

Thermische Eigenschaften von Elektroisolierstoffen

Langzeitverhalten
Anweisung zur Berechnung des thermischen Beständigkeitsprofils
Identisch mit IEC 216-4 Ausgabe 1980

DIN
VDE 0304
Teil 24

Diese Norm enthält die Übersetzung der Internationalen Norm **IEC 216-4**

Diese auch vom Vorstand des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE) e.V. genehmigte Norm ist damit zugleich eine VDE-Richtlinie im Sinne von VDE 0022. Sie ist unter obenstehender Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der etz Elektrotechnische Zeitschrift bekanntgegeben worden.

Thermal properties of electrical insulating materials;
Endurance properties;
Instructions for calculating the thermal endurance profile;
Identical with IEC 216-4 edition 1980

Propriétés thermiques de matériaux isolants électriques;
propriétés d'endurance;
Instructions pour le calcul du profil d'endurance thermique;
Identique à CEI 216-4 édition 1980

Die Internationale Norm IEC 216-4 "Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials; Part 4: Instructions for calculating the thermal endurance profile", 2. Ausgabe 1980, ist unverändert in diese Deutsche Norm übernommen worden.

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm (VDE-Richtlinie) gilt ab 1. September 1985.

Nationales Vorwort

Diese Norm ist die deutsche Übersetzung von IEC 216-4, 2. Ausgabe 1980.

Die Übersetzung wurde im Unterkomitee 831.2 „Thermisches Verhalten und Brennverhalten“ der Deutschen Elektrotechnischen Kommission im DIN und VDE (DKE) erarbeitet und als deutsche Fassung autorisiert.

Diese Norm ergänzt zusammen mit DIN VDE 0304 Teil 23 die beiden Normen DIN IEC 216 Teil 1/VDE 0304 Teil 21/12.80 und DIN IEC 216 Teil 2/VDE 0304 Teil 22/12.80.

DIN VDE 0304 Teil 24 beschreibt und enthält Anweisungen zur Berechnung des thermischen Langzeitprofils, basierend auf den statistischen Verfahren nach DIN VDE 0304 Teil 23, die bei der Auswertung von thermischen Langzeitmeßergebnissen anzuwenden sind. Voraussetzung dabei ist, daß das thermische Langzeitdiagramm auch diesen Meßergebnissen eine lineare Funktion zwischen dem Logarithmus der Zeit und der reziproken thermodynamischen Temperatur ergibt. Die im Abschnitt 3 genannten Voraussetzungen sind ebenfalls zu beachten.

Diesen statistischen Verfahren ist auf alle Fälle gegenüber der heute noch vielfach angewandten graphischen Auswertung der Vorzug zu geben. DIN VDE 0304 Teil 24 beinhaltet außerdem drei Beispiele – im Abschnitt 6.1 für zerstörungsfreie, im Abschnitt 6.2 für Schwellwertprüfungen und im Abschnitt 6.3 für zerstörende Untersuchungen –, die grundsätzlich als EVD-Programm für alle entsprechenden Messungen zu verwenden sind und damit den zeitlichen Aufwand dieses Auswerteverfahrens auf ein Minimum reduzieren.

Auf der anderen Seite ist es eine weitgehendst bekannte Tatsache, daß viele thermische Langzeitmessungen nicht zu einer linearen Kurve im Sinne des strengen Linearitätstests (Fisher-Test) führen. Das ist einer der mitbestimmenden Gründe, warum IEC 216 Teil 1 und Teil 2 zur Zeit einer Revision unterworfen werden; die Richtlinien sollen dahingehend geändert werden, damit diesem Umstand Rechnung getragen wird.

Fortsetzung Seite 2 bis 18

Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)
Normenausschuß Kunststoffe (FNK) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Schließlich wird auf denjenigen Abschnitt des Nationalen Vorwortes von DIN IEC 216 Teil 1/VDE 0304 Teil 21/12.80 hingewiesen, der sich auf die Verwendung von thermischen Langzeitdaten im Rahmen von Publikation IEC 85 bezieht. Dazu ist zu ergänzen, daß eine Revision dieser Publikation aufgrund von Empfehlungen einer Koordinations-Tagung in Genf, an der mehrere an der Publikation IEC 85 interessierte Technische Komitees der IEC teilnahmen, in die Wege geleitet wurde und inzwischen abgeschlossen ist. Die 2. Ausgabe von IEC 85 ist 1984 unter dem Titel „Thermal evaluation and classification of electrical insulation“ erschienen. Ihr vorangegangen war als Entwurf das Schriftstück IEC 15B(Central Office)55, Ausgabe September 1982, das der deutschen Öffentlichkeit als Entwurf DIN IEC 15B(CO)55/VDE 0301 Teil 1/08.83 zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt worden war.

Hinweise zu „siehe Nationales Vorwort“

Zu Abschnitt Einleitung und 2:

Die hier zitierte IEC 493-1 ist bisher noch nicht in das Deutsche Normenwerk übernommen worden. Es ist allerdings auch nicht beabsichtigt, diese Internationale Norm zu übernehmen, da in Deutschland genügend Fachbücher verfügbar sind, die statistische Verfahren zum Gegenstand haben und z.B. DIN 55302 Teil 1 und Teil 2 sowie DIN 55303 Teil 2 dieses Gebiet sachlich erfassen.

Zu Abschnitt Einführung:

Die komplette IEC 216 befindet sich bereits wieder in Revision. Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieser Norm standen die folgenden internationalen Schriftstücke in der Diskussion (Originaltitel dieser Schriftstücke siehe „Weitere Normen“):

Zu 216-1:

IEC 15B(Central Office)62, Ausgabe September 1984 und

IEC 15B(Central Office)62A, Ausgabe Oktober 1984

Zu IEC 216-2:

IEC 15B(Central Office)50, Ausgabe Oktober 1981

(siehe DIN IEC 216 Teil 2 A1/VDE 0304 Teil 22 A1/Entwurf 04.82)

Zu IEC 216-4:

15B(Secretariat)84, Ausgabe November 1983

Teil 5 und Teil 6, die im Abschnitt „Einführung“ noch als „in Vorbereitung“ erwähnt werden, sollen voraussichtlich nicht mehr erscheinen, da die hierin geplanten Ausführungen im Rahmen der Revision in Teil 1 bis Teil 4 einfließen sollen.

Zu Abschnitt 4:

Der erstmalig in diesem Abschnitt des Originals und dann an mehreren Stellen benutzte Ausdruck „time to failure“ würde an sich übersetzt „Zeiten bis zum Versagen“ lauten. Dem fachlichen Sprachgebrauch folgend wurde dafür kurz das Wort „Ausfallzeit“ verwendet.

Zu Abschnitt 6.1:

Die zerstörungsfreie Messung des Isolationswiderstandes wird hier nach DIN 53428/VDE 0303 Teil 3 durchgeführt.

Zu Abschnitt 6.2:

Schwellwertprüfung mit 1-Minuten-Prüfspannung siehe DIN 53481/VDE 0303 Teil 2.

Zu Abschnitt 6.3:

Die Prüfung der Zugfestigkeit hängt nach DIN IEC 216 Teil 2/VDE 0304 Teil 22/12.80, Tabelle II, vom Werkstoff ab: Für lackierte Stoffe gilt IEC 394-2 und als alternative Deutsche Norm DIN 40623 Teil 2 oder die hiermit sachlich übereinstimmende Bestimmung DIN VDE 0365 Teil 2 bzw. DIN 40632 Teil 2 oder die hiermit sachlich übereinstimmende Bestimmung DIN VDE 0365 Teil 3. Für Papiere gilt IEC 554-2 und als alternative Deutsche Norm DIN 6741/VDE 0311.

Für Elastomere gilt ISO 37 und als alternative Deutsche Norm DIN 53504.

Zu Tabelle IX (Beginn):

Nach Meinung der deutschen Experten liegt hier ein Druckfehler vor:

In der 10. Zeile von unten muß die Formel wie folgt korrigiert werden:

$$s_2^2 = \sum n_i (y_i - \bar{Y})^2 / (k - 2)$$

Alle zu dieser IEC-Publikation erscheinenden Sechsmonatsschriftstücke werden in Entwürfen als Ergänzungen oder Änderungen zu DIN VDE 0304 veröffentlicht.

Deutsche Übersetzung

Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC)

Richtlinie zur Bestimmung des thermischen Langzeitverhaltens von Elektroisolierstoffen

Teil 4: Anweisungen zur Berechnung des thermischen Langzeitprofils

Deskriptoren: Isolierstoffe;
Prüfung des thermischen Langzeitverhaltens;
Statistik

		Inhalt		
	Seite			Seite
Vorwort	3	4 Prüfverfahren und Meßwerte		4
Einleitung	3	5 Statistische Berechnungen und Entscheidungen		5
Einführung	4	6 Beispiele		6
1 Anwendungsbereich	4	Anhang A 0,95-Bruchwerte der χ^2, t- und F-Verteilung		16
2 Zweck	4	Anhang B Liste der Formelzeichen		16
3 Voraussetzungen	4			

Vorwort

1. In den Technischen Komitees der IEC sind jeweils die Nationalen Komitees vertreten, die an den betreffenden Normungsarbeiten interessiert sind. Damit entsprechen die Arbeitsergebnisse der Technischen Komitees einer in höchstmöglichem Maße übereinstimmenden internationalen Meinung über die behandelten Themen.
2. Die Arbeitsergebnisse stellen internationale Empfehlungen dar und werden in diesem Sinne von den Nationalen Komitees anerkannt.
3. Um die internationale Vereinheitlichung zu fördern, wünscht die IEC, daß alle Nationalen Komitees den Wortlaut der IEC-Empfehlung in ihre nationalen Normen aufnehmen, soweit es die nationalen Gegebenheiten erlauben. Alle Abweichungen zwischen IEC-Empfehlungen und entsprechenden nationalen Normen sind — soweit möglich — in diesen Normen deutlich anzugeben.

Einleitung

Diese Norm wurde von dem Unterkomitee 15B „Langzeitprüfungen“ des Technischen Komitees Nr 15 „Isolierstoffe“ der IEC ausgearbeitet. Sie ist Teil 4 der 2. Ausgabe von IEC 216*), die in mehreren Teilen veröffentlicht wird.

Ein erster Entwurf wurde auf der Tagung in Toronto 1976 diskutiert. Als Ergebnis dieser Tagung wurde im Mai 1977 den Nationalen Komitees ein Entwurf, Schriftstück IEC 15B(Central Office)37, zur Abstimmung unter der Sechsmonatsregel vorgelegt.

Die folgenden Länder stimmten ausdrücklich für die Veröffentlichung:

Ägypten	Frankreich	Portugal	Spanien
Belgien	Jugoslawien	Rumänien	Südafrika (Republik)
Dänemark	Kanada	Schweden	Tschechoslowakei
Deutschland	Norwegen	Schweiz	Türkei
Finnland	Österreich	Sowjetunion	Vereinigtes Königreich

Andere in dieser Norm zitierte IEC-Publikationen*):

- IEC 216-1: Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials; Part 1: General procedures for the determination of thermal endurance properties, temperature indices and thermal endurance profiles
- IEC 216-2: Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials; Part 2: List of materials and available tests
- IEC 216-3: Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials; Part 3: Statistical methods
- IEC 493-1: Guide for the statistical analysis of ageing test data;
Part 1: Methods based on mean values of normally distributed test results

*) Siehe Nationales Vorwort.

Einführung

Die 2. Ausgabe von IEC 216 „Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials“ setzt sich aus mehreren Teilen*) zusammen:

- IEC 216-1: General procedures for the determination of thermal endurance properties, temperature indices and thermal endurance profiles
- IEC 216-2: List of materials and available tests
- IEC 216-3: Statistical methods
- IEC 216-4: Instructions for calculating the thermal endurance profile
- IEC 216-5: Instructions for making thermal endurance tests and obtaining the temperature index (in Vorbereitung)
- IEC 216-6: Procedures for the determination of relative temperature indices (in Vorbereitung)

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil gibt detaillierte Anweisungen zur Berechnung des thermischen Langzeitprofils von Elektroisolistoffen nach IEC 216-3 „Part 3: Statistical methods“).

2 Zweck

Allgemeine statistische Verfahren zur Bestimmung des thermischen Langzeitprofils von Elektroisolistoffen wurden bereits in IEC 216-3*) beschrieben.

In diesem Teil werden die Anweisungen zu den Berechnungen nach diesen Verfahren im einzelnen angegeben. Die Anweisungen werden mit Hilfe von Zahlenbeispielen erläutert, indem die Berechnungen Schritt für Schritt gezeigt werden.

Bei einer solchen Berechnung werden die statistischen Prüfvariablen mit Werten verglichen, die im Anhang A tabellarisch geordnet sind. Umfassendere Tabellen sind in IEC 493-1*) „Guide for the statistical analysis of ageing test data; Part 1: Methods based on mean value of normally distributed test results“, die den Mittelwert von normalverteilten Prüfergebnissen zur Grundlage haben, zu finden.

Die Beispiele umfassen folgende drei Fälle:

- Beispiel 1 Fortlaufende Aufzeichnungen
- Beispiel 2 Periodische Anwendung der Schwellwertprüfung
- Beispiel 3 Zerstörende Messungen

Bei den Beispielen 1 und 2 können die hier gezeigten Berechnungen mit einem einfachen Tischrechner durchgeführt werden. Beim Beispiel 3 ist die Benutzung eines elektronischen Rechners mit statistischem Programm vorgesehen. Aus diesem Grund werden die Berechnungen als solche in anderer und erheblich kürzerer Form dargestellt; sie könnten allerdings auch leicht in die Form der Beispiele 1 und 2 umgestaltet werden (und umgekehrt).

3 Voraussetzungen

Für die statistischen Verfahren gelten folgende Voraussetzungen:

1. Die festgestellten Zeitwerte für den Ausfall müssen **stochastisch unabhängig** sein. Die für die thermische Beanspruchung benutzten Probekörper müssen eine zufällige Auswahl aus dem zu untersuchenden Probenbestand darstellen und sind einheitlich zu behandeln.
2. Der Logarithmus der Ausfallzeit muß eine **Normalverteilung** mit der **gleichen Varianz** bei allen Temperaturen aufweisen.

3. Der Logarithmus der Ausfallzeit muß als **lineare Funktion** von der reziproken thermodynamischen Temperatur (Arrhenius-Gleichung) abhängig sein, jedenfalls mindestens über den Bereich, der alle Prüfwerte und Extrapolationswerte umfaßt.

4. Der Fehler der Beanspruchungstemperatur muß vernachlässigbar und für alle zusammen thermisch beanspruchten Probekörper gleich sein.

4. Prüfverfahren und Meßwerte

Um das thermische Langzeitprofil (TEP) von Elektroisolistoffen für einen vorgeschriebenen Grenzwert zu bestimmen, ist es erforderlich, daß eine festgelegte Anzahl von Probekörpern einer Reihe von ausgewählten Temperaturen ausgesetzt wird; die Ausfallzeit*) ist dann zu bestimmen.

Die Temperaturen sind nach IEC 216-1*) auszuwählen, und es ist jeweils eine Gruppe von Probekörpern bei jeder Temperatur entweder periodisch oder fortlaufend thermisch zu beanspruchen. Die Bestimmung der Ausfallzeiten*) – das ist die Zeit, zu der eine festgelegte Eigenschaft einen gegebenen Grenzwert erreicht – hängt vom Prüfverfahren ab.

4.1 Wiederholende Prüfungen

Jeder Probekörper wird während der Alterung wiederholt untersucht, entweder mit Hilfe von fortlaufenden Aufzeichnungen einer festgelegten Eigenschaft oder zu festgesetzten Zeiten durch Messung oder Stichproben bei Anwendung eines spezifischen Schwellwertes.

Wenn die Eigenschaft fortlaufend überwacht wird, wird die Ausfallzeit jedes Probekörpers unmittelbar von den aufgetragenen Werten ermittelt als die Zeit, bis zu der die Eigenschaft den Grenzwert erreicht.

Dieses Verfahren läßt sich für alle Fälle anwenden, bei denen eine Eigenschaft fortlaufend oder bei häufigem Abtasten durch nicht zerstörende Messungen während der Alterung überwacht wird.

Sofern die Eigenschaft zu festgesetzten Zeiten während der Alterung nachgemessen wird, ist die Eigenschaft (oder eine vorherbestimmte Funktion der Eigenschaft) über der Zeit (oder einer Funktion der Zeit) aufzutragen; die jeweiligen Ausfallzeiten sind der graphischen Darstellung als die Zeit zu entnehmen, bis zu der die Eigenschaft jedes einzelnen Probekörpers den Grenzwert erreicht.

*) Siehe Nationales Vorwort.

Dieses Verfahren läßt sich für fortlaufende und periodische Alterungsprüfungen anwenden, bei denen eine Eigenschaft in unregelmäßigen Zeitabschnitten (z.B. am Ende des Beanspruchungszyklus) zerstörungsfrei gemessen wird. In einigen Fällen mag es ausreichend sein, den Grenzwert als einen Schwellwert anzusehen und dann, wie unten angegeben, weiterzuverfahren.

Wenn ein Schwellwertversuch während der Alterung zu festgesetzten Zeiten in Anwendung gelangt, dann ist die Ausfallzeit für jeden Probekörper als Mittelwert aus folgenden Zeiten zu bestimmen: Aus derjenigen, bei der zum ersten Mal der Probekörper gerade den Grenzwert erreicht hat, und aus der unmittelbar vorhergehenden Meßzeit, d.h., die Ausfallzeit wird also als Halbzeit der letzten Periode, der der Probekörper ausgesetzt war, gewählt.

Dieses Verfahren empfiehlt sich für periodische Prüfungen, bei denen alle Probekörper am Ende einer jeden Periode mit dem Schwellwert getestet und dann einer weiteren Periode unterworfen werden, bis die Eigenschaft den Grenzwert erreicht hat.

4.2 Einzelprüfungen an jedem Probekörper

In diesem Fall sind die Eigenschaftswerte bei jeder Temperatur in ein Diagramm gegen die Zeit einzutragen, wobei eine Kurve ausgezogen wird, die den besten funktionellen Zusammenhang („Sitz“) erkennen läßt. Ausgehend von vier Meßzeiten, die dem Kreuzungspunkt zwischen der am besten passenden Kurve und der Geraden am nächsten kommt, die den Grenzwert repräsentiert, werden für die einzelnen Temperatur-Parameter parallel verlaufende Kurven, zu der die gegebene Funktion am besten darstellen die Kurve, durch die einzelnen Meßpunkte gezogen. Die Punkte, bei denen schließlich alle Temperatur-Parameter-Kurven die Grenzwertlinie kreuzen, gelten als Einzel-Ausfallzeiten.

Dieses Verfahren wird in den Fällen angewandt, bei denen die Eigenschaftsänderung durch zerstörende Messungen zu bestimmen ist, und in den Fällen einer fortlaufenden Alterung, bei denen zu festgesetzten Zeiten nur eine bestimmte Anzahl von Probekörpern aus dem Ofen herausgenommen wird, die dann nach der Messung zu verwerfen sind.

5 Statistische Berechnungen und Entscheidungen

Für jedes k der verschiedenen Temperaturen ϑ_i in °C ($i = 1, 2, \dots, k$) ist der reziproke Wert der thermodynamischen Temperatur zu berechnen aus

$$x_i = \frac{1}{\vartheta_i + 273}$$

sowie der Brigg'sche Logarithmus (d. h. der Logarithmus mit der Basis 10) der Ausfallzeit aus

$$y_{ij} = \lg t_{ij}.$$

Dabei ist t_{ij} die Ausfallzeit des Probekörpers j bei einer Temperatur ϑ_i in °C ($j = 1, 2, \dots, n_i$) und n_i die Anzahl der Probekörper, die der Temperatur ϑ_i in °C ausgesetzt worden sind. Die Gesamtanzahl der Probekörper ist dann $N = \sum n_i$.

5.1 Prüfung auf Gleichheit der Varianzen von y_{ij}

Es sind die Varianzen s_{1i}^2 für die verschiedenen Werte von x_i nach

$$s_{1i}^2 = \frac{n_i \sum y_{ij}^2 - (\sum y_{ij})^2}{n_i f_i} \quad f_i = n_i - 1$$

und der gewichtete Mittelwert der Varianz nach

$$s_1^2 = \frac{\sum f_i s_{1i}^2}{\sum f_i} \quad f_1 = \sum f_i = N - k$$

zu berechnen.

Diese Varianzen, miteinander verglichen, stellen den Bartlett-Test dar. Man berechnet hierfür

$$c = 1 + \frac{\left(\sum \frac{1}{f_i}\right) - \frac{1}{f_1}}{3(k-1)}$$

und der Prüfwert

$$\chi^2 = 2,3 \cdot \frac{f_1 \cdot \lg s_1^2 - \sum (f_i \cdot \lg s_{1i}^2)}{c}$$

Der Prüfwert χ^2 ist mit dem Tabellenwert $\chi^2(0,95; k-1)$ nach Anhang A zu vergleichen.

Wenn $\chi^2 > \chi^2(0,95; k-1)$ ist, dann ist der Wert von χ^2 zusammen mit dem thermischen Langzeitprofil anzugeben.

5.2 Regressionskoeffizienten

Die Koeffizienten sind nach der Regressionsgleichung

$$y = a + bx$$

zu berechnen, ausgehend von

$$\bar{x} = \frac{\sum n_i x_i}{N}$$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum y_{ij}}{n_i}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum n_i \bar{y}_i}{N}$$

Dabei sind

$$b = \frac{N \sum (x_i \sum y_{ij}) - (\sum n_i x_i) (\sum \sum y_{ij})}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2}$$

und

$$a = \bar{y} - b\bar{x}.$$

Die Regressionsgerade ist in ein thermisches Langzeitdiagramm einzutragen (siehe Bild 1).

5.3 Prüfung auf Linearität

$$\text{Berechne } s_2^2 = \frac{(\sum n_i \bar{y}_i^2 - N\bar{y}^2) - b(\sum n_i x_i \bar{y}_i - N\bar{x}\bar{y})}{f_2},$$

wobei $f_2 = k - 2$ ist.

Nimm den Quotienten aus s_2^2 und s_1^2 (siehe Abschnitt 5.1) als

$$F = \frac{s_2^2}{s_1^2}.$$

Die Prüfvariable F ist anschließend mit dem Tabellenwert $F(0,95; f_n, f_d)$ nach Anhang A zu vergleichen, wobei $f_n = f_2$ und $f_d = f_1$ sind.

Wenn $F > F(0,95; f_n, f_d)$ ist, dann ist der Wert F zusammen mit dem thermischen Langzeitprofil zu berichten.

Die Restvarianz berechnet sich aus

$$s^2 = \frac{f_1 s_1^2 + f_2 s_2^2}{f},$$

wobei $f = N - 2$ ist.

5.4 Vertrauensbereich von Y^{**}

Für ausgewählte Werte von X ist zu berechnen

$$Y = a + bX$$

und

$$s_y^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right]$$

Bestimme $t = t(0,95; f)$ nach Anhang A, und ermittle die untere, einseitige Vertrauensgrenze von y aus

$$Y_c = Y - t s_y$$

wobei s_y die Quadratwurzel aus der Varianz s_y^2 ist.

Die miteinander in Verbindung stehenden Größen X und Y_c werden in das thermische Langzeitdiagramm (siehe Abschnitt 5.2) eingetragen und eine Kurve durch die Punkte (X, Y_c) in dem Diagramm gezogen, die die untere, einseitige 95 %-Vertrauensgrenze zu der wahren Größe von y bei einem gegebenen Wert von x anzeigen.

5.5 Der Variationskoeffizient

Ausgehend von der Regressionsgleichung, berechnet man den Wert X_5 , der $Y_5 = 3,7$ (Ausfallzeit 5000 h) entspricht:

$$X_5 = \frac{Y_5 - a}{b}$$

sowie die korrespondierende Varianz von Y_5

$$s_y^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(X_5 - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right]$$

Ist der Variationskoeffizient

$$CV = \frac{s_y}{3,7}$$

größer als 0,015, sind die Berechnungen abzubrechen; in diesem Fall ist nur das thermische Langzeitdiagramm vorzulegen.

5.6 Temperaturen, die den Ausfallzeiten 20 000 und 5000 h entsprechen

Berechne

$$X_{20} = \frac{4,3 - a}{b}$$

und

$$\vartheta_{20} = \frac{1}{X_{20}} - 273$$

$$\vartheta_5 = \frac{1}{X_5} - 273$$

(nach Abschnitt 5.5).

5.7 Vertrauensgrenze für ϑ_5

Berechne

$$b_r = b - \frac{t^2 s^2}{b \sum n_i (x_i - \bar{x})^2}$$

$$s_r^2 = s^2 \left[\frac{b_r}{Nb} + \frac{(X_5 - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right]$$

und

$$X_c = \bar{x} + \frac{Y_5 - \bar{y}}{b_r} + \frac{t s_r}{b_r}$$

wobei $t = t(0,95; f)$ wie im Abschnitt 5.4 angegeben

$$\vartheta_c = \frac{1}{X_c} - 273.$$

*) Siehe Nationales Vorwort

**) Nationale Fußnote: in IEC 216-4 fälschlicherweise y bezeichnet.

5.8 Das thermische Langzeitprofil

Das TEP wird als

$$\vartheta_{20}/\vartheta_5 (\vartheta_c)$$

angegeben.

6 Beispiele

Im folgenden werden die Berechnungen mit Hilfe von Zahlenbeispielen erläutert, wie man sie Schritt für Schritt unter Benutzung eines einfachen Tischrechners, eines Rechenchiebers und einer Logarithmentafel ausführt. Zur Vereinfachung werden folgende Abkürzungen verwandt:

S	Summe
D	Differenz
Q	Quadrat
P	Produkt
M	Mittelwert
V	Varianz
R	Reziprokwert,

so daß zum Beispiel SQD die Summe der Quadrate von mehreren Differenzen bedeutet. Indizes werden in Klammern gesetzt. Wie diese Symbole zu benutzen sind, ergibt sich aus den Tabellen.

6.1 Beispiel 1: Fortlaufende Aufzeichnungen

An einem Werkstoff wird in fortlaufenden Messungen eine Eigenschaft, z.B. der Isolationswiderstand, untersucht. *)

Die Ausfallzeit wird für jeden Probekörper als die Zeit bestimmt, bei der der Isolationswiderstand einen bestimmten Wert (den Grenzwert) unterschreitet.

Der erwartete Temperaturbereich, der mit der extrapolierten Ausfallzeit von 20 000 h übereinstimmt, ist 160 bis 169 °C. Es werden 3 Beanspruchungstemperaturen ϑ_i in °C aus IEC 216-1*), Tabelle I, ausgewählt, nämlich 180, 200 und 220 °C, das heißt, $k = 3$ ($i = 1, 2, 3$).

Es sind mindestens $N = 15$ Probekörper vorzubereiten, wobei 5 Probekörper zufällig ausgewählt und jeder Temperatur ausgesetzt werden $n_i = 5$ ($j = 1, 2, 3, 4, 5$).

Die ermittelten Ausfallzeiten t_{ij} in h sind in Tabelle I festgehalten.

Tabelle I zeigt die Berechnung der reziproken thermodynamischen Temperatur x_i sowie der Variablen $y_{ij} = \lg t_{ij}$. Zur Vereinfachung sind die Variablen x mit 1000 multipliziert.

Tabelle II zeigt die Berechnung des thermischen Langzeitprofils.

6.1.1 Die Varianzen s_{11}^2 ergeben sich nach Punkt (14) als $V(1, i)$ mit $f(i) = 4$ Freiheitsgraden; die nach Freiheitsgraden gewichtete Varianz s_1^2 ergibt sich nach Punkt (26) als $V(1)$ mit $f(1) = 12$ Freiheitsgraden. Der Prüfwert für die Varianz $\chi^2 = 0,17$, Punkt (34), wird mit $\chi^2(0,95; 2) = 6,0$, Punkt (35), verglichen. Da $\chi^2 < \chi^2(0,95; 2)$ ist, wird der Wert von χ^2 positiv für das 5 %-Signifikanzniveau beurteilt.

6.1.2 Die Regressionskoeffizienten $a = -7,604$, Punkt (53) und $b = 5,147$, Punkt (51) sind zu bestimmen. Die Regressionsgerade

$$y = -7,604 + 5,147 x$$

ist in das thermische Langzeitdiagramm (siehe Bild 1) eingetragen.