterungsverfahren	27
12	Berechnungsverfahren	27
12.1	Allgemeine Grundregeln	27
12.2	Eingabewerte	27

12.3	RTI.....	27
12.4	Vertrauensgrenzen.....	28
12.5	Extrapolation	29
13	Ergebnisse und Prüfbericht.....	29
13.1	Ergebnisse der statistischen und numerischen Prüfungen.....	29
13.2	Untersuchungsergebnis	30
13.3	Prüfbericht.....	30
Anhang A (normativ)	Flussdiagramm des Entscheidungsablaufes.....	31
Anhang B (normativ)	Tabelle des Entscheidungsablaufes	32
Anhang C (informativ)	Statistische Tabellen	34
Anhang D (informativ)	Empfohlene Alterungszeiten und -temperaturen	37
Anhang E (informativ)	Bilder.....	39
Anhang F (normativ)	Statistische Signifikanz der Differenz zwischen zwei Erwartungswerten für die Regression	42
Anhang G (informativ)	Computerprogramm.....	43
Bilder		
Bild E.1	– Diagramm der Eigenschaftswerte über der Temperatur mit Regressionsgerade	39
Bild E.3	– Alterungszeiten und -temperaturen in Bezug auf das thermische Langzeitdiagramm	40
Bild E.4	– Alterungszeiten und -temperaturen in Bezug auf das thermische Langzeitdiagramm	40
Bild E.5	– Alterungszeiten und -temperaturen in Bezug auf das thermische Langzeitdiagramm	41
Bild G.1	– Dialog für die Eigenschaften der Verknüpfung für den Programmstart.....	44
Bild G.2	– Thermisches Langzeitdiagramm	48
Tabellen		
Tabelle B.1	– Entscheidungstabelle	32
Tabelle C.1	– χ^2 -Verteilung	34
Tabelle C.2	– t -Verteilung.....	34
Tabelle C.3	– F -Verteilung, $P = 0,05$	35
Tabelle C.4	– F -Verteilung, $P = 0,005$	36

**Elektroisolierstoffe –
Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens –
Teil 6: Bestimmung der thermischen Langzeitkennwerte (TI und RTI) eines
Isolierstoffes unter Anwendung des Festzeitraahmenverfahrens**

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60216 legt die versuchstechnischen Verfahren und die Verfahren zur Berechnung fest, die bei der Bestimmung der thermischen Langzeitkennwerte Temperaturindex (TI) und relativer Temperaturindex (RTI) eines Werkstoffs unter Verwendung des „Festzeitraahmenverfahrens“ (FTFM) angewendet werden.

Nach diesem Protokoll erfolgt die Alterung über eine kleine Anzahl festgelegter Zeitintervalle, wobei eine geeignete Anzahl von Alterungstemperaturen während jedes Intervalls angewandt wird. Die Eigenschaften der Probekörper werden am Ende des jeweiligen Intervalls gemessen. Dies weicht von dem in IEC 60216-1 verwendeten Verfahren ab, bei dem die Alterung bei einer kleinen Anzahl von festgelegten Temperaturen durchgeführt wird und die Ermittlung der Eigenschaftswerte nach Lagerungszeiten erfolgt, die von dem Fortschreiten der Alterung abhängen.

Die diagnostischen Prüfungen, die im Festzeitraahmenverfahren Verwendung finden, sind auf zerstörende Prüfungen beschränkt. Das Verfahren wurde bisher noch nicht auf zerstörungsfreie Verfahren oder Schwellenwertprüfverfahren angewendet.

Beide Langzeitkennwerte TI und RTI, die entsprechend dem FTFM-Protokoll ermittelt wurden, erhält man aus den Versuchsdaten, die in Übereinstimmung mit den in dieser Norm modifizierten Anweisungen aus IEC 60216-1 und IEC 60216-2 gewonnen wurden. Die Berechnungsverfahren und die statistischen Tests wurden gegenüber denjenigen nach IEC 60216-3 und IEC 60216-5 abgeändert.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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 60212, *Standard conditions for use prior to and during the testing of solid electrical insulating materials*

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

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

IEC 60216-3:2020, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 3: Instructions for calculating thermal endurance characteristics*

IEC 60216-4-1, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 4-1: Ageing ovens – Single-chamber ovens*

IEC 60216-4-2, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 4-2: Ageing ovens – Precision ovens for use up to 300 °C*

IEC 60216-4-3, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 4-3: Ageing ovens – Multi-chamber ovens*

IEC 60216-5:2020, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 5: Determination of relative temperature index (RTI) of an insulating material*

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

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1 Begriffe, Abkürzungen und Bezeichnungen

3.1.1

festgelegter Temperaturindex

ATI

Zahlenwert der Temperatur in Grad Celsius, bis zu der das Vergleichsmaterial bekannte, hinreichende Gebrauchseigenschaften bei der vorgesehenen Anwendung aufweist

Anmerkung 1 zum Begriff: Der ATI kann für ein bestimmtes Material bei verschiedenen Anwendungen des Werkstoffes unterschiedlich sein.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der ATI wird manchmal auch als „absoluter“ Temperaturindex bezeichnet.

3.1.2

Alterungstemperatur

Temperatur in Grad Celsius, bei der eine Gruppe von Probekörpern thermisch gealtert wird

3.1.3

Grenzwerttemperatur

Temperatur in Grad Celsius, bei der für einen Probekörper das Erreichen des Grenzwertes nach Alterung über eine festgelegte Zeit erwartet wird

3.1.4

Untersuchungsmaterial

Material, für dessen thermische Lebensdauer (thermische Dauerstandfestigkeit) ein Schätzwert ermittelt werden soll

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Bestimmung wird durch gleichzeitige Wärmealterung dieses Materials und eines Vergleichsmaterials vorgenommen.

3.1.5

zweites zentrales Moment eines Satzes von Werten

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

3.1.6

95 %-Vertrauensgrenze

statistische Größe, die aus Messwerten berechnet wird und die mit einer Zuverlässigkeit von 95 % eine untere oder obere Grenze für den wahren Wert einer Größe festlegt, wie diese aufgrund einer statistischen Bewertung zu erwarten ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Dies bedeutet, dass es eine Wahrscheinlichkeit von nur 5 % dafür gibt, dass der wahre Wert der erwarteten Größe tatsächlich größer oder kleiner ist als die Vertrauensgrenzen.

Anmerkung 2 zum Begriff: In einem anderen Zusammenhang können manchmal andere Vertrauensgrenzen als 95 % verwendet werden, z. B. bei der Prüfung auf Linearität bei zerstörenden Prüfungen.

3.1.7

Vergleichsmaterial

Material mit bekanntem festgelegtem Temperaturindex (ATI), der vorzugsweise aus Betriebserfahrungen ermittelt wurde, das als Bezugsgröße für vergleichende Prüfungen mit dem Untersuchungsmaterial verwendet wird

3.1.8

Korrelationskoeffizient

Zahl, die ausdrückt, wie vollständig die Beziehung zwischen den Gliedern zweier Datenreihen ist. Sie wird erhalten aus der Kovarianz, dividiert durch die Quadratwurzel aus dem Produkt der Varianzen der Reihen

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Wert des Quadrates dieser Zahl liegt zwischen 0 (keine Korrelation) und 1 (vollständige Korrelation).

Anmerkung 2 zum Begriff: In dieser Norm sind die beiden Gesamtheiten gegeben durch die Werte der unabhängigen Variablen und die Mittelwerte der zugehörigen Gruppen von abhängigen Variablen.

3.1.9

Korrelationszeit von RTI

die erwartete Zeit des Erreichens des Grenzwerts des Vergleichsmaterials bei einer seinem ATI entsprechenden Temperatur in °C

3.1.10

Korrelationszeit von TI

die theoretische Zeit bis zum Erreichen des Grenzwertes; sie wird verwendet, um TI zu berechnen

Anmerkung 1 zum Begriff: Üblicherweise liegt dieser Wert bei 20 000 h.

3.1.11

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 Summe der Produkte der Abweichungen zweier einander zugeordneter Elemente von den jeweiligen Gruppenmittelwerten, geteilt durch die Anzahl der Freiheitsgrade

3.1.12

Freiheitsgrade

Anzahl der Einzelwerte, vermindert um die Anzahl der Parameter

3.1.13

zerstörende Prüfung

bewertende Eigenschaftsprüfung, bei der der Probekörper durch die Eigenschaftsmessung in einer Weise irreversibel verändert wird, die eine wiederholende Messung an dem gleichen Probekörper ausschließt

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Beispiel für einen zerstörenden Test ist die Messung der elektrischen Festigkeit. Ein Beispiel für einen zerstörungsfreien Test ist die Messung von Verlustfaktor $\tan \delta$.

3.1.14

Grenzwertlinie

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

3.1.15

Halbzeitintervall

HIC

(en: humidity indicator card)

Zahlenwert des Temperaturintervalls in Kelvin, das eine Halbierung der Ausfallzeit ausdrückt, gemessen zu einem Zeitpunkt, der TI entspricht

3.1.16

Regressionsanalyse

Verfahren 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 der Gruppen von der Geraden

3.1.17

Regressionskoeffizienten

Koeffizienten der durch Regressionsanalyse erhaltenen Gleichung der Ausgleichsgeraden

3.1.18

relativer Temperaturindex

RTI

Zahlenwert der Temperatur in Grad Celsius, bei der die abzuschätzende Ausfallzeit des Untersuchungsmaterials die gleiche ist wie die abzuschätzende Ausfallzeit für das Vergleichsmaterial bei einer Temperatur, die dessen festgesetztem Temperaturindex (ATI) entspricht

3.1.19

Signifikanz

Wahrscheinlichkeit, dass der Wert einer statistischen Funktion größer ist als ein festgelegter Wert

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Wert entspricht $(1 - p)$ wobei p dem kumulierten Wert der Verteilungsfunktion entspricht. Die Signifikanz wird üblicherweise in Großbuchstaben angegeben (P).

3.1.20

Standardabweichung

Quadratwurzel aus der Varianz einer Gruppe oder Untergruppe von Werten

3.1.21

Standardfehler des Erwartungswertes für den wahren Wert einer Eigenschaft aus einer Gruppe von Werten

Wert der Standardabweichung einer hypothetischen Probengesamtheit, von der die Gruppeneigenschaft ein Element sein kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Für den Erwartungswert des Gruppenmittelwertes ist der Standardfehler gleich der Standardabweichung der Gruppe, geteilt durch die Quadratwurzel der Anzahl der Einzelwerte in dieser Gruppe, und gibt ein Maß für die Unsicherheit des wahren Mittelwertes an. Die vorliegende Norm befasst sich nur mit Mittelwerten und dem Unterschied von zwei Mittelwerten.

3.1.22

Temperaturindex

TI

Zahlenwert der Temperatur in Grad Celsius, der aus der thermischen Langzeitbeziehung für eine Zeit von 20 000 h (oder eine andere festgelegte Zeit) erhalten wird

3.1.23

Temperaturgruppe (von Probekörpern)

Anzahl von Probekörpern, die gemeinsam der gleichen Wärmealterung bei der gleichen Temperatur im gleichen Wärmeschränk unterzogen werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Wenn die Gefahr einer Zweideutigkeit nicht besteht, können sowohl Temperaturgruppen als auch Prüfgruppen einfach als „Gruppen“ bezeichnet werden.

3.1.24

Prüfgruppe (von Probekörpern)

Anzahl von Probekörpern, die zusammen aus einer Temperaturgruppe zur zerstörenden Prüfung entnommen wurden

Anmerkung 1 zum Begriff: Wenn die Gefahr einer Zweideutigkeit nicht besteht, können sowohl Temperaturgruppen als auch Prüfgruppen einfach als „Gruppen“ bezeichnet werden.

3.1.25

thermisches Langzeitdiagramm

Diagramm, in dem der Logarithmus der Zeit zum Erreichen eines festgelegten Grenzwertes bei einer thermischen Langzeitprüfung gegen den Kehrwert der thermodynamischen (absoluten) Temperatur aufgetragen ist

3.1.26

thermisches Langzeitdiagramm-Papier

Diagrammpapier mit einer logarithmischen Zeitskala als Ordinate und Werten entsprechend dem Kehrwert der thermodynamischen (absoluten) Temperatur als Abszisse

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Ordinate ist üblicherweise unterteilt in Potenzen von 10 (von 10 h bis 100 000 h ist ein oft üblicher Bereich). Die Abszisse ist üblicherweise in eine nicht-lineare Skala für die (Celsius-)Temperatur unterteilt, wobei die Temperaturwerte von links nach rechts zunehmen.

3.1.27

Zeit-Gruppen (von Probekörpern)

alle Prüfgruppen, die zur selben Zeit für Prüfzwecke entnommen wurden

3.1.28

Varianz einer Gruppe von Werten

Summe der Quadrate der Abweichungen der Werte von einer Bezugsgröße, die durch einen oder mehrere Parameter festgelegt ist, geteilt durch die Anzahl der Freiheitsgrade

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Bezugsgröße kann beispielsweise ein Mittelwert (1 Parameter) oder eine Gerade (2 Parameter, hier Abschnitt auf der Achse der unabhängigen Variablen und Steigung) sein.

3.2 Symbole und Abkürzungen

Die folgenden Symbole werden in den Berechnungen von Abschnitt 56, 7 und 12 verwendet.

Symbol	Beschreibung	Abschnitt
a	Regressionskoeffizient: Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der x -Achse	6.4.3
b	Regressionskoeffizient: Steigung der Regressionsgeraden in Beziehung zur y -Achse	6.4.3
b_r	Parameter, abgeleitet aus b , zur Berechnung von $\hat{y}_c$	6.5.3
b_p	Regressionskoeffizient für die Berechnung zerstörender Prüfungen	6.3.4
c	Parameter bei der Berechnung von χ^2	6.5.1
F	F-Verteilung des Varianzverhältnisses für Linearitätsprüfungen	6.3.3, 6.5.2
g, h, i, j	kennzeichnende Parameter für Regressionsberechnungen	6.3, 6.4
HIC (en: humidity indicator card)	Halbzeitintervall	7.1
k	Anzahl der Alterungszeiten	6.1.1
N	Gesamtzahl der x_{ij} -Werte	6.4.2
n_i	Anzahl der x_{ij} -Werte in der Zeitgruppe i	6.1.1
P	Signifikanz des Wertes einer statistischen Testfunktion	Anhänge A, B und C
p_e	Grenzwert des Eigenschaftswertes	6.3

Symbol	Beschreibung	Abschnitt
p_{gh}	Eigenschaftswert h in der Temperaturgruppe g (Zeitgruppe i mit inbegriffen)	6.3
$\bar{p}_g$	Mittelwert der Eigenschaft in Temperaturgruppe g (Zeitgruppe i mit inbegriffen)	6.3
q	Basis der Logarithmen bei der Berechnung von χ^2	6.5.1
r	Anzahl der in Zeitgruppe i ausgewählten Temperaturgruppen	6.3.2
r^2	Quadrat des Korrelationskoeffizienten	6.4.3
s^2	zusammengefasste Varianz der x -Werte (unabhängig von der Regression)	6.5.2
s_{1g}^2	Varianz der Eigenschaftswerte in Temperaturgruppe g (Zeitgruppe i inbegriffen)	6.3.2
s_a^2	Wert von s^2 , zum Erreichen einer zulässigen Nichtlinearität angepasst	6.5.2
s_r^2	Parameter, abgeleitet aus s^2 , zur Berechnung von $\hat{Y}_c$	6.5.3
t	stochastische Variable nach Student's t -Verteilung	6.5.3
TC, TC _a	untere Vertrauensgrenze von TI oder TI _a (siehe oben: s_a^2)	7.1
t_{pN}	Wert von t mit der Wahrscheinlichkeit p und N Freiheitsgraden	6.5.3
x_{ij}	Wert von x , mit der Indexnummer j in der Zeitgruppe i	6.3.4
$\bar{x}$	gemeinsamer Mittelwert der x -Werte	6.4.2
$\hat{X}$, $\hat{X}_c$	Erwartungswert von x , und seine zugehörige Vertrauensgrenze	6.5.3
y_i	Wert von y für die Zeitgruppe i	6.1.1
$\bar{y}$	gemeinsamer Mittelwert der y -Werte	6.4.2
$\hat{Y}$, $\hat{Y}_c$	Erwartungswert für y , und seine zugehörige Vertrauensgrenze	6.5.3
z_{ij}	Kehrwert der Temperatur in Kelvin für ϑ_{ij}	6.1.1
$\mu_2(y)$	Zweites zentrales Moment von y -Werten	6.4.2
ν	Gesamtzahl der Eigenschaftswerte in einer Zeitgruppe (i mit inbegriffen)	6.3.2
χ^2	Variable nach der χ^2 -Verteilung für (Bartlett's) Prüfung auf Gleichheit der Varianz	6.5.1
ϑ_{ij}	Alterungstemperatur für Probekörpergruppe j in der Zeitgruppe i	6.1.1
ϑ_0	273,15 K = Zahlenwert der Temperatur in Kelvin bei 0 °C	6.1.1
τ_i	Alterungszeit für die Zeitgruppe i	6.1.1

4 FTFM-Protokoll

4.1 Grundgedanken und Zielsetzung

4.1.1 Grundgedanken des FTFM-Rahmenplanes

Der FTFM-Rahmenplan beruht auf dem Grundgedanken, dass die Wärmealterung zur Bestimmung von thermischen Langzeiteigenschaften über eine kleine Anzahl von festgelegten Zeiten durchgeführt wird, und zwar über einen ausreichenden Bereich der Alterungstemperaturen bei jeder Zeitstufe, so dass sichergestellt wird, dass die ermittelten Eigenschaftswerte den Grenzwert auf zufriedenstellende Weise erreichen.

Hierin unterscheidet er sich von dem herkömmlichen Verfahren (fester Temperaturrahmen) nach **IEC 60216-1**, bei dem eine kleine Anzahl von Alterungstemperaturen angewendet wird, wobei die Alterung in bestimmten Abständen überprüft wird, bis der Grenzwert erreicht ist.

4.1.2 Zweck des FTFM-Rahmenplanes

Der Zweck des Rahmenplanes ist es, folgende Vorteile zu erlangen:

Die Bestimmung thermischer Langzeitkennwerte erfolgt in einer fest vorbestimmten Zeit.

Dies ermöglicht eine effizientere Planung der Untersuchung und hat daher oft substantielle wirtschaftliche Vorteile. Eine einfache Bestimmung des TI kann in 5 000 h abgeschlossen werden, wohingegen es bei dem „Fixed Temperature“-Rahmenplan notwendig sein kann, die Alterung über diese Zeit hinaus beträchtlich zu verlängern, um den Grenzwert bei der niedrigsten gewählten Alterungstemperatur zu erreichen.

Jede Grenztemperatur (d. h. Mittelwert der Zeitgruppen) in der thermischen Langzeitregression beruht auf einer Anzahl von in einer Zeitgruppe ausgewählten Temperaturen. Die Anzahl der ausgewählten Temperaturen kann jeder Anzahl zwischen drei (3) und der Gesamtzahl der Temperaturgruppen in einer Zeitgruppe entsprechen.

Da die häufigste Ursache für systematische Fehler bei dem herkömmlichen Verfahren (fester Temperaturrahmen) bei Fehlern in der Temperatur liegt (tatsächlicher Temperaturfehler oder Fehler in der Temperaturverteilung), können systematische Fehler beträchtlich reduziert werden. Fehler mit dieser Ursache können zu Ergebnissen führen, die entweder ungenau oder untauglich wegen falscher Festsetzung der Linearität sind.

5 Bestimmung des TI

5.1 Alterungsverfahren

Jedes Prüfverfahren muss die Form, Abmessungen und Anzahl der Probekörper festlegen, ebenso die Lagerungszeiten, die Eigenschaft, auf die sich der TI bezieht, die Verfahren zu seiner Bestimmung, den Grenzwert und die Herleitung der thermischen Langzeitkennwerte aus den Versuchsergebnissen.

Die gewählte Eigenschaft sollte, wenn möglich, in kennzeichnender Weise ein Verhalten des Materials beim Gebrauch widerspiegeln. Eine Auswahl an Eigenschaften ist in **IEC 60216-2** aufgeführt.

Um einheitliche Bedingungen sicherzustellen, kann es erforderlich sein, die Konditionierung der Probekörper nach Entnahme aus dem Wärmeschränk und vor der Messung festzulegen.

5.2 Alterungszeiten und -temperaturen

In der Mehrzahl der Fälle sind die gesuchten thermischen Langzeitkennwerte für einen Zeitraum von 20 000 h vorgesehen. Es besteht jedoch oft ein Bedarf nach Kenntnissen, die sich auf andere, längere oder kürzere Zeiten beziehen. In Fällen von längeren Zeiten müssen die als Anforderungen oder Empfehlungen im Text dieser Norm angegebenen Zeiten (z. B. 5 000 h für den Mindestwert der längsten Lagerungszeit) im Verhältnis der aktuellen Bezugszeit zu 20 000 h vergrößert werden.

In Fällen von kürzeren Bezugszeiten müssen die betreffenden Zeiten, falls erforderlich, im gleichen Verhältnis verringert werden.

Besondere Sorgfalt wird bei sehr kurzen Bezugszeiten erforderlich, da die höheren Alterungstemperaturen in Temperaturbereiche führen können, die Übergangspunkte, z. B. Glasübergangstemperatur oder Kristallitschmelzpunkt, mit daraus folgender Nichtlinearität einschließen. Sehr lange Bezugszeiten können gleichfalls zur Nichtlinearität führen.

Empfehlungen für Alterungszeiten und -temperaturen sind in [Anhang D](#) aufgeführt.

5.3 Probekörper

5.3.1 Herstellung

Die für die Alterungsprüfung verwendeten Probekörper müssen eine Zufallsprobe der untersuchten Gesamtheit darstellen und müssen einheitlich behandelt werden.

Da die Herstellungsbedingungen die Alterungseigenschaften einiger Materialien in signifikanter Weise beeinflussen können, muss sichergestellt werden, dass beispielsweise Probenentnahme, Schneiden der Platten von der Vorratsrolle, Schneiden von anisotropem Material in einer vorgegebenen Richtung, Ausformung, Aushärtung und vorbereitende Konditionierung für alle Probekörper in der gleichen Weise durchgeführt werden.

Die Materialspezifikationen oder Normen für die Prüfverfahren enthalten alle erforderlichen Anweisungen für die Herstellung der Probekörper.

Die Dicke der Probekörper ist in einigen Fällen in der Liste der Eigenschaftsmessungen zur Bestimmung thermischen Langzeitverhaltens festgelegt. Siehe hierzu [IEC 60216-2](#). Wenn dies nicht der Fall ist, muss die Probendicke angegeben werden. Einige physikalische Eigenschaften werden bereits durch minimale Abweichungen der Probekörperdicke beeinflusst. In solchen Fällen kann es erforderlich sein, die Probendicke nach jeder Alterungsperiode zu bestimmen und zu dokumentieren, wenn dies in der betreffenden Norm gefordert wird.

Die Dicke ist auch deshalb von Bedeutung, weil die Alterungsrate abhängig von der Dicke variieren kann. Alterungswerte von Materialien mit unterschiedlichen Dicken sind nicht immer vergleichbar. Demzufolge kann einem Material mehr als ein thermischer Langzeitkennwert, erhalten aus der Eigenschaftsmessung an unterschiedlichen Probendicken, zugeordnet werden.

Die Toleranzen der Probekörperabmessungen müssen die gleichen sein wie die üblicherweise bei allgemeinen Prüfungen verwendeten. Sofern für die Abmessungen der Probekörper kleinere Toleranzen als üblicherweise üblich benötigt werden, müssen diese besonderen Toleranzen angegeben werden.

Begleitende Messungen stellen sicher, dass die Probekörper von einheitlicher Qualität und typisch für das zu prüfende Material sind.

5.3.2 Anzahl der Probekörper

Die Genauigkeit der Ergebnisse von Langzeitprüfungen hängt in hohem Maße von der Anzahl der bei jeder Temperatur gealterten Probekörper ab.

Die Gesamtzahl der Probekörper (N) errechnet sich wie folgt:

$$N = a \times b \times c + d$$

Dabei ist

- a die Anzahl der Probekörper, die in einer Prüfgruppe der gleichen Behandlung bei einer Temperatur unterzogen werden und die nach der Bestimmung der Eigenschaft verworfen werden (üblicherweise fünf);
- b die Anzahl der Behandlungen, d. h. die Gesamtzahl der Lagerungstemperaturen bei einer Zeitstufe;
- c die Anzahl der Zeitstufen der Alterung;

- d* die Anzahl der Probekörper in der Gruppe, die verwendet werden, um den Ausgangswert der Eigenschaft zu bestimmen. Normalerweise wählt man $d = 2a$, wenn als Prüfkriterium die prozentuale Eigenschaftsänderung vom Ausgangswert gilt. Gilt dagegen als Kriterium ein absolutes Eigenschaftsniveau, dann gilt für *d* üblicherweise der Zahlenwert 0, wenn nicht die Angabe des Ausgangswertes gefordert wird.

Es ist bewährte Praxis, zusätzliche Probekörper bereitzustellen oder zumindest eine Reservemenge der ursprünglichen Werkstofflieferung zurückzuhalten, aus der solche Probekörper nachfolgend hergestellt werden können. Auf diese Weise birgt eine erforderliche Alterung zusätzlicher Probekörper im Falle unvorhergesehener Komplikationen nur eine geringe Gefahr von systematischen Unterschieden zwischen Probekörpergruppen in sich. Solche Komplikationen können beispielsweise entstehen, wenn die thermische Langzeitbeziehung sich als nichtlinear erweist oder wenn Probekörper wegen Überhitzung eines Wärmeschrankes verloren gehen.

5.4 Bewertungsprüfungen

Liegen IEC-Werkstoff-Spezifikationen vor, dann sind üblicherweise auch Eigenschaftsanforderungen in Form zulässiger unterer Grenzwerte für den TI vorgegeben. Für den Fall, dass solche Werkstoffbestimmungen nicht verfügbar sind, liegt in [IEC 60216-2](#) eine Auswahl von Eigenschaften und Verfahren zur Bestimmung des thermischen Langzeitverhaltens vor.

Wenn auch dort kein geeignetes Verfahren zu finden ist, sollte ein solches nach einer internationalen, nationalen oder Werksnorm bzw. ein besonders entwickeltes Verfahren angewendet werden, und zwar hinsichtlich der Auswahl in der angegebenen Reihenfolge. In diesem Fall muss die Bewertungsprüfung, einschließlich Eigenschaft, Messverfahren und Grenzwert, im Prüfbericht festgehalten werden.

5.5 Auswahl der Grenzwerte

Es kann erforderlich sein, das thermische Langzeitverhalten von Werkstoffen durch verschiedene Langzeitwerte (ermittelt unter Anwendung unterschiedlicher Eigenschaften und/oder Grenzwerte) zu charakterisieren, um eine sachgerechte Auswahl des Werkstoffes im Hinblick auf seine besondere Verwendung zu erleichtern. Siehe hierzu [IEC 60216-2](#).

Es bestehen zwei Möglichkeiten, nach denen der Grenzwert festgelegt werden kann:

- als prozentuale Zu- oder Abnahme des gemessenen Eigenschaftswertes, bezogen auf den Ausgangswert. Dieses Vorgehen ermöglicht Vergleiche zwischen Werkstoffen, erlaubt aber nur einen geringeren Bezug zu den im üblichen Anwendungsfall erforderlichen Eigenschaftswerten als das Vorgehen nach b). Zur Bestimmung der Ausgangswerte siehe 5.6.
- als fester Eigenschaftswert. Dieser Wert kann im Hinblick auf die üblichen Betriebsanforderungen gewählt werden. Grenzwerte für die Schwellenwertprüfung werden vorwiegend in der Form fester Eigenschaftswerte vorgegeben.

Der Grenzwert sollte so gewählt werden, dass er bei dem Isolierstoff einen Grad des thermischen Abbaus erkennen lässt, durch welchen die Fähigkeit des Isolierstoffes, einer betriebsbedingten Beanspruchung standzuhalten, herabgesetzt wird. Der mit dem Grenzwert des Prüfverfahrens aufgezeigte Grad des Abbaus sollte abgestimmt werden auf den Sicherheitsbeiwert für die im Anwendungsfall geforderte Werkstoffeigenschaft.

5.6 Festlegung des Ausgangswertes einer Eigenschaft

Für die Bestimmung des Ausgangswertes der Eigenschaft werden die Probekörper so ausgewählt, dass sich eine Zufallsteilmenge der für die Alterung vorbereiteten Probekörper ergibt. Vor der Bestimmung des Eigenschaftswertes müssen diese Probekörper durch Lagerung über zwei Tage (48 ± 6) h bei der niedrigsten Stufe der für die Prüfung vorgesehenen Alterungstemperatur (siehe [5.2](#)) vorbehandelt werden.

ANMERKUNG In einigen Fällen (z. B. bei sehr dicken Probekörpern) können Zeiten von mehr als zwei Tagen erforderlich sein, um einen stabilen Wert festlegen zu können.

Falls nichts anderes in der Verfahrensanweisung zur Ermittlung der Bewertungseigenschaft festgelegt ist (z. B. in den die Prüfverfahren beschreibenden Abschnitten von Werkstoffbestimmungen oder in einem in [IEC 60216-2](#) aufgelisteten Verfahren), gilt als Ausgangswert der arithmetische Mittelwert der Testergebnisse.

5.7 Alterungsbedingungen

5.7.1 Wärmeschränke für die Alterung

Während der gesamten Dauer der Wärmealterung müssen die Wärmeschränke in dem Teil des Arbeitsraumes, in dem die Probekörper eingelagert sind, eine Temperatur mit den in IEC 60216-4 angegebenen zulässigen Abweichungen aufrechterhalten. Falls nichts anderes festgelegt ist, wird [IEC 60216-4-1](#) angewendet. In besonderen Fällen kann eine Spezifizierung nach [IEC 60216-4-2](#) und [IEC 60216-4-3](#) erfolgen.

Die Luftzirkulation innerhalb des Wärmeschranks und der Austausch seines Luftinhaltes sollten so groß bemessen sein, dass sichergestellt ist, dass die Rate des thermischen Abbaus nicht durch die Ansammlung von Zersetzungsprodukten oder durch Sauerstoffverbrauch beeinflusst wird (siehe 5.7.2).

5.7.2 Umgebungsbedingungen

Sofern dies nicht anders festgelegt ist, muss die Warmlagerung in Wärmeschränken durchgeführt werden, die in einer üblichen Laboratoriumsatmosphäre betrieben werden. Für einige Werkstoffe, die sehr empfindlich auf Feuchtigkeit in den Wärmeschränken reagieren, lassen sich jedoch zuverlässigere Ergebnisse erreichen, wenn die absolute Luftfeuchte im Aufstellungsraum für die Wärmeschränke geregelt wird und gleich der Luftfeuchte entsprechend der Standardatmosphäre B nach [IEC 60212](#) ist. Diese oder andere festgelegte Bedingungen müssen dann dokumentiert werden.

ANMERKUNG Der Einfluss von besonderen Umgebungsbedingungen, wie außergewöhnliche Feuchtigkeit, chemische Verunreinigung oder Vibrationen, dürfte in vielen Fällen zweckdienlicher durch Prüfungen von Isoliersystemen zu ermitteln sein. Dennoch können Umgebungsbedingungen, der Einfluss von anderen Atmosphären als Luft und die Lagerung in Flüssigkeiten, wie z. B. Öl, wichtig sein, sind jedoch nicht Gegenstand dieser Norm.

5.7.3 Bedingungen für die Eigenschaftsmessungen

Falls nicht anderweitig festgelegt, müssen die Probekörper vor den Messungen vorbehandelt und unter Bedingungen geprüft werden, wie dies in den Werkstoffbestimmungen festgelegt ist.

5.8 Verfahren für die Alterung

Ein Rahmenplan für die Prüfung, wie er als Beispiel in [Anhang D](#) skizziert ist, ist zu erstellen.

Eine Anzahl von Probekörpern wird gemäß den Anweisungen nach [5.3.2](#) bereitgestellt. Falls erforderlich, wird der Ausgangswert der Eigenschaft, wie in [5.6](#) festgelegt, bestimmt. Die Probekörper werden durch Zufallsauswahl gemäß dem Prüfplan in Prüfgruppen aufgeteilt. Die benötigte Anzahl an Gruppen wird in jedem der Wärmeschränke bei der geforderten Temperatur eingelagert.

ANMERKUNG Die Empfehlung in [Anhang D](#) (Anmerkung 2) sollte beachtet werden, wonach besondere Gruppen von Probekörpern bereitgestellt werden für den Fall, dass die thermischen Langzeitkennwerte des Materials den Grundanforderungen nach [Anhang D](#) nicht genügen.

Nach jeder Alterungszeit wird eine Gruppe durch Zufallsauswahl aus den in Frage kommenden Wärmeschränken ausgewählt und aus dem Wärmeschrank entnommen. Man lässt diese Gruppe auf Raumtemperatur abkühlen, falls nichts anderes festgelegt wurde. Die Probekörper werden über die festgelegte Zeit bei der festgelegten Atmosphäre konditioniert, falls dies vorgegeben ist, und mit dem festgelegten Verfahren geprüft.

Es wird empfohlen die Berechnungen durchzuführen, sobald die Messwerte verfügbar sind. Dies gilt insbesondere für die kürzeste Lagerungszeit.

Die Ergebnisse werden, wie in [Abschnitt 6](#) beschrieben, ausgewertet.

6 Berechnungsverfahren

6.1 Allgemeine Grundregeln

6.1.1 Berechnung der thermischen Langzeiteigenschaften

Die allgemeinen Berechnungsverfahren und Anweisungen nach 6.4 beruhen auf den in IEC 60493-1 aufgestellten Grundregeln, die wie folgt geändert werden:

- Das Verhältnis zwischen dem Mittelwert der Kehrwerte x der thermodynamischen (absoluten) Temperatur, bei welcher der Grenzwert erreicht wird, und dem Logarithmus y der Alterungszeit ist linear.
- Die Werte der Abweichungen der Werte für x von der linearen Beziehung sind normalverteilt mit einer Varianz, die unabhängig ist von der Alterungszeit.

Die für die allgemeinen Berechnungsverfahren verwendeten Daten werden aus den Messergebnissen durch eine vorbereitende Berechnung erhalten. Die Daten für die Berechnung umfassen die Werte z , y , n und k dabei ist

$z_{ij} = 1 / (\vartheta_{ij} + \theta_0)$	= Kehrwert der thermodynamischen Temperatur in K entsprechend der Alterungstemperatur ϑ_{ij} in °C;
$y_i = \log \tau_i$	= Logarithmus des Wertes der Alterungszeit in h (τ_i);
n_i	= Anzahl der z -Werte in der Gruppe mit Nummer i , gealtert für die Zeit τ_i ;
k	= Anzahl der Alterungszeiten oder Gruppen von x -Werten.

ANMERKUNG Jede beliebige Zahl kann als Basis der Logarithmen verwendet werden, vorausgesetzt, sie wird für die gesamten Berechnungen beibehalten. Die Anwendung der natürlichen Logarithmen (Basis e) wird empfohlen, da die meisten Computerprogramme und wissenschaftlichen Rechner diese Möglichkeit bieten.

6.1.2 Eigenschaftswert – äquivalente Temperatur-Transformation

(Berechnung einer aus einem Eigenschaftswert abgeleiteten hypothetischen Alterungstemperatur)

Bei Anwendung von zerstörenden Prüfungskriterien wird jeder Probekörper bei der Ermittlung eines Eigenschaftswertes zerstört. Aus diesem Grunde können die zur Erreichung des Grenzwertes notwendigen Zeit- und/oder Temperaturwerte nicht direkt bestimmt werden. Um Erwartungswerte für die Ausfallzeiten zu erhalten, werden folgende Annahmen getroffen: dass in der Umgebung des Grenzwertes (für eine Alterungszeit)

- die Beziehung zwischen den mittleren Eigenschaftswerten und den Kehrwerten der thermodynamischen Temperatur näherungsweise linear ist;
- die Werte der Abweichungen der einzelnen Eigenschaftswerte von dieser linearen Beziehung normalverteilt sind, mit einer Varianz, die unabhängig ist von der Temperatur;
- die Kurven der Eigenschaftswerte, aufgetragen gegenüber dem Kehrwert der (thermodynamischen) Alterungstemperatur für die einzelnen Probekörper, Geraden sind, die parallel zu derjenigen liegen, die das Verhältnis gemäß Punkt a) wiedergibt.

Unter der Annahme dieser Voraussetzungen wird eine Alterungskurve durch die für jede Alterungstemperatur erhaltenen Werte gezogen. Die Kurve für jede Alterungszeit erhält man, indem die Mittelwerte der Eigenschaft für jede Probekörpergruppe über dem Kehrwert der Alterungstemperatur (thermodynamisch) aufgetragen werden. Wenn möglich, wird die Alterung bei genügend hohen und niedrigen Alterungstemperaturen durchgeführt, so dass mindestens ein Mittelwert einer Gruppe oberhalb und mindestens einer unterhalb des Grenzwertniveaus liegt. Ein annähernd linearer Bereich dieser Kurve wird (einschließlich mindestens drei Gruppenmittelwerten) in der Nähe des Endpunktes gezeichnet (Bild E.1).

ANMERKUNG Eine nicht lineare Temperaturskala unterteilt in °C wird in der Regel als Abszisse verwendet (siehe Bild E.1).

Eine statistische Prüfung (F -Test) wird durchgeführt, um zu entscheiden, ob für den ausgewählten Bereich die Abweichungen von der Linearität akzeptabel sind (siehe 6.3.3). Ist dies der Fall, werden in dem gleichen Diagramm die Punkte, die die Eigenschaftswerte der einzelnen Probekörper darstellen, eingezeichnet. Eine Parallele zur Alterungsgeraden wird durch den Messpunkt jedes einzelnen Probekörpers eingezeichnet: Der Erwartungswert von x für diesen Probekörper ist dann der Kehrwert der (thermodynamischen) Temperatur entsprechend dem Schnittpunkt dieser Geraden mit der Grenzwertlinie (siehe Bild E.1).

Mit einigen Einschränkungen kann eine Extrapolation der linearen Mittelwertkurve bis zum Niveau des Grenzwertes erlaubt sein.

Die oben beschriebenen Schritte werden numerisch nach der in 6.3.2 und 6.3.3 ausführlich dargestellten Berechnung durchgeführt.

6.2 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 Computers auszuführen, wobei eine interne Genauigkeit von 10 oder mehr wertanzeigenden Zifferstellen leicht erreichbar ist.

6.3 Ableitung von Temperaturen äquivalent zu Eigenschaftswerten

Innerhalb der Gruppen von Probekörpern, die für die gleiche Zeit τ_i gealtert wurden, werden die in 6.3.1 bis 6.3.3 beschriebenen Verfahren angewendet.

6.3.1 Vorbereitende Berechnungen

Der Wert von y , der zu jeder Alterungszeit gehört, wird berechnet durch τ

$$y_i = \log \tau_i \quad (1)$$

Der Wert von z , der zu jeder der Alterungstemperaturen gehört, wird berechnet durch ϑ

$$z_{ij} = 1/(\vartheta_{ij} + \vartheta_0) \quad (2)$$

6.3.2 Berechnungen zur Regression (Eigenschaft über der Temperatur)

Der mittlere Eigenschaftswert und der zugehörige Wert von z sind für die erhaltene Gruppe von Werten für jede Alterungstemperatur (siehe Gleichung (3)) zu berechnen. Die erhaltenen Werte werden in ein Diagramm mit dem Eigenschaftswert p als Ordinate und z als Abszisse aufgetragen (siehe Bild E.1).

Durch die Eigenschaftsmittelwerte wird eine nach Augenmaß gut angepasste Kurve gelegt.

Ein Temperaturbereich wird ausgewählt, innerhalb dessen die so angepasste Kurve näherungsweise linear ist (siehe 6.3.3). Es muss sichergestellt werden, dass dieser Bereich mindestens drei Mittelwerte für die Eigenschaftswerte einschließt, mit mindestens einem Punkt auf jeder Seite der Grenzwertlinie $p = p_e$. Ist dies nicht der Fall und können weitere Messungen bei höheren Temperaturen nicht gemacht werden (z. B. weil keine Probekörper mehr vorhanden sind), ist eine kleine Extrapolation unter den in 6.3.3 genannten Bedingungen erlaubt.

Der Index i wurde in den Formeln in 6.3.2 und 6.3.3 ausgelassen, um verwirrende, vielfache Kombinationen der Indizes im Druckbild zu vermeiden. Die Berechnungen in diesen Unterabschnitten müssen getrennt mit den Messwerten für jede Alterungszeit durchgeführt werden.

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

- $g = 1 \dots r$ die fortlaufende Reihennummer der ausgewählten, bei der Temperatur ϑ_g gealterten Gruppe;
 $h = 1 \dots n_g$ die fortlaufende Reihennummer des Eigenschaftswertes innerhalb der Gruppe mit der Kennziffer g ;
 n_g die Anzahl der Eigenschaftswerte in der Gruppe g .

ANMERKUNG In den meisten Fällen ist die Anzahl n_g der bei allen Prüftemperaturen geprüften Probekörper gleich; dies ist jedoch keine notwendige Bedingung 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:

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

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

Folgende Berechnungen werden durchgeführt:

$$\nu = \sum_{g=1}^r n_g \quad (5)$$

$$\bar{z} = \sum_{g=1}^r z_g n_g / \nu \quad (6)$$

$$\bar{p} = \sum \bar{p}_g n_g / \nu \quad (7)$$

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

$$a_p = \bar{p} - b_p \bar{z} \quad (8)$$

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

Die zusammengefasste Varianz innerhalb der Eigenschaftsgruppen wird berechnet:

$$s_1^2 = \sum_{g=1}^r (n_g - 1) s_{1g}^2 / (\nu - r) \quad (10)$$

Die gewichtete Varianz der Abweichungen der Mittelwerte für die Gruppen von Eigenschaftswerten von der Regressionsgeraden wird berechnet:

$$s_2^2 = \sum n_g \left(\bar{p}_g - \hat{p}_g \right)^2 / (r-2) \quad (11)$$

Dabei ist
$$\hat{p}_g = a_p + b_p \cdot z_g \quad (12)$$

Dies kann auch ausgedrückt werden als

$$s_2^2 = \left[\left(\sum_{g=1}^r n_g \bar{p}_g^2 - \nu \cdot \bar{p}^2 \right) - b_p \left(\sum_{g=1}^r n_g z_g \bar{p}_g - \nu \cdot \bar{z} \cdot \bar{p} \right) \right] / (r-2) \quad (13)$$

6.3.3 Prüfung auf Linearität

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

$$F = s_2^2 / s_1^2 \quad (14)$$

Übersteigt der errechnete Wert von F den Tabellenwert F_1 mit den Freiheitsgraden $f_n = r - 2$ und $f_d = \nu - r$ (siehe [Tabelle C.3](#)), wird die Auswahl nach [6.3.2](#) 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 $f_d = \nu - r$ (siehe [Tabelle C.4](#)) vorgenommen.

Sind die Anforderungen des Testes bei diesem Niveau erfüllt, können die Berechnungen fortgeführt werden, eine Anpassung des Temperaturindex TI nach [7.2.2](#), [Gleichung \(48\)](#) ist jedoch 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 [6.3.2](#) 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 von 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 absolute Wert der Differenz zwischen Grenzwert p_e und dem diesem am nächsten liegenden Mittelwert $\bar{p}_g$ (üblicherweise $\bar{p}_r$) ist kleiner als ein Viertel des absoluten Wertes der Differenz $(\bar{p}_1 - \bar{p}_r)$.

ANMERKUNG In [Bild E.1](#), wenn $p_e = 5\,000$ ist, wäre die Berechnung wie folgt:

$\bar{p}_1$ ist der Wert des Mittels der vorwiegend linksseitigen Datengruppe in der Auswahlgruppe, $\bar{p}_r$ derjenige der vorwiegend rechtsseitigen. Die Bedingung ist dann

$$|\bar{p}_r - p_e| \leq |\bar{p}_1 - \bar{p}_r| / 4$$

Die einschließenden vertikalen Linien sollen den Absolutwert des Betrages kennzeichnen.

In diesem Falle können die Berechnungen weitergeführt werden, jedoch ist danach ebenfalls eine Anpassung des Temperaturindex TI nach [7.2.2](#), [Gleichung \(48\)](#) nicht zulässig.

6.23.4 Abschätzung von Grenzwert-Temperaturen in Äquivalenz zu den Eigenschaftswerten

Für jeden der h Eigenschaftswerte in jeder der g ausgewählten Gruppen ist der äquivalente Kehrwert der Grenztemperatur zu berechnen nach:

$$x_{ij} = z_g - \frac{(p_{gh} - p_e)}{b_p} \quad (15)$$

und
$$n_i = \nu \quad (16)$$

Dabei ist

$j = 1 \dots n_i$ die fortlaufende Reihennummer des x -Wertes in der Gruppe der x -Erwartungswerte bei der Alterungszeit τ_i und z_g der Kehrwert der Alterungstemperatur;

die n_i Werte für x_{ij} sind die Kehrwerte der Grenzwerttemperaturen, die bei den Berechnungen in 6.4 verwendet werden.

6.4 Bestimmung der Regression (Temperatur über der Zeit)

ANMERKUNG Sofern die folgenden Berechnungen Teil der Bestimmung des RTI (siehe [Abschnitt 3](#)) sind, werden die Ergebnisse einiger Gleichungen als Eingabewerte sowohl für das Vergleichsmaterial als auch für das Untersuchungsmaterial benötigt.

Es werden die Ergebnisse aus den Gleichungen (19), (20), (21), (23), (25), (26), (33) oder (34) und (46) benötigt. Zusätzlich wird der Logarithmus der längsten Alterungszeit benötigt, um die Dateneingabe zu vervollständigen.

6.4.1 Mittelwerte und Varianzen von Gruppen

Der Mittelwert und die Varianz der für jede Lagerungszeit τ_i erhaltenen Gruppe von x -Werten x_{ij} werden berechnet:

$$\bar{x}_i = \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} / n_i \quad (17)$$

$$s_{ii}^2 = \left(\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - n_i \bar{x}_i^2 \right) / (n_i - 1) \quad (18)$$

6.4.2 Gemeinsame Mittelwerte und Varianzen

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

$$N = \sum_{i=1}^k n_i \quad (19)$$

$$\bar{x} = \sum n_i \bar{x}_i / N \quad (20)$$

$$\bar{y} = \sum n_i y_i / N \quad (21)$$

Die zusammengefasste Varianz innerhalb der Gruppen von Werten wird berechnet:

$$s_1^2 = \sum_{i=1}^k (n_i - 1) s_{ii}^2 / (N - k) \quad (22)$$

Das zweite zentrale Moment der y -Werte wird berechnet:

$$\mu_2(y) = \frac{\left(\sum_{i=1}^k n_i y_i^2 - N \bar{y}^2 \right)}{N} \quad (23)$$

6.4.3 Regression

In der Gleichung für die Regressionsgerade:

$$x = a + by \quad (24)$$

wird die Steigung berechnet:

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^k n_i \bar{x}_i y_i - N \bar{x} \bar{y} \right)}{\left(\sum_{i=1}^k n_i y_i^2 - N \bar{y}^2 \right)} \quad (25)$$

sowie der Abschnitt auf der y -Achse:

$$a = \bar{x} - b \bar{y} \quad (26)$$

und das Quadrat des Korrelationskoeffizienten nach:

$$r^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^k n_i \bar{x}_i y_i - N \bar{x} \bar{y} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^k n_i \bar{x}_i^2 - N \bar{x}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^k n_i y_i^2 - N \bar{y}^2 \right)} \quad (27)$$

Die Varianz der Abweichung der x -Mittelwerte von der Regressionsgeraden wird berechnet:

$$s_2^2 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i (\bar{x}_i - \hat{X}_i)^2}{(k - 2)}, \quad \hat{X}_i = a + b y_i \quad (28)$$

oder

$$s_2^2 = \frac{(1 - r^2)}{(k - 2)} \left(\sum_{i=1}^k n_i \bar{x}_i^2 - N \bar{x}^2 \right) \quad (29)$$

6.5 Statistische Überprüfungen

6.5.1 Prüfung auf Gleichheit der Varianzen

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

$$\chi^2 = \frac{\ln q}{c} \left[(N-k) \log_q s_1^2 - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \log_q s_{1i}^2 \right] \quad (30)$$

Dabei ist

$$c = 1 + \frac{\left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{(n_i - 1)} - \frac{1}{(N - k)} \right)}{3(k - 1)} \quad (31)$$

q die Basis der in dieser Gleichung verwendeten Logarithmen. Sie muss nicht die gleiche wie die anderweitig bei Berechnungen in diesem Abschnitt verwendete sein.

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.1](#)).

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.

6.5.2 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 wird berechnet:

$$F = s_2^2 / s_1^2 \quad (32)$$

und sein Wert mit dem Tabellenwert F_0 für die Freiheitsgrade $f_n = k - 2$ und $f_d = N - k$ verglichen ([Tabelle 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:

$$s^2 = \frac{(N - k)s_1^2 + (k - 2)s_2^2}{(N - 2)} \quad (33)$$

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

$$s_a^2 = \frac{(N - k)(s_1^2)_a + (k - 2)s_2^2}{(N - 2)} \quad (34)$$

6.5.3 Erwartungswerte von x und y und ihre zugehörigen Vertrauensgrenzen

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.2](#)).

a) Erwartungswerte für X

Der Wert für Y zur zugehörigen Zeit τ , bei welcher der Erwartungswert benötigt wird, wird berechnet:

Der Erwartungswert für X zu dem zugehörigen, vorgegebenen Wert von Y und seine obere 95 %-Vertrauensgrenze $\hat{X}_c$ werden berechnet:

$$\hat{X}_c = \hat{X} + t \cdot s_x ; \hat{X} = a - bY ; t = t_{0,95, N-2} \quad (35)$$

$$s_x^2 = \frac{s^2}{N} \left[1 + \frac{(Y - \bar{y})^2}{\mu_2(y)} \right] \quad (36)$$

Dabei ist $Y = \log \tau$ (37)

Die den Werten von $\hat{X}$ and $\hat{X}_c$ entsprechenden Temperaturen werden berechnet nach:

$$\vartheta = \frac{1}{X} - \Theta_0 \quad (38)$$

Für die Kurve der Vertrauensgrenze im thermischen Langzeitdiagramm (siehe 6.6) wird $\hat{X}_c$ für verschiedene Werte von Y über den interessierenden Bereich berechnet und eine glatte Kurve durch die Punkte $(\hat{X}_c, Y)$ in das Diagramm eingezeichnet.

Falls $F > F_0$ ist, werden die Werte von s^2 durch s_a^2 (siehe Gleichung (34)) ersetzt.

b) Erwartungswerte für Y

Der Wert von $\hat{Y}$ und seine untere 95 %-Vertrauensgrenze, zugehörig zu einer Grenzwerttemperatur, werden berechnet: ϑ_f

$$\hat{Y}_c = \bar{y} + \frac{(X - \bar{x})}{b_r} - \frac{t \cdot s_r}{b_r} , \quad t = t_{0,95, N-2}, \quad (39)$$

$$X = 1/(\vartheta_f + \Theta_0) : \hat{Y} = (X - a)/b \quad (40)$$

$$b_r = b - \frac{t^2 s^2}{N b \mu_2(y)} \quad (41)$$

$$s_r^2 = \frac{s^2}{N} \left(\frac{b_r}{b} + \frac{(\hat{Y} - \bar{y})^2}{\mu_2(y)} \right) \quad (42)$$

Der Erwartungswert für die Zeit und dessen untere 95 %-Vertrauensgrenze müssen aus dem zugehörigen Erwartungswert für Y und dessen unterer Vertrauensgrenze berechnet werden:

$$\tau = q^{\hat{Y}} , \quad \tau_c = q^{\hat{Y}_c} \quad (43)$$

dabei ist q die in den Berechnungen verwendete Basis der Logarithmen (siehe Anmerkung in 6.1.1).

6.6 Thermisches Langzeitdiagramm

Wenn die Regressionsgerade festgelegt ist, wird sie 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 Grad Celsius (°C) werden auf dieser Achse gekennzeichnet (siehe Bild E.2). Für diesen Zweck ist spezielles Diagrammpapier erhältlich.

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

Die Einzelwerte x_{ij} und die nach 6.4.1 ermittelten Mittelwerte $\bar{x}_i$ werden in das Diagramm bei den zugehörigen Werten von y_i eingetragen:

$$y_i = \log \tau_i \quad (44)$$

Das thermische Langzeitdiagramm kann durch das Einzeichnen der Kurve der unteren 95 %-Vertrauensgrenzen vervollständigt werden (siehe 6.5.3).

7 Berechnung und Anforderungen an die Ergebnisse

7.1 Berechnung der thermischen Langzeitkennwerte

Unter Verwendung der Regressionsgleichung

$$y = (x - a) / b \quad (45)$$

(die Koeffizienten a und b wurden nach 6.4.3 berechnet) wird die Temperatur TI_{20} in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) 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: TI_{10} . Das Halbzeitintervall HIC ist dann:

$$HIC = TI_{10} - TI_{20} \quad (46)$$

Nach dem in 6.5.3 a) 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 $(TI - TC)/HIC$ oder $(TI - TC_a)/HIC$ wird ermittelt.

Das thermische Langzeitdiagramm wird gezeichnet (siehe 6.6).

7.2 Angabe der Ergebnisse

7.2.1 Zusammenfassung der statistischen Überprüfungen und Prüfbericht

In Anhang B ist, wenn eine Bedingung in der Spalte mit der Überschrift „Test“ nicht erfüllt ist, wie in der letzten Spalte beschrieben vorzugehen. Ist die Bedingung erfüllt, wird so weitergegangen, wie dies im nächsten Schritt aufgezeigt ist. Die gleiche Abfolge ist in dem Entscheidungs-Flussdiagramm für thermische Langzeitberechnungen aufgezeigt (siehe Anhang A).

7.2.2 Format des Prüfberichtes

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

$$TI (HIC): xxx (xx,x) \quad (47)$$

angegeben werden, in Übereinstimmung mit 6.8 von IEC 60216-1.

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

$$TI_a = TC + 0,6 HIC \quad (48)$$

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

In allen anderen Fällen muss das Ergebnis in folgender Form angegeben werden:

$$Tl_g = \dots, \quad HIC_g = \dots \quad (49)$$

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:

$$TI \text{ xx kh (HIC): xxx (xx,x)} \quad (50)$$

und entsprechend für Tl_a und Tl_g .

8 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss Folgendes enthalten:

- eine Beschreibung des geprüften Materials einschließlich der Abmessungen und einer etwaigen Vorbehandlung der Probekörper;
- die geprüfte Eigenschaft, den gewählten Grenzwert und, falls dieser zu bestimmen war, den Anfangswert der Eigenschaft;
- das zur Bestimmung der Eigenschaftswerte verwendete Prüfverfahren (z. B. durch Bezugnahme auf eine IEC-Publikation);
- jede relevante Information zu dem Prüfverfahren, z. B. die Umgebungsbedingungen bei der Alterung;
- die einzelnen Prüfzeiten, die Alterungstemperaturen und die einzelnen Eigenschaftswerte, mit den Diagrammen der Änderung der Eigenschaft mit der Alterungstemperatur;
- das thermische Langzeitdiagramm;
- den Temperaturindex und das Halbzeitintervall, angegeben in der in 7.2.2 festgelegten Form;

die Werte von χ^2 und P , sofern dies nach 6.5.1 verlangt wird.

9 Bestimmung des RTI

9.1 Ziele der Bestimmung des RTI

Die Zielsetzungen dieser Bestimmung sind folgende:

- Die angenommene Beziehung zwischen thermischer Beständigkeit (bei einem geeigneten Prüfmerkmal hinsichtlich der Alterung) und der Gebrauchsfähigkeit im Betrieb wird ausgenutzt, um mit ihr einen Wert als vorläufige Abschätzung der zulässigen Betriebstemperatur eines Materials vorzugeben, für welches vergleichsweise wenig Betriebserfahrungen vorliegen (durch Vergleich mit einem bekannten Vergleichsmaterial – siehe Abschnitte 11 und 12).

ANMERKUNG In der Mehrzahl der Fälle wird dies eine Extrapolation zu längerer Zeit oder niedrigerer Temperatur einschließen, als diese bei den Versuchsbedingungen vorliegt. Diese Extrapolation sollte durch eine zweckmäßige Wahl der Alterungstemperaturen und -zeiten so klein wie möglich gehalten werden (siehe D.2 und Bild E.5), da die Unsicherheit im Ergebnis mit der Extrapolation schnell anwächst. Aber auch wenn keine Extrapolation erforderlich ist, bleibt eine nichtverschwindende Unsicherheit aufgrund der Varianzen in den Versuchsergebnissen und von Versuchsfehlern bestehen.

- Die Genauigkeit bei der Ermittlung thermischer Langzeiteigenschaften soll durch die Verringerung von systematischen Fehlern bei der Alterung erhöht werden. Wenn nach der Alterung festgestellt wird, dass die Ergebnisse für das Vergleichsmaterial in signifikantem Maße von früheren Erfahrungen abweichen, kann dies auf Änderungen im Material oder bei den Prüfeinrichtungen hinweisen. Dieser Sachverhalt kann dann untersucht und möglicherweise korrigiert werden. In jedem Fall wird die gleichzeitige Alterung von Vergleichs- und Untersuchungsmaterial systematische Abweichungen zumindest teilweise kompensieren. Statistische Verfahren, um die Signifikanz von Abweichungen abzuschätzen, sind in Anhang F angegeben.

10 Zusätzliche Formelzeichen

Die folgenden Formelzeichen werden zu denjenigen in 3.2 zusätzlich verwendet und betreffen nur die Abschnitte 11 bis 13.

Symbol	Beschreibung	Abschnitt
A	Index, das Vergleichsmaterial anzeigend	
ATI	Bekannter thermischer Langzeitkennwert des Vergleichsmaterials	12.3
B	Index, das Untersuchungsmaterial aufzeigend	
$HIC_{B(c)}$	Halbzeitintervall des Untersuchungsmaterials bei der Bezugszeit	13.1
N_D	Gesamtzahl der Werte bei den zusammengefassten Ergebnissen von Untersuchungs- und Vergleichsmaterial	12.4
RTI	Erwartungswert für den thermischen Langzeitkennwert des Untersuchungsmaterials (Temperaturindex bei der Bezugszeit)	12.3
s_D^2	Varianz der zusammengefassten Werte von Untersuchungs- und Vergleichsmaterial	12.4
s_D	Standardfehler von RTI (Quadratwurzel aus s_D^2)	12.4
x_A	Kehrwert des Wertes von ATI in Kelvin	12.3
x_B	Kehrwert des Wertes von RTI in Kelvin	12.3
$X_{c(B)}$	Vertrauensgrenze von x_B	12.4
Y_C	Logarithmus der Bezugszeit	12.3
τ_c	Bezugszeit (Zeit, auf die der ATI des Vergleichsmaterials bezogen ist)	12.3
τ_k	Längste Alterungszeit	12.5
ϑ_{RTI}	Wert von RTI in Grad Celsius	12.3
$\vartheta_{c(B)}$	Vertrauensgrenze für RTI (obere oder untere)	12.4
ϑ_{lc}	Untere Vertrauensgrenze für RTI	12.4
Δ_R	Unterer Vertrauensbereich für RTI	12.4

11 Untersuchungsverfahren

11.1 Auswahl des Vergleichsmaterials

Die grundlegende Anforderung an das Vergleichsmaterial ist die Kenntnis seines ATI-Wertes hinsichtlich der in Betracht gezogenen Anwendung. Der ATI-Wert muss, wenn er durch ein thermisches Langzeitverfahren bestimmt wurde, durch vorhandene Betriebserfahrungen bestätigt worden sein. Die Grundlage des ATI muss angegeben werden.

Die erwarteten Alterungsmechanismen und -raten müssen für beide Materialien ähnlich und anwendungsbezogen sein.

11.2 Auswahl der Bewertungsprüfung für den Umfang der Alterung

Das Verfahren der Bewertungsprüfung muss im Hinblick auf den Anwendungsbereich, für den der Wert von RTI gefordert wird, aussagefähig sein. Die gleiche Prüfung und der gleiche Grenzwert müssen sowohl für das Vergleichs- als auch für das Untersuchungsmaterial angewendet werden.

11.3 Alterungsverfahren

Sowohl die Anzahl und Art der Probekörper als auch die Alterungstemperaturen und -zeiten müssen bei beiden Materialien den Anforderungen nach [Abschnitt 5](#) entsprechen. Wenn die Empfehlungen in [Anhang D](#) angewandt werden, sollte die niedrigste Lagerungstemperatur niedriger sein als die für beide Materialien erwarteten Werte des TI.

Bei jeder Alterungstemperatur muss die Beladung der Wärmeschränke die erforderliche Anzahl an Probekörpern aus beiden Materialien umfassen. Die Probekörper müssen so in dem Wärmeschränk verteilt werden, dass es erwartungsgemäß keinen systematischen Unterschied in den Lagerungsbedingungen gibt, denen die Probekörper aus beiden Materialien ausgesetzt werden.

12 Berechnungsverfahren

12.1 Allgemeine Grundregeln

Die Grundlage der Berechnungen ist die Bestimmung der thermischen Langzeitkennwerte der beiden Materialien (siehe [6.1.1](#) und [9.1a](#))).

Aus den thermischen Langzeitwerten, die für das Vergleichsmaterial erhalten werden, wird die Zeit berechnet, bei welcher der Temperaturindex gleich seinem bekannten thermischen Kennwert (diese Zeit wird als „Bezugszeit“ herangezogen) ist. Aus den thermischen Langzeitwerten, die für das Untersuchungsmaterial erhalten werden, wird der auf die Bezugszeit bezogene Temperaturindex berechnet. Dieser Wert ist der gesuchte RTI.

Der diesem Ergebnis zugehörige Vertrauensbereich wird mittels statistischer Standardverfahren berechnet.

12.2 Eingabewerte

Für beide Materialien, Vergleichs- und Untersuchungsmaterial, werden folgende Zwischenergebnisse aus der Berechnung des TI benötigt (siehe [6.4](#)).

Zwischenwert	Symbol	Gleichung
Steigung der Regressionsgeraden in Relation zur y -Achse	b	(25)
Achsenabschnitt zur Regressionsgeraden auf der x -Achse	a	(26)
Gewichtetes Mittel der y -Werte	$\bar{y}$	(21)
Zweites zentrales Moment von y -Werten	$\mu_2(y)$	(23)
Gewichtetes Mittel der x -Werte	$\bar{x}$	(20)
Zusammengefasste Varianz der x -Werte (neben der Regression)	s^2	(33) oder (34)
Anzahl der x -Werte	N	(19)
Halbzeitintervall	HIC (en: humidity indicator card)	(46)
Längste Alterungszeit	τ_k	

12.3 RTI

Der Kehrwert der thermodynamischen Temperatur von ATI wird berechnet:

$$x_a = \frac{1}{(ATI + \theta_0)} \quad (50)$$

Die Bezugszeit τ_c and Y_c , und deren Logarithmus werden berechnet:

$$Y_c = \frac{(x_A - a_A)}{b_A} \quad \tau_c = q^{Y_c} \quad (51)$$

wobei q die Basis der in diesen Berechnungen verwendeten Logarithmen ist (siehe Anmerkung in 6.1.1).

Der Erwartungswert für x bei der Bezugszeit für das Untersuchungsmaterial wird berechnet:

$$x_B = a_B + Y_c b_B \quad (52)$$

Der Wert von RTI ist:

$$r_{RTI} = \frac{1}{x_u} - \Theta_o \quad (53)$$

12.4 Vertrauensgrenzen

Der Erwartungswert für x bei der Bezugszeit für das Vergleichsmaterial wird berechnet:

$$x_A = a_A + Y_c b_A \quad (54)$$

ANMERKUNG Zahlenmäßig ist x_A gleich X_A . Letztere ist jedoch eine feste (d. h. nichtvariable) Größe, während erstere eine normalverteilte Zufallsgröße ist. Die Varianz des Erwartungswertes von RTI wird bestimmt durch die Varianz der Differenz x_A und x_B .

Die Varianz von x_A wird berechnet:

$$s_A^2 = \left[s^2 \left(1 + \frac{(Y_c - \bar{y})^2}{\mu_{2(y)}} \right) \right]_A \quad (55)$$

In gleicher Weise wird die Varianz von x_B berechnet:

$$s_B^2 = \left[s^2 \left(1 + \frac{(Y_c - \bar{y})^2}{\mu_{2(y)}} \right) \right]_B \quad (56)$$

Der Wert F des Verhältnisses der Varianzen wird berechnet:

$$F = \frac{s_B^2}{s_A^2} \text{ if } s_B^2 > s_A^2, \text{ otherwise } F = \frac{s_A^2}{s_B^2} \quad (57)$$

Wenn der Wert von F kleiner ist als der Tabellenwert in [Tabelle C.3](#) für die Freiheitsgrade $f_n = N_A - 2$ und $f_d = N_B - 2$, dann sind die Varianzen nicht wesentlich unterschiedlich. In diesem Falle werden die Varianzen nach Gleichung (58) und [Gleichung \(59\)](#) zusammengefasst, anderenfalls nach [Gleichung \(60\)](#) und [Gleichung \(61\)](#).

Bei, statistisch gesehen, gleichen Varianzen:

$$s_D^2 = \frac{s_A^2 (N_A - 2) + s_B^2 (N_B - 2)}{(N_A + N_B - 4)} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_B} \right) \quad (58)$$

$$N_D = (N_A + N_B - 4) \quad (59)$$

Bei, statistisch gesehen, ungleichen Varianzen:

$$s_D^2 = \frac{s_A^2}{N_A} + \frac{s_B^2}{N_B} \quad (60)$$

$$N_D = \frac{(s_D^2)^2}{\frac{\left(\frac{s_A^2}{N_A}\right)^2}{N_A - 2} + \frac{\left(\frac{s_B^2}{N_B}\right)^2}{N_B - 2}} \quad (61)$$

Wenn im zweiten Falle N_D nicht ganzzahlig ist, ist sein Wert auf den nächsten ganzzahligen Wert zu runden.

Die Vertrauensgrenzen für X_B werden berechnet:

$$X_{c(B)} = X_B \pm t_{(N_D)} s_D \quad (62)$$

wobei $t_{(N_D)}$ der Tabellenwert für t in [Tabelle C.2](#) für N_D Freiheitsgrade ist.

Die Vertrauensgrenzen für RTI sind:

$$\vartheta_{c(B)} = \frac{1}{X_B \pm t_{(N_D)} s_D} - \vartheta_0 \quad (63)$$

Normalerweise wird die untere Vertrauensgrenze ϑ_{lc} für RTI im Verhältnis zur oberen Vertrauensgrenze von X_B gefordert.

Der untere Vertrauensbereich Δ_R muss nach Gleichung (64) berechnet werden:

$$\Delta_R = \vartheta_{RTI} - \vartheta_{lc} \quad (64)$$

12.5 Extrapolation

Die Größe der Extrapolation wird berechnet als das Verhältnis $\frac{\tau_c}{\tau_k}$.

13 Ergebnisse und Prüfbericht

13.1 Ergebnisse der statistischen und numerischen Prüfungen

Die folgenden Kriterien werden angesetzt:

- Linearität der thermischen Langzeitbeziehung (siehe [6.3.2](#) und [6.3.3](#) von [IEC 60216-3](#)): Die Daten sowohl für das Vergleichs- als auch für das Untersuchungsmaterial müssen den Anforderungen nach [IEC 60216-3](#) genügen.
- Extrapolation zur Bezugszeit (siehe 12.5): Die Extrapolation, ausgedrückt als das Verhältnis der Bezugszeit zur längsten Alterungszeit, muss kleiner sein als 4.